

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'INFORMATIQUE

## Mémoire de Fin d'Etudes De MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Science et Technologie

Filière : Génie électrique

Spécialité : **Automatique Industrielles**

*Présenté par :*

**Ben Habouche Amazigh**

**Amazit Abd El-Ilah**

### Thème

**CONCEPTION ET REALISATION D'UN AVION  
RADIOCOMMANDE**

*Mémoire soutenu publiquement le 19/09/ 2018 devant le jury composé de :*

**Président : M Prénom NOM**

**Encadreur : M Prénom NOM**

**Co-Encadreur : Ben Belkacem Samir**

**Examineur : M Prénom NOM**

**Examineur : M Prénom NOM**

## *Remerciement*

*Nous remercions Dieu ALLAH tous puissant qui nous a donné le courage de confronter ce nouveau domaine, et la force de réaliser ce travail.*

*En tiens à remercier les personnes qui garce à eux, on ne pourrai jamais être là, nos chers parents. Ainsi que toute notre famille.*

*Comme nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur **Mr. Ben Belkacem.S** qui nous a soutenus et orienter tout au long de notre travail.*

*Nous remercions d'avance les **membre de jury** qui nous font l'honneur de juger notre travail et nous espérons être à la hauteur de leurs attents.*

*Nous remercions aussi les **enseignants** qui ont veillé au bon déroulement de notre formation tout au long de notre cursus.*

*Un grand merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## Dédicace

C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que nous dédions  
ce modeste travail de fin d'étude

À nos très chers parents ; qui ont sacrifié leur vie pour notre  
réussite et nous ont éclairé le chemin par leurs conseils judicieux.

Nous dédions aussi ce travail à nos frères, sœurs et leurs époux.

Nos grands-parents.

Nos tantes, nos oncles et leurs familles.

Nos cousins et cousines.

Tous nos adorables amis.

Ainsi qu'à toute personne qui nous ont soutenue.

## Acronymes :

<b>PWM</b>	: Modulation De La Largeur D'impulsion
<b>IDE</b>	: Environnement de développement intégré
<b>SPI</b>	: Interface série série
<b>SS</b>	: Slave Select
<b>MOSI</b>	: Entrée de sortie maitre esclave
<b>MISO</b>	: Sortie esclave d'entrée principale
<b>SCK</b>	: SPI Clock
<b>SCLK</b>	: Horloge de série
<b>RF</b>	: Radio Fréquence
<b>CSN</b>	: Chip SPI Select
<b>CE</b>	: Chip Enable
<b>ESC</b>	: Electronic Speed controllers
<b>Lipo</b>	: Lithium Polymère
<b>Li-Ion</b>	: Lithium Ionique
<b>Ni-Mh</b>	: Nickel Metal hybride
<b>RC</b>	: Radio Commande
<b>EPP</b>	: polystyrene expansé
<b>FM</b>	: Module de fréquence
<b>PPM</b>	: Modulation de la position des impulsions
<b>PCM</b>	: Modulation par impulsion
<b>IMU</b>	: Unité de mesure inertiel

# Sommaire

---

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

## CHAPITRE I : Généralité Sur Les Radio Commandes

1. Introduction : .....	3
2. Les différents types des radiocommandes : .....	4
2.1. Le mode de pilotage des radiocommandes de types programmables : .....	4
3. Histoire des radiocommandes : .....	5
4. Les avions radiocommandé : .....	6
4.1. Histoire : .....	7
4.2. Types des avions RC : .....	9
4.3. Types de kits et construction : .....	10
4.4. Fonctionnalités des différentes parties d'un avion radiocommandé : .....	11
4.4.1. L'hélice : .....	12
4.4.2. Le moteur : .....	12
4.4.3. Les ailerons : .....	13
4.4.4. La profondeur : .....	14
4.4.5. La dérive .....	15
5. Composition des radiocommandes : .....	16
5.1. Composition de l'émetteur et le récepteur : .....	16
5.2. La fréquence de travail : .....	17
5.3. La modulation : .....	17
5.3.1. Pulse Position Modulation PPM : .....	18
5.3.2. Pulse Code Modulation PCM : .....	18
6. FONCTIONNEMENT ET MONTAGE D'UNE RADIO-COMMANDE .....	19
6.1. L'émetteur de base : .....	19
6.2. Le récepteur : .....	19
6.3. Un montage complet utilisant 2 voies du récepteur : .....	20
7. CONCLUSION : .....	21

## Chapitre II : Modélisation Du Vol Pour Un Avion à Voilure Fixe

Introduction : .....	22
1. Principe de vol d'un avion à voilure fixe : .....	22
1.1 Les forces de vol : .....	22
1.2 Les différentes parties constituant un avion à voilure fixe : .....	23

# Sommaire

1.3 Les surfaces de contrôle et les mouvements qu'ils produisent :.....	24
1.4. Les Ailes et quelques notions d'aérodynamique : .....	26
2. Modèle dynamique d'un avion à voilure fixe : .....	28
2.1 Angles d'Euler : .....	28
2.2 Modélisation dynamique : .....	29
2.3 Forces aérodynamique : .....	29
2.4 Dérivation du modèle en utilisant l'approche de Lagrange -Euler : .....	30
2.5 Etude de la dynamique des moteurs : .....	33
3. Modèle finale avec approximation de petite angle : .....	34
4. Conclusion : .....	35
<u>Chapitre III : Réalisation Pratique Et Teste De vole</u>	
Introduction : .....	36
1. Premier Partie : Outils Matériels Et Logiciels : .....	36
1.1. Structure du système : .....	36
1.1.1. Le module d'acquisition et de traitement de données : .....	37
1.1.1. a. Structure du module d'acquisition et de traitement de données : .....	37
2. Module RF 2.4GHz nRF24L01+ : .....	38
1.1.2. Module de commande : .....	41
1.1.2. b. Structure du module de commande : .....	41
1.1.3. D'autre matérielles utilisée : .....	48
1.1.3. a. Un accumulateur LiPo3s (Lithium Polymère 3 cellules) avec chargeur LiPo : .....	48
1.2.1. Logiciel du programmation Arduino IDE : .....	49
2. Deuxième Partie : Désigne Et Réalisation De La Commande : .....	52
2.1. Partie Désigne : .....	52
2.1.1. Traçage du plans : .....	52
2.1.2. Découpage du plan : .....	52
2.1.3. Assemblage et formation du plan de l'avion : .....	53
2.2. Partie commande : .....	54
2.2.1. Réalisation du l'émetteur : .....	54
2.2.2. Réalisation du récepteur : .....	55
3. Troisième Partie : Teste De Décollage De L'avion Et De Commande: .....	56
3.1. Préparatifs avant le vol : .....	56
3.2. Le prototype : .....	56

# Sommaire

3.3. Analyse de prototype : .....	56
<u>Conclusion</u> : .....	58

# Sommaire

---

1.3 Forces aérodynamique :.....	32
1.4 Dérivation du modèle en utilisant l'approche de Lagrange-Euler :.....	32
1.5 Etude de la dynamique des moteurs :.....	36
3. Modèle finale avec approximation de petit angle : .....	37
4. Conclusion : .....	37
1.1.3. D'autre matérielles utilisée : .....	50
1.2.1. Logiciel de la programmation Arduino IDE : 51	
2. Deuxième Partie : Désigne Et Réalisation De La Commande : .....	54
2.1. Partie Désigne :.....	54
2.1.1 Traçage du plans :.....	55
2.1.2. Découpage du plan.....	55
2.1.3. Assemblage et formation du plan de l'avion : .....	56
2.2. Partie commande : .....	56
2.2.1. Réalisation du l'émetteur :.....	56
3. Troisième Partie : Teste De Décollage De L'avion Et De Commande: .....	58
3.1. Préparatifs avant le vol :.....	58
3.2. Le prototype : .....	59
3.3. Analyse de prototype : .....	59
Conclusion générale .....	61
Annexes.....	62
Bibliographie.....	63

## Introduction Générale

---

L'homme domestiqua le feu, il inventa la roue, l'agriculture, l'écriture, la boussole... Puis il se demanda s'il peut risquer de voler ?. Jusqu'au début du *XVII<sup>e</sup>* siècle l'homme imagine d'une manière plus ou moins réaliste ce que pourrait être une machine volante. C'était en 1903 que les frères Wright ont pour la première fois fait voler un aéronef pour une durée de 40 secondes à peine. Ensuite, une fois le principe compris, l'aviation s'est vite développée.

Le développement des aéronefs s'est rapidement fait dans le domaine militaire lors de la Première Guerre Mondiale. Puis, à la fin de la guerre, l'aviation a dû trouver une nouvelle utilité. Notamment la poste a décidé d'utiliser les avions pour transporter le courrier. L'aviation s'est améliorée encore au niveau de l'autonomie ; en 1927 Charles Lindbergh a réussi la traversée de l'atlantique de New York à Paris sans escale en 33 heures. À cette époque, on pense déjà à l'aviation civile, mais les avions ne transportaient qu'un petit nombre de passagers.

Il a fallu attendre l'année 1940 pour que le premier avion à moteur à réaction apparaisse. Il a d'abord servi à des fins militaires, puis à la fin de la Deuxième Guerre Mondiale il a été utilisé pour transporter des passagers. En 1958 le Boeing 707, d'une capacité de 190 places, fait ses premiers vols avec des passagers. C'est le premier avion de cette époque à ressembler le plus à ceux actuels.

De nos jours, l'aviation ne cesse de s'améliorer. Mais le principe de base de vol reste le même que pour l'avion des Frères Wright. Seuls la sécurité, le confort et le rendement sont les questions que les ingénieurs se posent pour les futurs avions.

Afin de comprendre comment fonctionne un avion ; nous allons donc savoir comment les Frères Wright et les autres ingénieurs ont réussi à concevoir leurs avions. Ainsi, il nous sera plus facile de comprendre les problèmes auxquels se sont confrontés les ingénieurs pour que 100 ans après le premier vol, nous puissions prendre l'avion de façon sûre. Afin de comprendre les principes de base de vol d'un avion, nous allons nous pencher sur un modèle réduit d'avion radiocommandé.

Un avion radiocommandé est un modèle réduit que se pilote grâce à une télécommande. Son principe est que la télécommande envoie un signal radio à un récepteur et que ce récepteur, suivant le signal, contrôle des moteurs et des

## Introduction Générale

---

servomoteurs qui actionnent des gouvernes permettant ainsi le contrôle de l'avion.

Le but de notre travail consiste à réaliser un avion modèle réduit qui va être commandé à distance à travers des radios fréquences nRF24L01+ en utilisant la carte Arduino-Nano. Et pour atteindre notre objectif nous allons organiser notre travail comme suit :

Tout d'abord, dans le premier chapitre nous présentons le mode des radiocommandes et ces applications, tout en décrivons les différents types des radiocommandes et son mode de pilotage et leurs fréquence de travail, ainsi leur utilisation dans le domaine des avions réduit piloté.

Puis, dans le second chapitre nous nous intéresserons à la compréhension du principe de vol. Comment l'avion vole-t-il ? Quelles sont les différentes forces qui agissent sur elle ? Nous comprendrons ensuite comment un avion fait pour se déplacer dans les trois dimensions à l'aide des ailerons, de la profondeur et de la dérive. A la fin nous développerons les équations mathématiques qui régissent ce système.

Ensuite, le troisième chapitre sera divisé en trois parties ; où la première partie est dédiée aux outils matériels et logiciels utilisés pour réaliser les différentes parties composantes l'avion. La deuxième partie est composée de la partie désigne et réalisation de la commande à distance. La troisième partie de ce chapitre concerne le teste de décollage de l'avion et de commande.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale et quelque perspective.

## **1. Introduction :**

Une radiocommande de modélisme est un instrument permettant de commander un modèle réduit d'avion RC à distance. Elle est généralement équipée de deux leviers permettant le contrôle de la puissance du moteur et de la direction. On trouve également des modèles avec molette et une gâchette pour les modèles réduits de voitures. Elles peuvent être très simples (levier de profondeur et de direction et celle des gaz pour les avions) ou très complexes (changement de canaux et de modes).



Figure 1.1 : Radio-commande pour commander des modèles réduits des voitures



Figure 1.2 : Radio-commande pour commander des modèles réduits des avions

## 2. Les différents types des radiocommandes :

- Les basiques : Ce sont généralement des ensembles de 2 à 4 voies, sans possibilité de réglage autre que l'inversion du sens de rotation des servos.
- Les programmables : Ce sont des radiocommandes équipés d'un soft (programmes) permettant de multiples réglages comme les courses des servos, les neutres, les inversions, les mixages etc... Ces radiocommandes peuvent asservir jusqu'à 18 voies pour les plus complètes. Les plus récentes permettent également une mise à jour de leur soft via un PC.

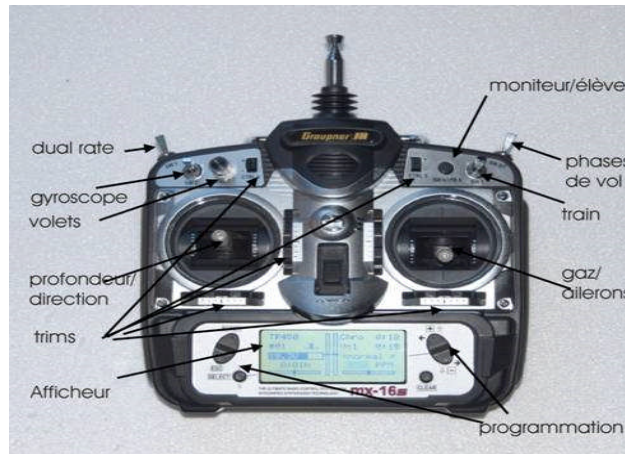


Figure 1.3 : Radiocommande de type programmable

### 2.1. Le mode de pilotage des radiocommandes de types programmables :

Ces radiocommandes permettent à l'utilisateur de choisir le mode de pilotage qui lui convient mieux. Gaz à gauche, gaz à droite, ailerons à gauche, ailerons à droite etc... 4 mode de pilotage sont disponibles sur ces types des radiocommandes.

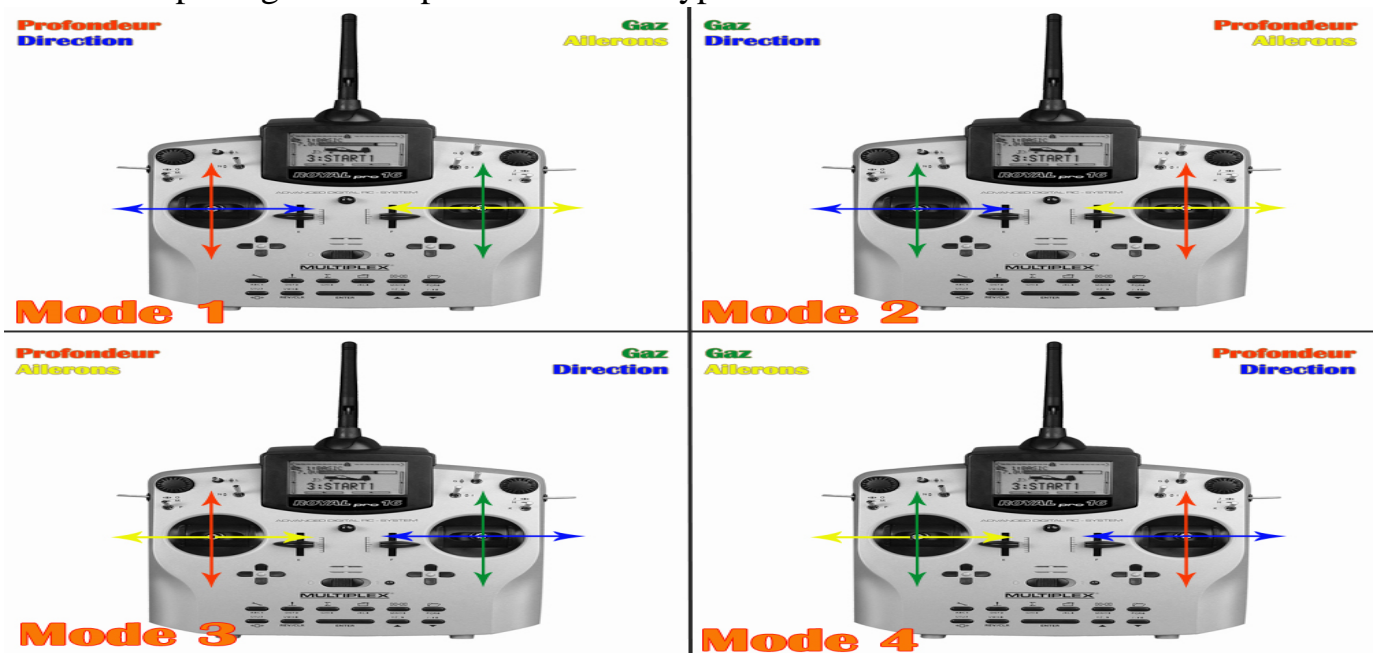


Figure 1.4 : Les quatre modes de pilotage de la radiocommande programmable

Après le mode de pilotage, il faut choisir sur l'émetteur quel type de modèle on veut faire évoluer ; avion, planeur, hélicoptère... après ces premières informations, il faut également souvent préciser le type d'aile du modèle ; nombre de servos pour les ailerons, pour les volets, le type d'empennage du modèle ; normal, papillon (en v), un ou deux servos pour de profondeur, modèle Delta, aile volante... en fonction des besoins de l'utilisateur.

### **3. Histoire des radiocommandes :**

En 1894, le premier exemple de contrôle sans fil à distance fut lors d'une démonstration du physicien britannique Oliver Lodge, dans laquelle il utilisa un cohérent de Branly pour faire déplacer un faisceau de lumière par un galvanomètre à miroir lorsqu'une onde électromagnétique était générée artificiellement. Guglielmo Marconi et William Preece l'affinèrent encore lors d'une manifestation qui eut lieu le 12 décembre 1896 au Toynbee Hall de Londres, où ils firent sonner une cloche en enfonçant un bouton dans une boîte qui n'était connectée à aucun fil.

En 1898, lors d'une exposition au Madison Square Garden, Nikola Tesla a fait la démonstration d'un petit bateau sans pilote qui utilisait une radiocommande cohérente. Avec un peu de mise en scène, Tesla a amusé le public pour faire croire que le bateau pouvait apparemment obéir aux ordres du public mais il était en fait contrôlé par Tesla interprétant les demandes verbales et envoyant des fréquences appropriées aux circuits accordés dans le bateau. Tesla a obtenu un brevet américain sur cette invention le 1er juillet 1898.

En 1903, l'ingénieur espagnol Leonardo Torres y Quevedo présenta le "Telekino" à l'Académie des Sciences de Paris et obtint un brevet en France, en Espagne, en Grande-Bretagne et aux Etats-Unis.

En 1904, Bat, un lancement de vapeur de Windermere, a été contrôlé en utilisant la radiocommande expérimentale par son inventeur, Jack Kitchen.

Pendant la Première Guerre mondiale, l'inventeur américain John Hays Hammond développa de nombreuses techniques de contrôle radio ultérieures, notamment le développement de torpilles télécommandées, de navires, de systèmes antibrouillage et même d'un système permettant à son vaisseau télécommandé de cibler un navire ennemi. En 1922, il installa des équipements de radiocommande sur le USS Iowa, un navire de guerre américain obsolète, afin de pouvoir l'utiliser comme navire-cible.

L'Armée rouge soviétique utilisa des téléportassions téléguidées pendant les années 1930 pendant la Guerre d'Hiver contre la Finlande et mit en service au moins deux bataillons de Teletank au début de la Grande Guerre patriotique. Un teletank est contrôlé par radio à partir d'un réservoir de contrôle à une distance de 500-1 500 m, les deux constituant un groupe télémécanique. Il y avait aussi des couteaux télécommandés et des avions expérimentaux télécommandés dans l'Armée Rouge. Dans les années 1930, le Royaume-Uni a mis au point le Queen Bee, un aéronef télé piloté télécommandé, piloté par téléguidage, pour la pratique du tir d'artillerie d'une flotte. Le Queen Bee a été remplacé par Queen Wasp, un aéronef cible de haute performance

Les radios que nous utilisons actuellement font leur apparition au début des années 70; et la miniaturisation des composants électroniques a fait d'énormes progrès et fiabilité depuis cette époque ; ce qui a permet de réaliser des contrôle de radio qui transmis des modulations de fréquences

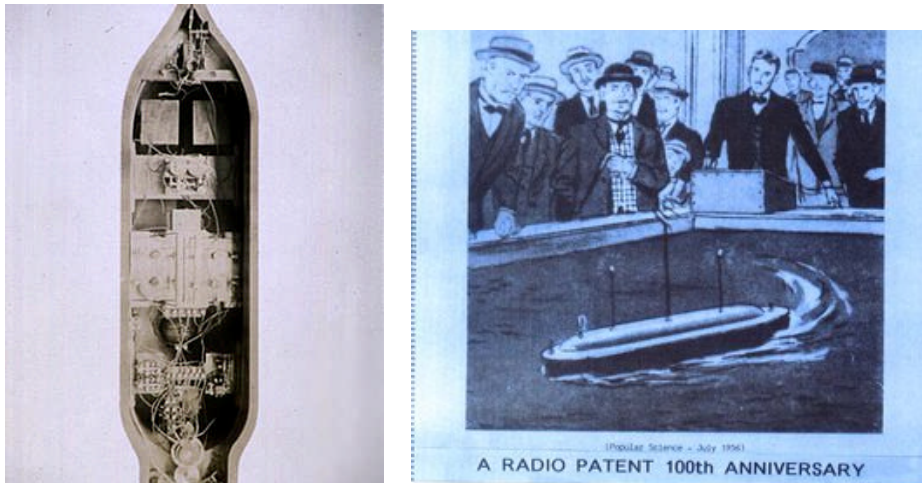


Figure 1.5 : Bateau radiocommandé de Nikola Tesla

#### **4. Les avions radiocommandé :**

Les avions radiocommandés (RC) ou modélisme aérien ou aéromodélisme sont des modèles réduits pilotés à l'aide d'une télécommande. Ils utilisent une communication radio entre une télécommande émettrice et un récepteur situé dans l'avion. Le récepteur contrôle les servomoteurs actionnant les gouvernes ou d'autres fonctions de l'avion en fonction des ordres de commande du pilote donnés par de la position des joysticks radiocommandés. L'utilisation d'avions radiocommandés en tant que loisir est en augmentation constante du fait de la disponibilité de pièces plus petites et de moins en

moins chères, ainsi que grâce aux avancées technologiques. Une grande variété de modèles et de styles est disponible afin de satisfaire à toutes les envies et à tous les budgets. Du fait de la disponibilité et des avancées en accumulateurs électriques et moteurs électriques, un nombre grandissant d'utilisateurs utilisent des avions électriques plutôt que thermiques (fonctionnant le plus souvent au mélange méthanol/huile ou à l'essence). Les avions électriques sont en effet plus faciles à construire, comparant l'avion thermique.



Figure 1.6 : Avion radiocommandé à moteur électrique

#### 4.1. Histoire :

Les premiers exemples de modèles réduits RC sont des ballons dirigeables gonflés à l'hydrogène au XIXe siècle. Ils volaient dans des music-hall (grande salle de spectacle où se produisent des artistes de variétés) pendant l'entracte pour distraire le public, ils étaient guidés par un signal radio rustique généré par un arc électrique ou arc de poulsen selon le nom de son inventeur Valdemar Poulsen (RC à arc électrique est utilisé pour convertir du courant continu en énergie radioélectrique).

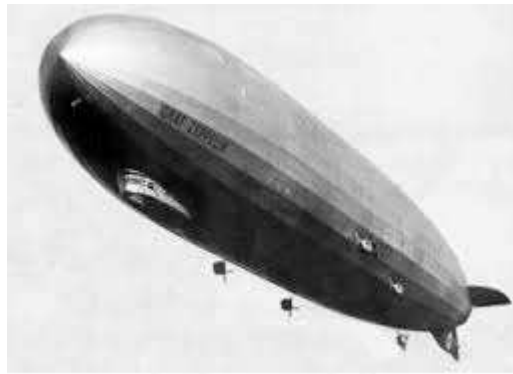


Figure 1.7 : Ballons dirigeable gonflés RC

Dans les années 1920, le Royal Aircraft Establishment d'Angleterre construisit et testé le Larynx, un monoplan RC disposant d'un rayon d'action de 160 km (selon les performances ; la vitesse, la charge utile et l'endurance) muni d'un moteur Lynx.



Figure 1.8 : Moteur Lynx

Puis dans les années 1930, les Britanniques développèrent le QueenBee ( la reine des abeilles) un de Havilland Tiger Moth modifié ( au lieu d'un fuselage en métal recouvert d'un tissu Tiger Moth, il a utilisé un fuselage en bois ), et un avion cible similaire ( a été conçu comme un avion cible RC à faible coût ) .



Figure 1.9 : Avion Queen Bee de Havilland Tiger Moth

#### 4.2. Types des avions RC :

Il existe de nombreux types d'avions radiocommandés, des Park Flyers et des avions d'entraînement, pour les débutants ; des avions à bougie, moteur électrique ou des planeurs pour les pilotes plus avancés.



Figure 1.10 : avion RC Park Flyers

Pour les experts, on trouve des jets, des hélicoptères, ou autres types d'avions de compétition.



Figure 1.11 : hélicoptère RC

Il est également possible de construire des modèles à l'échelle d'avions réels.



Figure 1.12 : modèle d'avion RC

Certains appareils peuvent également ressembler à des oiseaux et voler comme tels.



Figure 1.13 : Oiseaux RC

### 4.3. Types de kits et construction :

Il existe différentes manières de construire ou d'assembler un avion RC. Nombre de kits sont disponibles dans le commerce, plus ou moins coûteux et requérant plus ou moins de talent ou d'expérience de la part de leur constructeur.

Certains kits sont principalement composés de mousse et de plastique ou de balsa. La construction consiste en l'utilisation de coques pour le fuselage, et de nervures et de raidisseurs pour la voilure.



Figure 1.14 : Plaques de balsa

Les modèles les plus robustes ont leurs structures constituées de bois ou peuvent également comporter des ailes composites en polystyrène expansé recouvert d'un plaquage de bois. Ces modèles sont généralement plus lourds que ceux de construction traditionnelle et conviennent donc mieux à des avions motorisés qu'à des planeurs.



Figure 1.15 : Plaques en polystyrènes

Les constructions les plus légères sont généralement réservées au vol en salle dans un environnement sans vent. Certains d'entre eux sont faits de fines structures de balsa et de fibres de carbone recouvertes d'un très fin fils synthétique. L'appareil constitués de mousse légère et parfois renforcés de fibre de carbone ont rendu le vol plus accessible aux amateurs. Les modèles « Crash proof » en mousse EPP (Polypropylène expansé)

sont si souples qu'ils ne subissent peu ou pas de dommages lors d'un accident, même en cas de crash sur le nez de l'appareil.

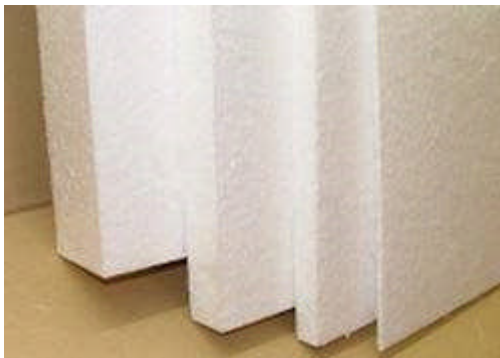


Figure 1.16 : Plaques en EPP et des fils en fibres de carbone

#### 4.4. Fonctionnalités des différentes parties d'un avion radiocommandé :



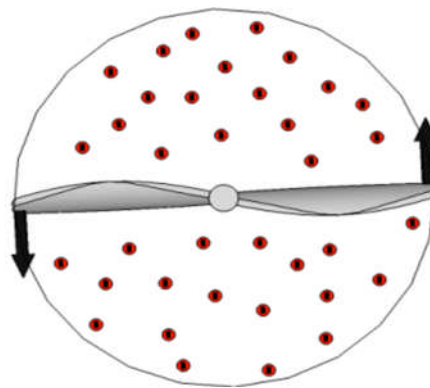
Figure I.1. Avion RC avec ses différentes parties

Afin de faire voler un avion et de le diriger dans ces trois axes, le pilote doit impérativement avoir le contrôle de ses gouvernes et de ses moyens de propulsion. Les gouvernes sont les ailerons, la profondeur et la dérive. Les moyens de propulsion sont les moteurs et les hélices.

#### 4.4.1. L'hélice :

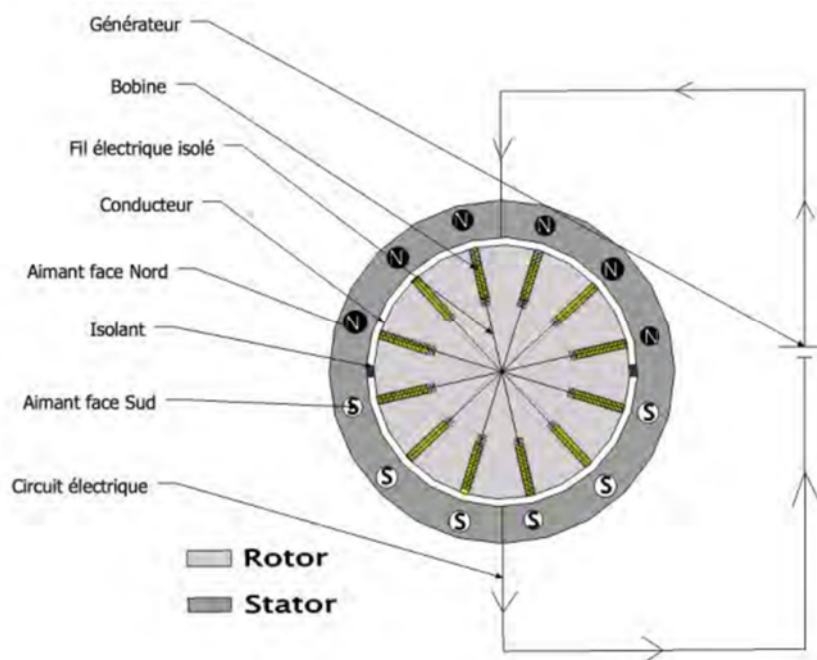
Le principe de l'hélice est similaire à celui de l'aile. En effet la forme y ressemble beaucoup. Il est avantageux d'avoir une hélice profilée car l'air est plus accéléré et engendre une dépression plus grande. La force de traction, par conséquent, plus importante.

En effet, ce n'est pas un flux d'air venant d'en face qui crée cette dépression. C'est l'hélice qui, en tournant grâce au moteur, ce qui crée son vent relatif et accélère l'air. Comme l'hélice tourne très vite, la dépression est appliquée sur tout le rayon de l'hélice. On obtient une force de traction qui permettra à l'avion d'accélérer et d'atteindre sa vitesse de décollage.



**Figure I.2.** Représentation de la dépression fait par une hélice qui tourne

#### 4.4.2. Le moteur :



**Figure I.3.** Principe du moteur électrique d'un avion RC

Le principe d'un moteur électrique d'avion RC est illustré à la figure I.3. il est alimenté par un courant continu fourni par un générateur ou une batterie. Le moteur est composé de deux parties principales ; le stator qui est uniquement équipé d'aimants et le rotor qui est équipé de fer doux enroulé d'une bobine.

Le principe du moteur électrique est qu'un courant va passer tout d'abord dans un conducteur, pour ensuite traverser les bobines. Les bobines sont divisées en deux parties. Donc le conducteur alimente seulement la partie supérieure des bobines. Le courant, en traversant les bobines crée un champ magnétique et crée un électroaimant. Nous avons donc une partie Nord et une partie Sud de la bobine. Comme la partie Nord de la bobine est attirée par la partie Sud des aimants et inversement le rotor doit tourner ainsi pour satisfaire à cette demande. Lorsque ceci est presque accompli, c'est l'autre partie du conducteur qui est alimentée. Donc les pôles des bobines s'inversent et la rotation continue ; il n'y a jamais d'arrêt.



**Figure I.4.** Montre ce qu'il se passe schématiquement lorsqu'il y a ce changement de pôles.

Le principe de fonctionnement est plus facile à comprendre lorsqu'il n'y a qu'une seule bobine. Avoir plusieurs bobines augmente la puissance du moteur et c'est ce que nous recherchons en aviation. Le fait d'avoir plusieurs bobines a comme conséquences qu'il y en a toujours une qui se précède son aimant. Donc le rotor tourne plus vite.

#### 4.4.3. Les ailerons :

Sont des gouvernes permettant de faire basculer l'avion autour de son axe, qui est parallèle au fuselage. Le principe est d'augmenter la portance sur une aile et de

diminuer la portance sur l'autre ail. Par cet acte, l'avion basculera d'un côté. Les gouvernes agissent toujours en sens opposé ; lorsqu'une monte, l'autre descend.



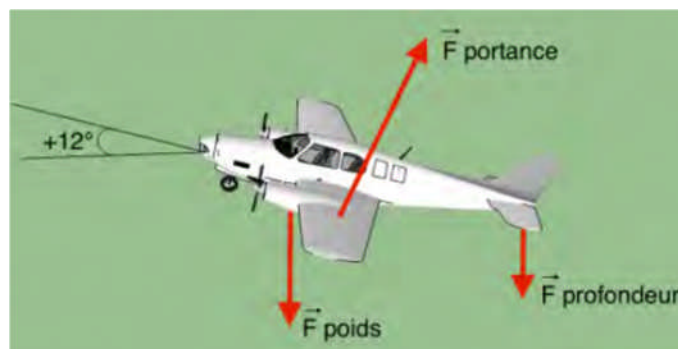
**Figure I.5.** Conséquences des ailerons sur la force de portance

Dans la figure I.5. en plus de la portance, une nouvelle dépression se forme sur le bord de fuite de l'aile. Elle engendre une force aérodynamique vers le bas de l'aile gauche. Ceci fait pencher l'aile vers le bas. Sur l'aile droite, l'aileron va créer une force vers le haut ce qui augmente la portance. De ce côté l'aile va monter. Grâce aux deux ailerons, l'avion peut pencher facilement autour de son axe longitudinal en actionnant les gouvernes en sens opposé.

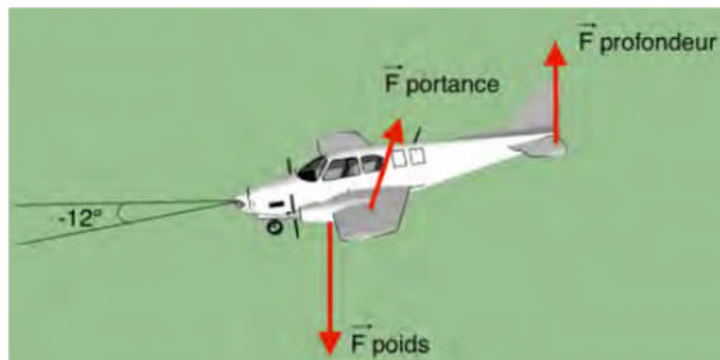
#### 4.4.4. La profondeur :

La profondeur fonctionne avec le même principe que les ailerons. Une dépression se forme et crée une force de même direction et sens que celle où nous voulons faire basculer l'avion de son axe. La profondeur fait basculer l'avion autour d'un axe parallèle aux ailes.

En pratique on utilise la profondeur pour faire monter et descendre l'avion. En faisant basculer l'avion, on varie le flux d'air qui traverse les ailes et on peut ainsi varier la force de portance.



**Figure I.6.** Profondeur avec un angle d'attaque positif



**Figure I.7.** Profondeur avec un angle d'attaque négatif

#### 4.4.5. La dérive

La dérive comme les ailerons et la profondeur, fonctionne selon le principe qui consiste à créer une dépression pour que l'avion tourne autour de son axe. La dérive fait tourner l'avion autour de son axe perpendiculaire au plan formé par les ailes et le fuselage.



**Figure I.8.** Exemple de la dérive d'un avion RC

## 5.Composition des radiocommandes :

### 5.1. Composition de l'émetteur et le récepteur :

Un émetteur, équipé d'un module haute fréquence, d'une antenne et d'un quartz (de 2,4 GHz). Un ou plusieurs récepteurs en fonction de la taille du modèle et des impératifs de sécurité, équipés d'un quartz ou d'un récepteur 2,4 GHz sur la même fréquence que l'émetteur, et d'une antenne de réception. D'une batterie de réception.

De servomoteurs qui transmettent mécaniquement aux gouvernes mobiles les ordres reçus par le récepteur. Dans le cas d'une propulsion électrique, d'un variateur/contrôleur, qui permet de varier la puissance du moteur et d'alimenter le récepteur via la batterie de propulsion.

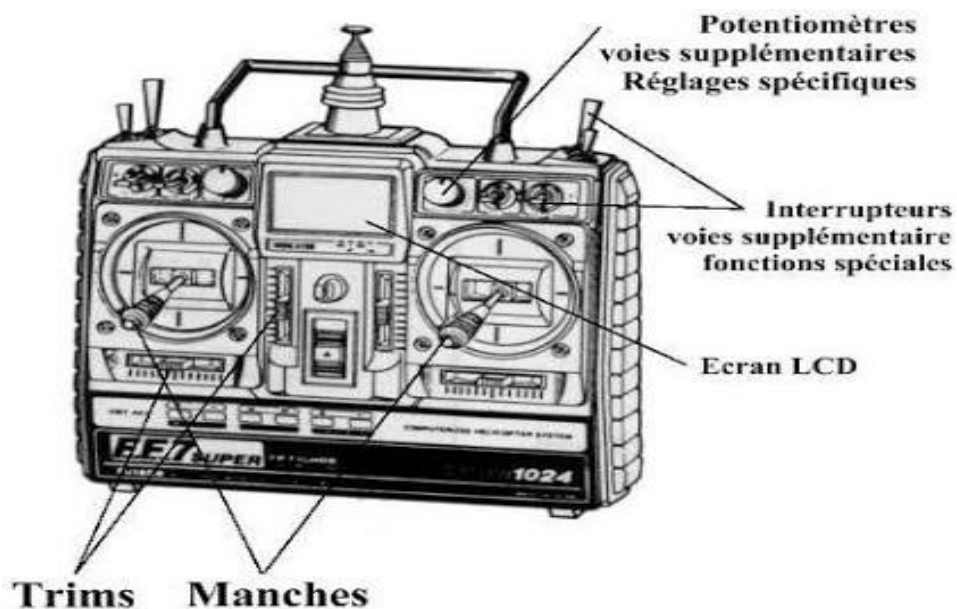


Figure 1.24 : Radiocommande émetteur RF 2.4Ghz

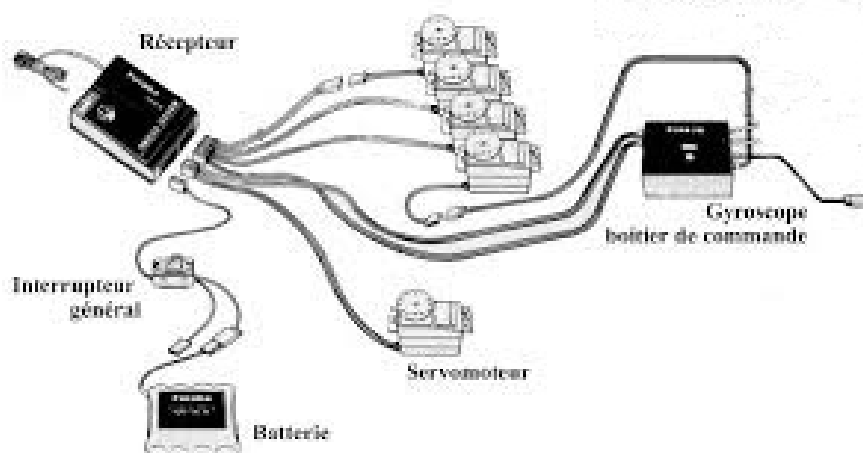


Figure 3.5 : Récepteur 1.25Ghz alimenté et câblé avec des servomoteurs et un Gyroscopie

## 5.2. La fréquence de travail :

La plupart des ensembles de radiocommande utilisés pour notre loisir fonctionnent désormais sur la bande des 2,4Ghz. Cette bande de fréquences offre beaucoup d'avantages par rapport aux autres bandes comme le 26, le 35, le 41, ou le 72Mhz. Parmi les principaux, on peut citer la possibilité d'un très grand nombre d'utilisateurs simultanés sans avoir besoin de gérer les fréquences et la télémétrie qui permet désormais de savoir ce qui se passe dans le modèle en temps réel grâce à des capteurs.

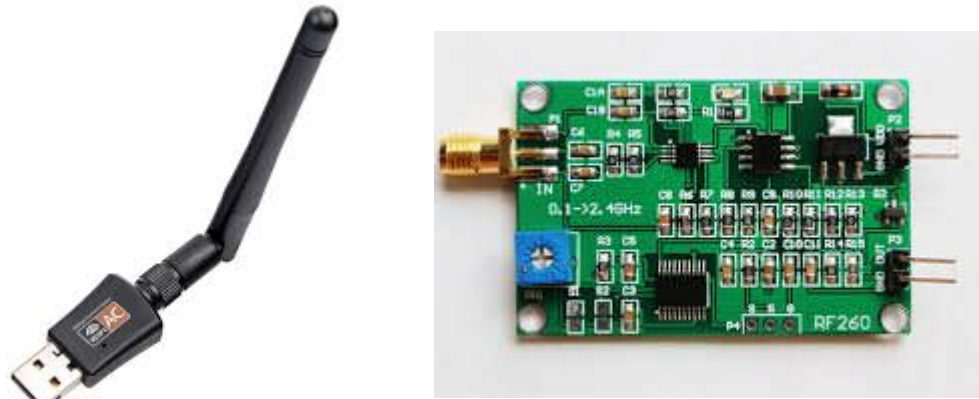


Figure 1.26 : Radio fréquence 2.4Ghz

## 5.3. La modulation :

Les radios émettent un signal en FM selon deux types de modulation. Le mode PPM (Pulse Position Modulation), meilleur marché que le mode PCM (Pulse Code Modulation), est généralement utilisé sur les appareils RC d'entrée de base gamme. La moindre fiabilité du mode PPM le rend plus adapté aux petits modèles qui sont moins dangereux que des appareils plus lourds. Les radios haut de gamme offrent les deux modes (PCM et PPM) afin d'offrir une compatibilité avec la majorité des récepteurs.

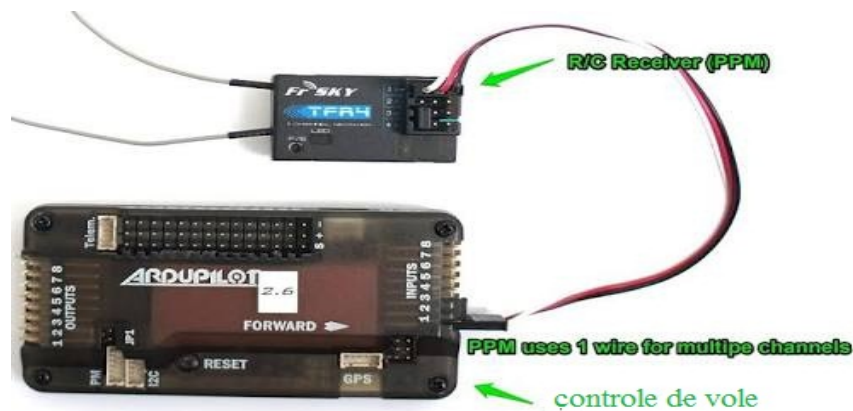


Figure 1.27 : Récepteur RC PPM avec contrôle de vole



Figure 1.28 : Récepteur RC PCM de type Futaba

### 5.3.1. Pulse Position Modulation PPM :

Le Pulse Position Modulation (PPM) est une modulation de type FSK (Frequency Shift Keying) dans laquelle la position de chacun des servomoteurs est codée par une impulsion de largeur variable. Chaque trame, d'une longueur fixe, débute par une impulsion de synchronisation. L'avantage de cette transmission est la simplicité de l'électronique nécessaire, ce qui a fait son succès aux débuts du radio modélisme. Son inconvénient principal est l'absence de détection d'erreur.

### 5.3.2. Pulse Code Modulation PCM :

Le Pulse Code Modulation (PCM) est un mode de modulation en fréquence de type FSK (Frequency Shift Keying) dans lequel la commande de chaque servomoteur est transmise sous forme d'un nombre codé.

Les fabricants ont chacun leur propre système de codage de ce nombre sur une série variable de bits. JR utilise le mode Z-PCM (10 bits, 512 valeurs) et le S-PCM (11 bits, 1 024 valeurs). Futaba utilise le PCM-1024 et le G3 PCM (12 bits, 2 048 valeurs).

L'avantage du codage PCM est de détecter les erreurs de transmission, ce qui permet de mettre les servomoteurs dans une position prédéfinie ou de les maintenir dans la dernière position correcte après la perte du signal : ce mode se nomme « Fail Safe », et s'avère intéressant du point de vue de la sécurité, notamment dans les hélicoptères (coupure des gaz en cas de perte de contrôle de l'appareil).

## 6.FONCTIONNEMENT ET MONTAGE D'UNE RADIO-COMMANDE

L'émetteur envoie ses ordres (position des manches) au récepteur par ondes radios « haute fréquence ». Celui-ci les transmet alors à des actionneurs : servos, variateur de vitesse pour moteur électrique.

### 6.1. L'émetteur de base :

L'émetteur se présente sous la forme d'un pupitre équipé de manches qui actionnent des potentiomètres (résistances à curseur).

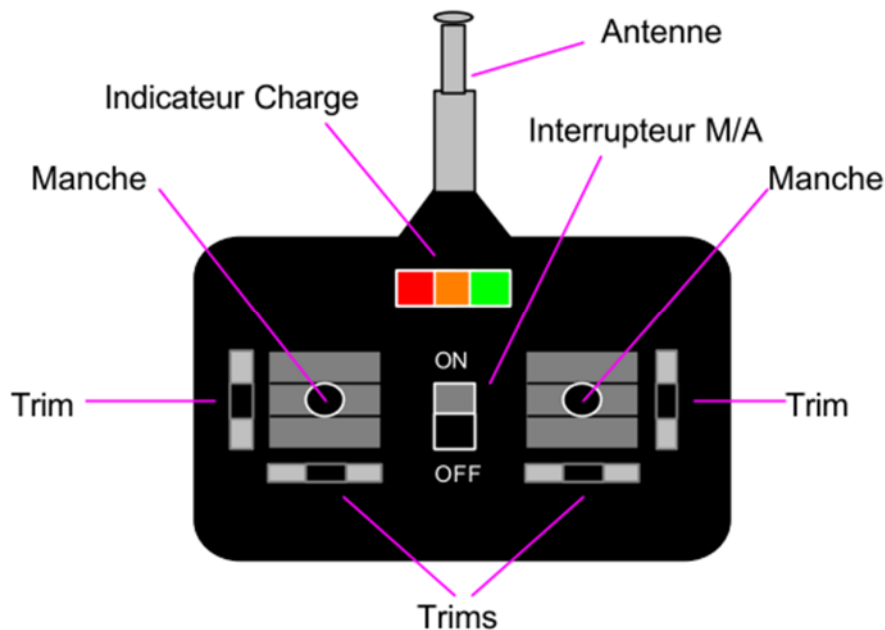


Figure 1.29 : Un émetteur à 4 voies proportionnelles

### 6.2. Le récepteur :

Le récepteur se présente sous la forme d'un petit boîtier de la taille d'une boîte d'allumettes. Il y sort une antenne filaire. Un petit groupe de connecteurs permet d'y raccorder le pack d'accus (ou les piles) de réception, les servos, variateurs.

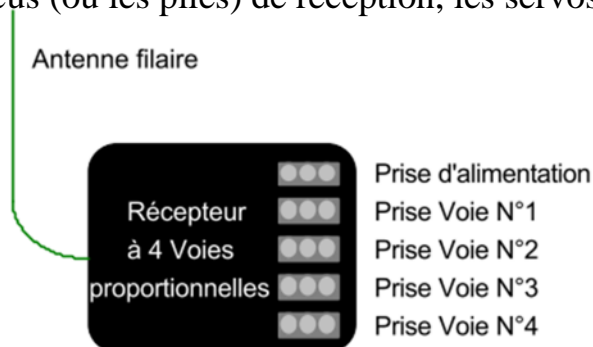


Figure 1.30 : Récepteur à 4 voies proportionnelles

### 6.3. Un montage complet utilisant 2 voies du récepteur :

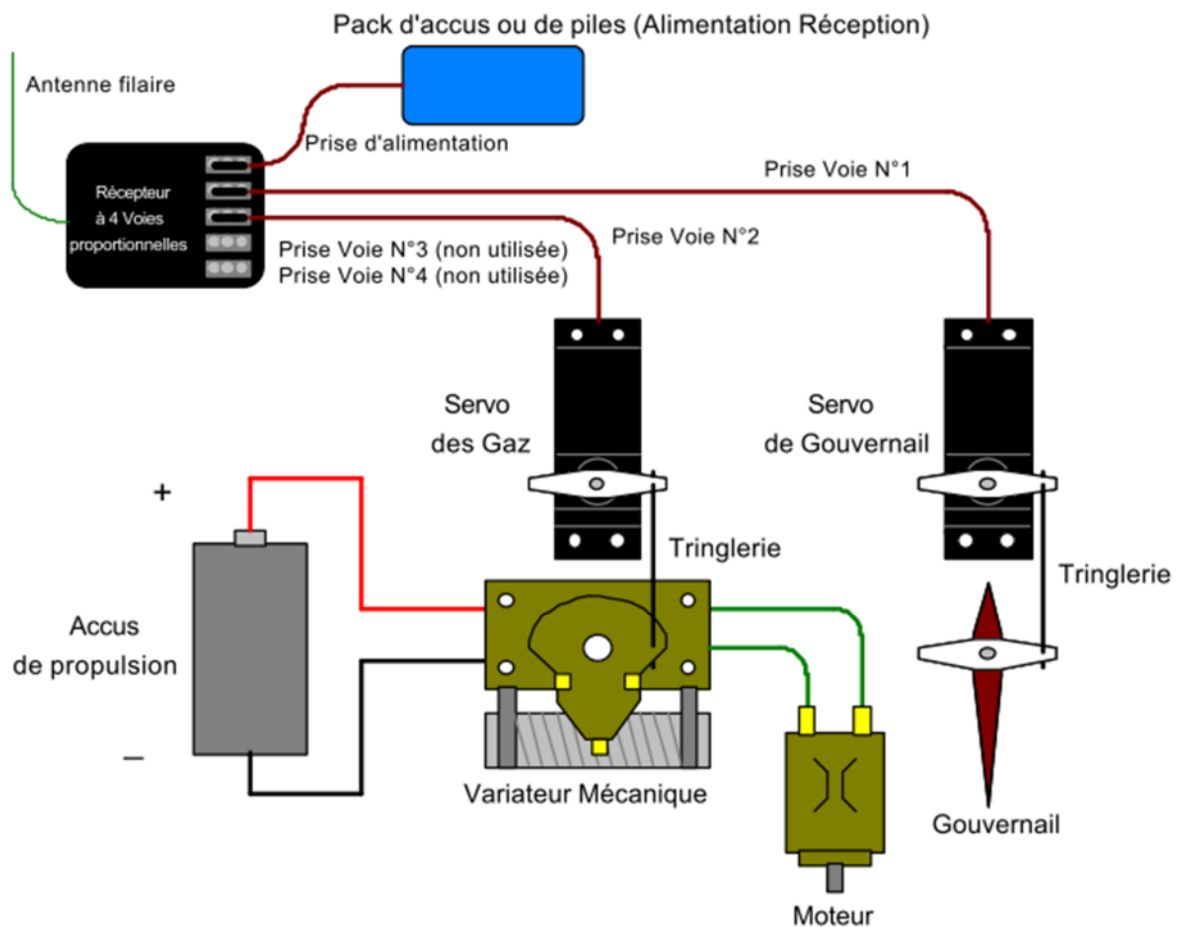


Figure 1.31 : montage complet du récepteur

L'émetteur il reçoit les ordres des deux manches et les transforme en un signal électrique qui module une onde radio.

Le récepteur il transforme l'onde radio de l'émetteur en autant des signaux de commande puis à leur tour il commande l'ensemble moteur et servomoteurs celui-ci permettra de transmettre un mouvement à un palonnier de gouvernail ou de variateur mécanique, par exemple.

L'accumulateur de réception il fournit l'énergie à la partie embarquée.

Les servomoteurs il reçoit un ordre de position du récepteur et le traduit en angle sur leur palonnier ou variateurs mécanique.

**7. CONCLUSION :**

Dans ce chapitre nous avons présenté les généralités sur les radiocommandes et ces applications. Nous avons décrit les différents types des radiocommandes et son mode de pilotage ainsi que leur fréquence de travail, tout en citons leur utilisation dans le domaine des avions réduits pilotés. Dans le chapitre prochain nous présenterons les principes de vol des avions et les différentes forces qui agissent sur elle, puis nous développerons les équations mathématiques qui régissent ce système.

## Introduction :

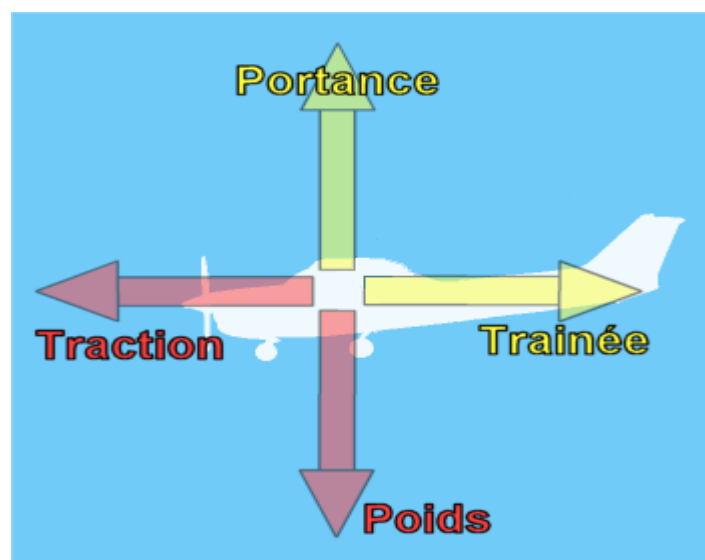
Ce chapitre est consacré à la modélisation dynamique d'un avion à voilure fixe et à la description de système, sa structure générale et son principe de vol ainsi les différents forces et moments aérodynamique exécuter sur l'avion.

### 1.Principe de vol d'un avion à voilure fixe :

La conception d'un contrôleur de vol efficace pour un avion commence par une bonne compréhension des principes de la théorie de vol. Un manque de connaissances sur l'aérodynamique peut provoquer des commandes d'entrée inappropriées lorsque l'avion fonctionne à la limite de ses performances. Pour cette raison, l'objectif de cette section est de fournir un aperçu de base de la mécanique du vol.

#### **1.1.Les forces de vol :**

Les principes fondamentaux de l'aérodynamique impliquent l'interaction entre un objet solide et l'air qui circule autour de corps de cet objet en maintenant le contact en tous points. Compte tenu du cas d'un avion en vol, les variations de pression le long de ses composants, causées par le contact physique avec l'air, génèrent une force aérodynamique qui agit à travers le centre de pression. Cette force peut être résolue en une composante normale à la direction de l'écoulement de l'air qui s'appelle portance « lift », et une composante le long de la direction de l'écoulement de l'air qui s'appelle trainée « drag ».



**Figure II .1.** Les forces qui agissent sur un avion dans un référentiel terrestre considéré Galiléen

La traînée s'exprime de la façon suivante :  $F_x = \frac{1}{2} C_x \rho S v^2$  où  $C_x$  correspond au coefficient de traînée,  $\rho$  la masse volumique du fluide dans lequel se trouve l'avion (l'air),  $S$  sa surface exposée au frottement et  $v$  sa vitesse.

La portance, quant à elle, peut être calculée via la formule :  $F_z = \frac{1}{2} C_z \rho S v^2$  où  $S$  est la surface des ailes et  $C_z$  le coefficient de portance de l'aile.

### 1.2. Les différentes parties constituant un avion à voilure fixe :

Les avions peuvent avoir plusieurs configurations et tailles, mais tous fonctionnent selon le même principe, à savoir manipuler les forces de vol. Par conséquent, tout véhicule capable de fournir ces forces de vol est considéré comme un avion, quelle que soit sa forme. Un avion comprend un système de propulsion et de nombreuses formes aérodynamiques qui peuvent être fixes ou flexibles.

Le système de propulsion où le moteur est utilisé pour alimenter le véhicule. Les formes aérodynamiques fixes fournissent la force de portance et la stabilité de l'avion et elles sont représentées par ; le fuselage, ailes et stabilisateurs de queue. En ce qui concerne les formes aérodynamiques flexibles, elles sont communément appelées surfaces de contrôle et elles sont divisées en gouverne de profondeur, ailerons et gouverne de direction.

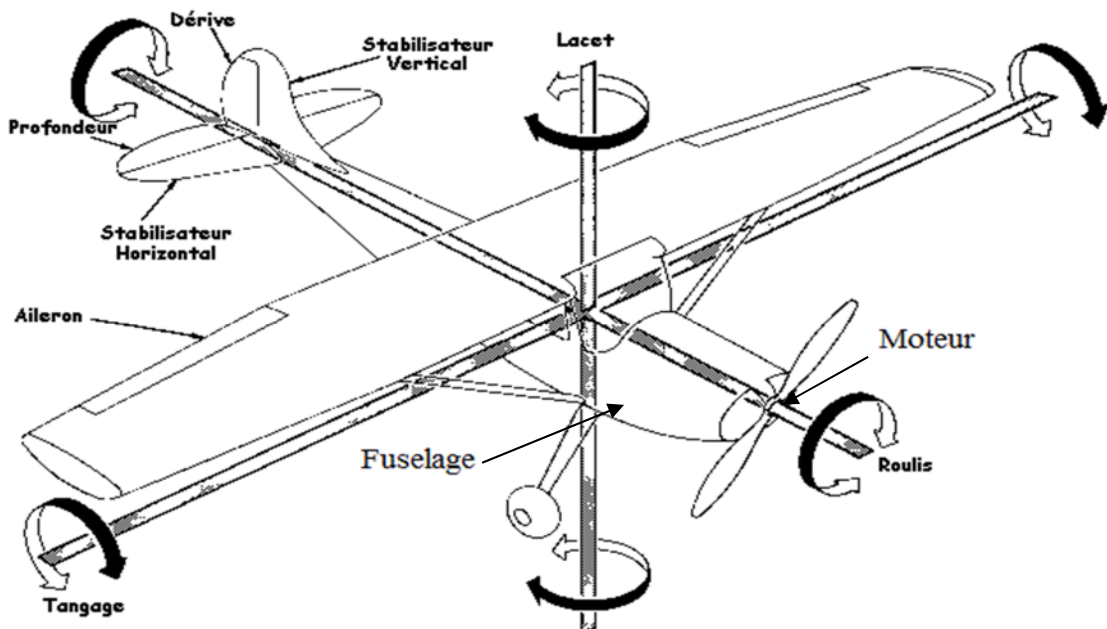


Figure II.2. Les composants d'un avion à voilure fixe

#### Les composants fixes d'un avion :

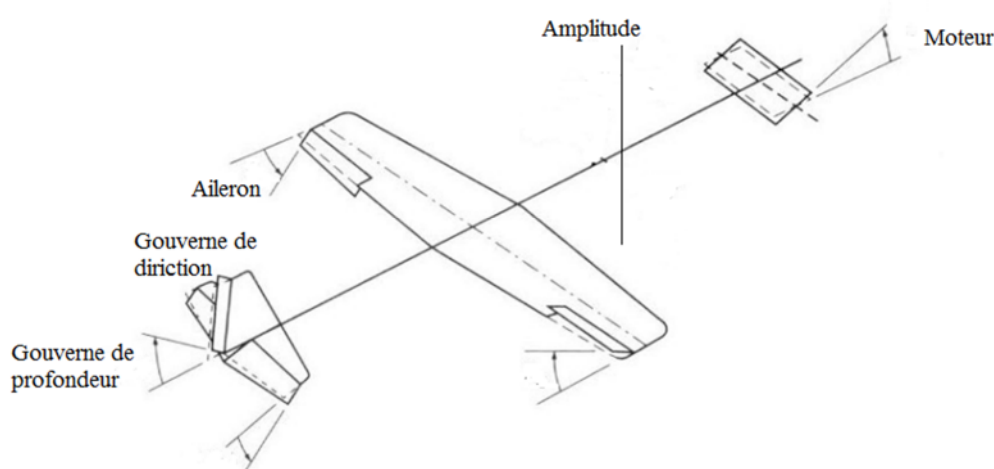
- Le système de propulsion : est le composant qui génère la force de poussée nécessaire pour déplacer l'avion vers l'avant. L'hélice et les moteurs à réaction

produisent une poussée en jetant l'air vers l'arrière. En manipulant la puissance du moteur, nous pouvons contrôler l'amplitude de la force résultante tandis que sa direction est fixée le long de l'axe longitudinal de l'avion.

- Le fuselage : est le composant d'avion qui relie toutes les pièces. Il a une forme aérodynamique afin de réduire la force de traînée qui en résulte. D'où le nom fuselage est issu du verbe fuseler qui signifie rendre étroit.
- Les ailes : produisent la quantité de portance la plus importante qui est la force qui rend possible le vol des véhicules plus lourds que l'air.
- Le stabilisateur horizontal : est une petite aile horizontale située à la queue de l'avion utilisé pour éviter tout mouvement indésirable.
- Stabilisateur vertical : est une petite aile vertical située à la queue de l'avion utilisée pour éviter les mouvements latéraux.

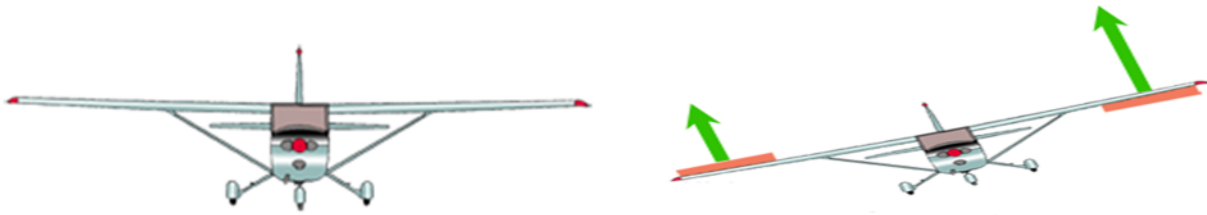
### 1.3. Les surfaces de contrôle et les mouvements qu'ils produisent :

Afin de contrôler les robots aériens à 6 DDL (Degrés De Libertés) il est possible d'agir sur quatre commandes différentes ; les ailerons, l'altitude, les gouvernails (direction et profondeur) et la manette des gaz du moteur.



**Figure II.3.** Les surface de contrôle d'un avion

- Les ailerons : sont des sections flexibles placées hors-bord vers les extrémités d'ailes qui fonctionnent habituellement en opposition ; une est déviée vers le haut et l'autre vers le bas ils fonctionnent de la même manière que la gouverne de profondeur. Comme ils sont déviés, les ailerons varient, ce qui entraîne une élévation accrue sur une aile et une élévation réduite de l'autre. Le mouvement résultant de l'avion est une rotation autour de son axe longitudinal connu sous le nom de **roulis**



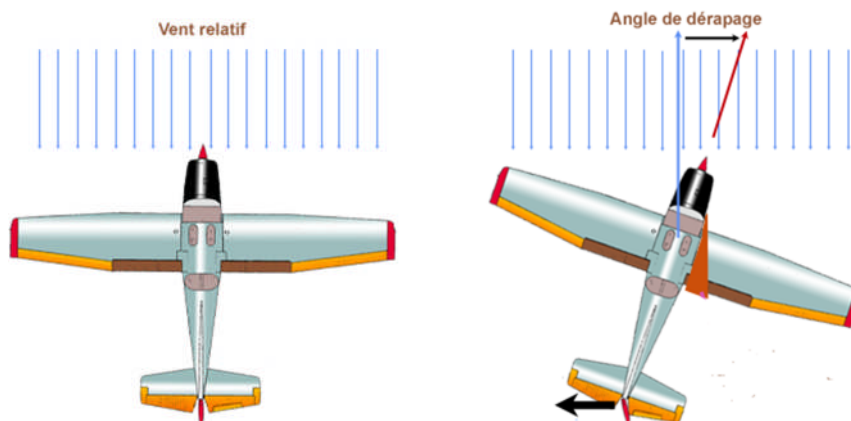
**Figure II.4.** Mouvement selon l'axe de roulis

- Gouverne de profondeur : sont des dispositifs mobiles, qui permettent de produire ou de contrôler les mouvements verticaux de l'avion. Lorsque la gouverne de profondeur est déviée vers le bas, l'aile de la queue horizontale produit une force d'élévation accrue qui augmente la pression sur la queue de l'avion par rapport au nez et par conséquent l'avion descend. Une déviation vers le haut de l'empennage de profondeur crée un effet opposé, ce qui fait que l'avion monte. Par conséquent, l'empennage de profondeur contrôle le mouvement de l'avion autour de l'axe de direction qui est connu sous le nom de **mouvement de tangage**.



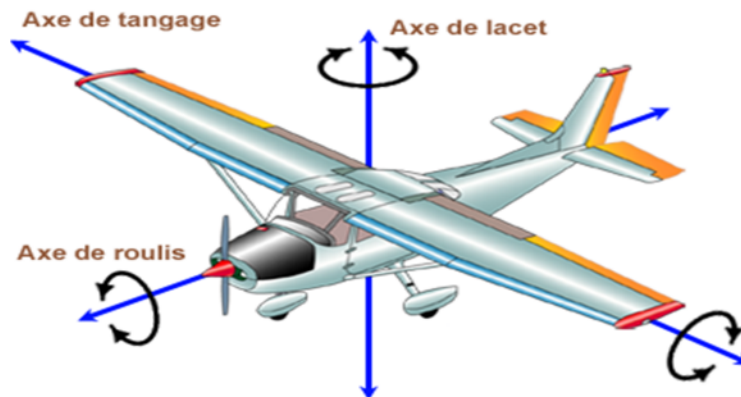
**Figure II.5.** Mouvement selon l'axe de tangage

- Gouverne de direction : est une partie flexible placée à l'arrière du stabilisateur vertical qui fait que l'avion se déplace d'un côté à l'autre. En déviant le gouvernail, on peut manipuler la quantité de force produite par l'aile vertical et par conséquent, l'avion fait un mouvement autour de l'axe vertical connu sous le nom de **lacet**.



**Figure II.6.** Mouvement selon l'axe lacet

Contrairement au mouvement de tangage, les mouvements de roulis et de lacet ne sont pas purs, c'est-à-dire le gouvernail et les déviations d'ailerons excitent à la fois les mouvements de lacet et roulis. Lorsque l'avion fait un mouvement de roulis, l'aile abaissée a plus de traînée que l'aile ascendante et cela entraîne un mouvement de lacet défavorable. Par conséquent, le gouvernail est principalement utilisé pour maintenir le nez de l'avion dans la direction du vol, afin d'obtenir un vol coordonné.



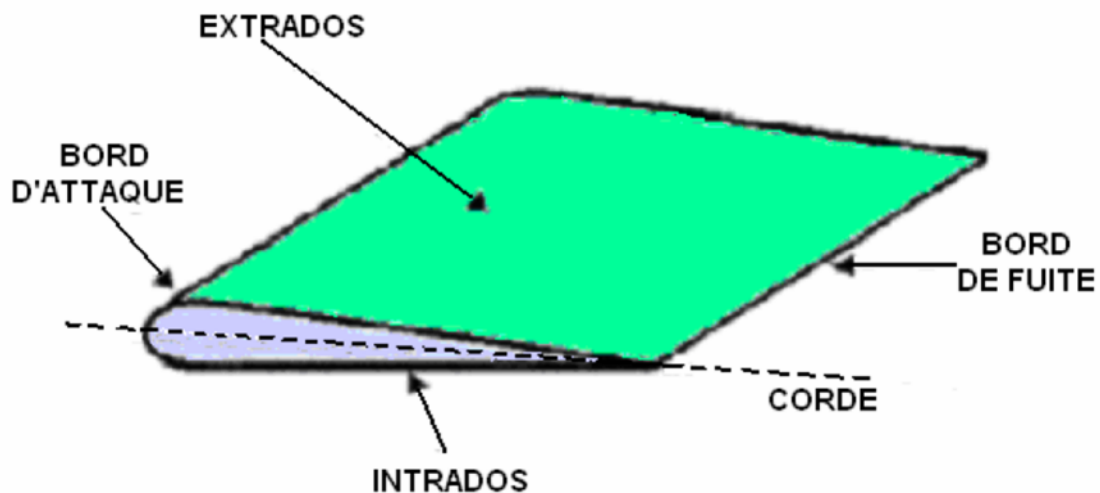
**Figure II.7.** Les mouvements de l'avion selon les axes tangage, roulis et lacet

#### 1.4. Les Ailes et quelques notions d'aérodynamique :

Ce sont les parties sustentatrices de l'appareil qui génèrent la portance. Leur forme est issue d'une base de profils aérodynamiques étudiés en soufflerie.

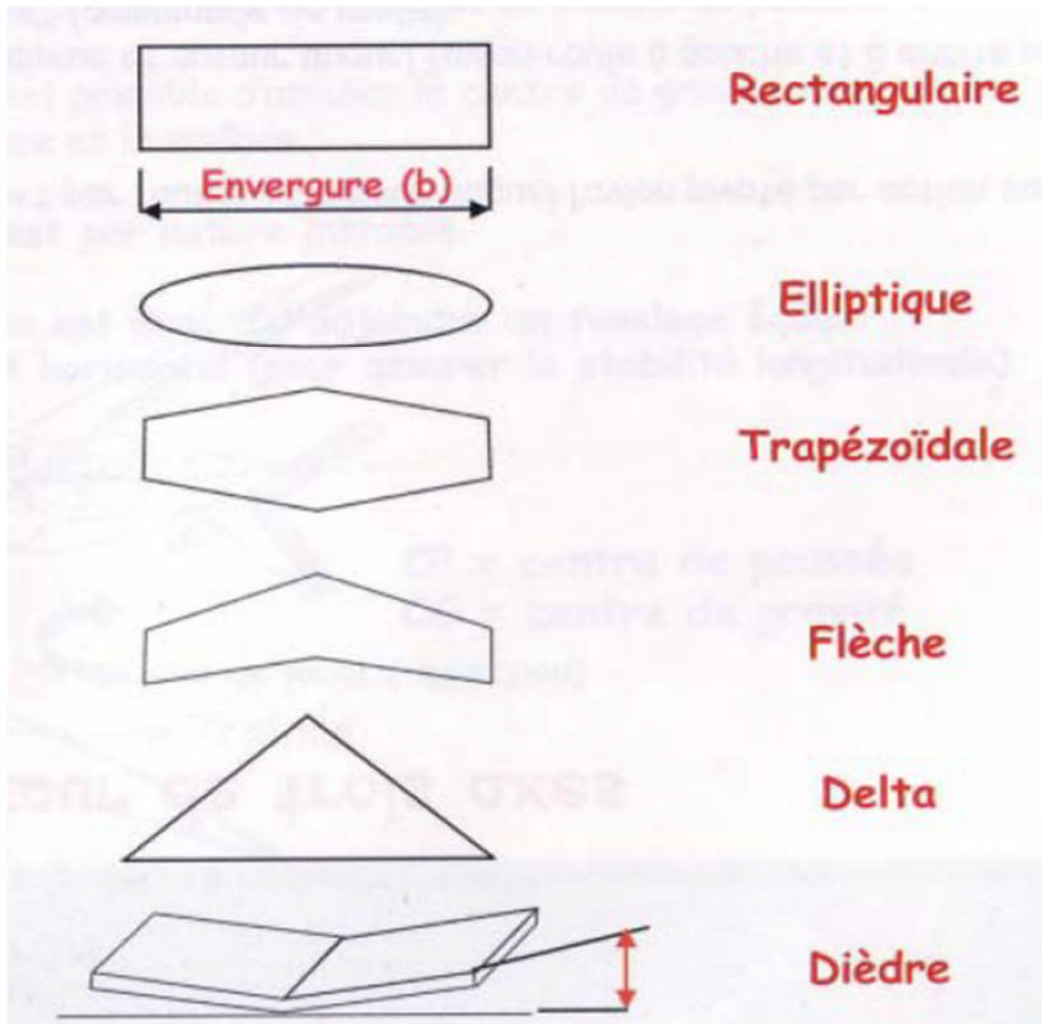
- **Les différentes parties de l'aile sont :**

- l'avant dit bord d'attaque
- l'arrière dit bord de fuite
- le dessus dit l'extrados
- le dessous dit l'intrados
- les extrémités dites saumons ou bord marginal qui ont pour rôle d'améliorer les performances aérodynamiques.



- **Les formes de l'aile :**

Elle peut être rectangulaire, trapézoïdale, elliptique, en flèche, en delta etc. Elle est également caractérisée par son dièdre (angle que fait l'aile par rapport au plan Horizontal) qui peut être positif ou négatif, et sa flèche (angle que fait la ligne Moyenne - en général 25% de la corde - et l'axe du fuselage).



- **Autres équipements sur une aile :**

- **Les ailerons :**

Ce sont des surfaces mobiles situées sur le bord de fuite des ailes et permettent de faire varier la portance de celles-ci. En clair, lorsque les ailerons bougent, ils font descendre ou monter l'aile associée sur l'axe du roulis, permettant la mise en virage.

- **Les volets :**

Ce sont des surfaces situées sur le bord de fuite, un peu comme des ailerons, amis agissent symétriquement pour augmenter la portance. Très rare sur les maquettes de début.

## 2. Modèle dynamique d'un avion à voilure fixe :

La modélisation des robots volant est une tâche délicate puisque la dynamique du système est fortement non linéaire et très couplée. Pour réaliser cette tâche plusieurs hypothèses ont été proposées dans la littérature tel que :

- L'avion est considéré comme un corps rigide associé aux forces aérodynamique générées par les ailes
- Le centre de masse et l'origine du repère fixe du corps coïncident
- La force de trainée du fuselage est négligée
- La vitesse du vent dans le repère de la terre est mise à zéro pour que le vent relatif sur le repère du corps ne soit dû qu'à la vitesse de l'avion
- Le vent relatif induit par la rotation de l'avion est négligé

Pour évaluer le modèle mathématique du l'avion nous définissons deux repère, un repère fixe lié à la terre  $E = \{E_x, E_y, E_z\}$  et un repère mobile lié au centre de gravité du l'avion  $B = \{B_x, B_y, B_z\}$ .

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.

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

Avec :

R la matrice de rotation de l'objet mobile

$\xi = [x \ y \ z]^T$  le vecteur de position

Avec :

$x$  : position autour de  $E_x$

$y$  : position autour de  $E_y$

$z$  : position autour de  $E_z$

Pour déterminer les éléments de la matrice de rotation R, on utilise les angles d'Euler.

### 2.1. Angles d'Euler :

Au début le repère mobile coïncide avec le repère fixe, celui-ci effectue trois mouvements de rotation, une rotation autour de l'axe X avec un angle de **roulis**  $\varphi$ , une autre rotation autour de l'axe Y avec un angle de **tangage**  $\theta$ , et enfin une rotation autour de l'axe Z avec un angle de **lacet**  $\psi$ .

Nous posant que  $\left(-\frac{\pi}{8} < \varphi < \frac{\pi}{8}\right), \left(-\frac{\pi}{8} < \theta < \frac{\pi}{8}\right), (-\pi < \psi < \pi)$

Nous obtenons R comme suit :

$$R = Rot_z(\psi) \cdot Rot_y(\theta) \cdot Rot_x(\varphi) =$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} c(\psi) \cdot c(\psi) & s(\varphi) \cdot s(\theta) \cdot c(\psi) - s(\psi) \cdot c(\varphi) & c(\varphi) \cdot s(\theta) \cdot c(\psi) + s(\psi) \cdot s(\varphi) \\ s(\psi) \cdot c(\theta) & s(\varphi) \cdot s(\theta) \cdot s(\psi) + c(\psi) \cdot c(\varphi) & c(\varphi) \cdot s(\theta) \cdot s(\psi) - s(\varphi) \cdot c(\psi) \\ -s(\theta) & s(\varphi) \cdot c(\theta) & c(\varphi) \cdot c(\theta) \end{bmatrix}$$

Avec  $c = \cos$  et  $s = \sin$ .

La variation temporelle des angles  $\dot{\varphi}, \dot{\psi}, \dot{\theta}$  est une fonction discontinue. Ainsi, il est différent des taux angulaires corporels  $p, q, r$  qui sont physiquement mesurés avec des geroscopes.

Avec :

$p$  : taux angulaire autour de  $B_x$ ,  $q$  : taux angulaire autour de  $B_y$ ,  $r$  : taux angulaire autour de  $B_z$

En général, une unité de mesure inertielle ( IMU ) est utilisée pour mesurer les rotations du corps et calculer directement les angles  $\dot{\varphi}, \dot{\psi}, \dot{\theta}$ .

Nous pouvons obtenir donc :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad \text{Avec : } R_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \cos \theta \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \cos \theta \end{bmatrix}$$

## 2.2. Modélisation dynamique :

Les forces agissant sur l'avion sont principalement :

- Le poids  $m \times g$  situé au centre de gravité
- La poussée de l'hélice agissant dans la direction x
- Les forces aérodynamiques de chaque partie de l'avion, principalement l'aile et la queue

## 2.3. Forces aérodynamique :

Les différentes forces extérieures agissant sur l'avion sont les suivantes :

- La force de propulsion :

Dans un souci de précision, la résultante des forces de propulsion exprimée dans

le repère mobile est présentée :  $F_{prop} = \begin{bmatrix} F_{prop} \cos \varepsilon \\ 0 \\ -F_{prop} \sin \varepsilon \end{bmatrix}$  ou  $\varepsilon$  est un angle constant

Il traduit le fait que les forces de propulsion ne sont pas tout à fait parallèles à l'axe longitudinal de l'avion.

- Le poids :

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^2 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix}$$

Avec  $g$  représentant l'accélération de la pesanteur.

- Forces aérodynamiques exprimée dans le repère aérodynamique :

$$F_a = \frac{1}{2} \rho S V^2 \begin{bmatrix} -C_x \\ C_y \\ -C_z \end{bmatrix}$$

Où  $\rho$  est la masse volumique de l'air,  $S$  est une constante (surface de référence qui est souvent la surface de l'aile prolongée à l'intérieur du fuselage);  $C_x$ ,  $C_y$  et  $C_z$  sont des coefficients sans dimension appelés respectivement coefficients de traînée, de force latérale et de portance.

#### 2.4. Dérivation du modèle en utilisant l'approche de Lagrange-Euler :

L'approche Lagrange-Euler est basée sur le concept de l'énergie cinétique et potentielle :

$$T_i = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i}$$

$$L = T - V$$

$\dot{q}_i$  : Coordonnées généralisées  $\dot{q}_i = [x \ y \ z \ \varphi \ \theta \ \psi]^T$

$T_i$  : Force généralisé donné par des forces non conservatives

$T$  : Energie cinétique totale

$V$  : Energie potentielle totale

L'énergie cinétique due à la translation :

$$E_{ct} = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m\dot{y}^2 + \frac{1}{2}m\dot{z}^2$$

Comme nous l'avons indiqué dans l'hypothèse, nous supposons que la matrice d'inertie est diagonale et donc que les produits d'inertie sont nulles.

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

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

L'énergie cinétique due à la rotation :

$$E_{ct} = \frac{1}{2}I_{xx}w_x^2 + \frac{1}{2}I_{yy}w_y^2 + \frac{1}{2}I_{zz}w_z^2$$

Avec :

$w_x$ ,  $w_y$ ,  $w_z$  sont les vitesses de rotation qui peuvent être exprimé en fonction du roulis, tangage et lacet ( $\dot{\varphi}$ ,  $\dot{\theta}$ ,  $\dot{\psi}$ ).

$$\begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\varphi} - \dot{\psi} \sin \theta \\ \dot{\theta} \cos \varphi + \dot{\psi} \sin \varphi \cos \theta \\ -\dot{\theta} \sin \varphi + \dot{\psi} \cos \varphi \cos \theta \end{bmatrix}$$

Cela conduit à l'énergie cinétique totale :

$$E_{ct} = \frac{1}{2}(m\dot{x}^2 + m\dot{y}^2 + m\dot{z}^2 + I_{xx}w_x^2 + I_{yy}w_y^2 + I_{zz}w_z^2)$$

L'énergie potentiel est donné par :

$$V = -mgz = -mg(-\sin \theta x + \sin \varphi \cdot \cos \theta y + \cos \varphi \cdot \cos \theta z)$$

Lagrangien est :  $L = T - V$

Les équations de mouvement sont données par :

$$F_x = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} \quad F_y = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial L}{\partial y} \quad F_z = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{z}} \right) - \frac{\partial L}{\partial z}$$

$$\delta_\varphi = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi} \quad \delta_\theta = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad \delta_\psi = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\psi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \psi}$$

Avec :

$\delta_\varphi$  : Equation du roulier

$\delta_\theta$  : Équation du lacet

$\delta_\psi$  : Equation du tangage

Après calcul, nous obtenons les équations ci-dessus :

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = m\ddot{x} + mg \sin \theta$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial L}{\partial y} = m\ddot{y} + mg \sin \varphi \cdot \cos \theta$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{z}} \right) - \frac{\partial L}{\partial z} = m\ddot{z} + mg \cos \varphi \cdot \cos \theta$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi} = I_{xx} \dot{w}_x - (I_{yy} - I_{zz}) w_y w_z$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = -\sin \varphi (\dot{w}_z I_{zz} - w_x w_y (I_{xx} - I_{yy})) + \cos \varphi (\dot{w}_y I_{yy} - w_x w_z (I_{zz} - I_{xx}))$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\psi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \psi} = & -\sin \theta (\dot{w}_x I_{xx} - w_y w_z (I_{yy} - I_{zz})) + \sin \varphi \cdot \cos \theta (\dot{w}_y I_{yy} - w_x w_z (I_{zz} - I_{xx})) \\ & + \cos \varphi \cdot \cos \theta (\dot{w}_z I_{zz} - w_x w_y (I_{xx} - I_{yy})) \end{aligned}$$

Les forces et les moments proviennent de l'aérodynamique :

$$F_{tot} = F_p + \sum_{i=1}^7 F_{li} - F_{di}$$

Avec :

$F_p$  = Force de portance

$F_{li}$  = Force de traînée

$F_{di}$  = Force de dérive

$$M_{tot} = \sum_{i=1}^7 M_i + F_{li} \times r_i - F_{di} \times r_i$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} F_p = f(\dot{x}, U_1) \\ F_{li} = C_{li} \frac{\rho}{2} S v^2 \\ F_{di} = C_{di} \frac{\rho}{2} S v^2 \end{array} \right.$$

$$M_i = C_{mi} \frac{\rho}{2} S v^2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} [C_{l1} C_{d1} C_{m1}] = f(\alpha_i, U2) \\ [C_{l2} C_{d3} C_{m4}] = f(\alpha_i) \\ [C_{l5} C_{d5} C_{m5}] = f(\alpha_i, U3) \\ [C_{l6} C_{d6} C_{m6}] = f(\alpha_i, U4) \\ [C_{l7} C_{d7} C_{m7}] = f(\alpha_i, U5) \end{array} \right.$$

Avec :

$\rho$  : La densité des fluides (air)

$S$  : La surface de l'aile

$v$  : vitesse de vol par rapport au fluide

$C_l$  : Coefficient de portance

$C_d$  : Coefficient de traînée

$C_m$  : Coefficient du moment

$U_1$  à  $U_5$  : sont les entrées de commande

$U_1$  : La tension sur le moteur

$U_2, U_3, U_4, U_5$  : sont respectivement la déviation de l'aileron gauche, l'aileron droite, la queue gauche et la queue droite

## 2.5. Etude de la dynamique des moteurs :

La fonction de transfert d'un moteur électrique est du second ordre et s'écrit sous la forme suivante :

$$H(p) = \frac{K}{K^2 + Rf + (RJ + Lf)p + Ljp^2}$$

$K$  : gain du moteur en Vs/rad

$R$  : résistance interne du moteur en  $\Omega$

$L$  : inductance en H

$f$  : Frottements

$J$  : Inertie du rotor en g.cm<sup>2</sup>

Ainsi, cette fonction de transfert peut se rapprocher d'un premier ordre en négligeant certains éléments. En effet, l'inductance est de l'ordre du milli Henry, elle est donc négligeable devant la résistance du moteur qui est de l'ordre de la dizaine d'Ohm. De même, les frottements d'un moteur sont négligeables devant l'inertie du rotor.

On obtient donc :

$$H(p) = \frac{K}{K^2 + RJp} \Rightarrow H(p) = \frac{K}{1 + \tau p}$$

$k$  : gain du moteur en rad/s/volt

$\tau$  : constante de temps du moteur en secondes.

### 3. Modèle finale avec approximation de petite angle :

En isolant l'accélération et en appliquant l'approximation de petit angle, où la vitesse de rotation en base solide est égale aux taux d'angle d'Euler, nous obtenons : `

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} = \frac{F_{tot,x}}{m} - g \sin \theta \\ \ddot{y} = \frac{F_{tot,y}}{m} + g \sin \varphi \cos \theta \\ \ddot{z} = \frac{F_{tot,z}}{m} + g \cos \varphi \cos \theta \\ \ddot{\phi} = \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \dot{\psi} \dot{\theta} + \frac{M_{tot,x}}{I_{xx}} \\ \ddot{\theta} = \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \dot{\psi} \dot{\phi} + \frac{M_{tot,y}}{I_{yy}} \\ \ddot{\psi} = \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \dot{\theta} \dot{\phi} + \frac{M_{tot,z}}{I_{zz}} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} = \frac{F_{tot,x}}{m} \\ \ddot{y} = \frac{F_{tot,y}}{m} \\ \ddot{z} = \frac{F_{tot,z}}{m} + g \\ \ddot{\phi} = \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \dot{\psi} \dot{\theta} + \frac{M_{tot,x}}{I_{xx}} \\ \ddot{\theta} = \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \dot{\psi} \dot{\phi} + \frac{M_{tot,y}}{I_{yy}} \\ \ddot{\psi} = \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \dot{\theta} \dot{\phi} + \frac{M_{tot,z}}{I_{zz}} \end{array} \right.$$

#### **4. Conclusion :**

A fin de comprendre le principe de la théorie de vol d'un avion à voilure fixe nous avons présenté les quatre forces qui interviennent pour faire que les avions se soulèvent et se maintiennent en l'air ainsi nous avons fait un aperçu de base sur la mécanique du vol des avions en définition les différentes parties constituant l'avion

Nous avons constaté aussi que la dérivation du modèle mathématique de la dynamique de vol est une tâche difficile

Pour cela nous avons fait quelques approximations et hypothèses, par exemple nous avons omis l'influence de l'atmosphère sur l'avion et nous avons uniquement développé le modèle dans un atmosphère calme.

Le chapitre prochain sera divisé en trois parties ; où la première partie est dédiée aux outils matériels et logiciels utilisés. La deuxième est composée de la partie design et réalisation de la commande. La troisième partie concerne le teste de décollage de l'avion et de commande.

**INTRODUCTION :** Ce chapitre est divisé en trois parties ; la première partie en va définir les composants électroniques choisis et leurs caractéristiques ainsi que leur fonctionnalité qu'ils contiennent et en va présenter le logiciel de programmation utilisé. Puis la deuxième partie concerne le design et la réalisation de la commande de l'avion (émetteur / récepteur). La troisième partie concerne le test de décollage de l'avion et de commande.

**1. Première Partie : Outils Matériels Et Logiciels**

Afin de pouvoir choisir les composants électroniques nécessaires (Hardware) pour notre projet et les logiciels de la programmation (Software) utilisés, il faut étudier la structure de notre appareil.

**1.1. Structure du système :**

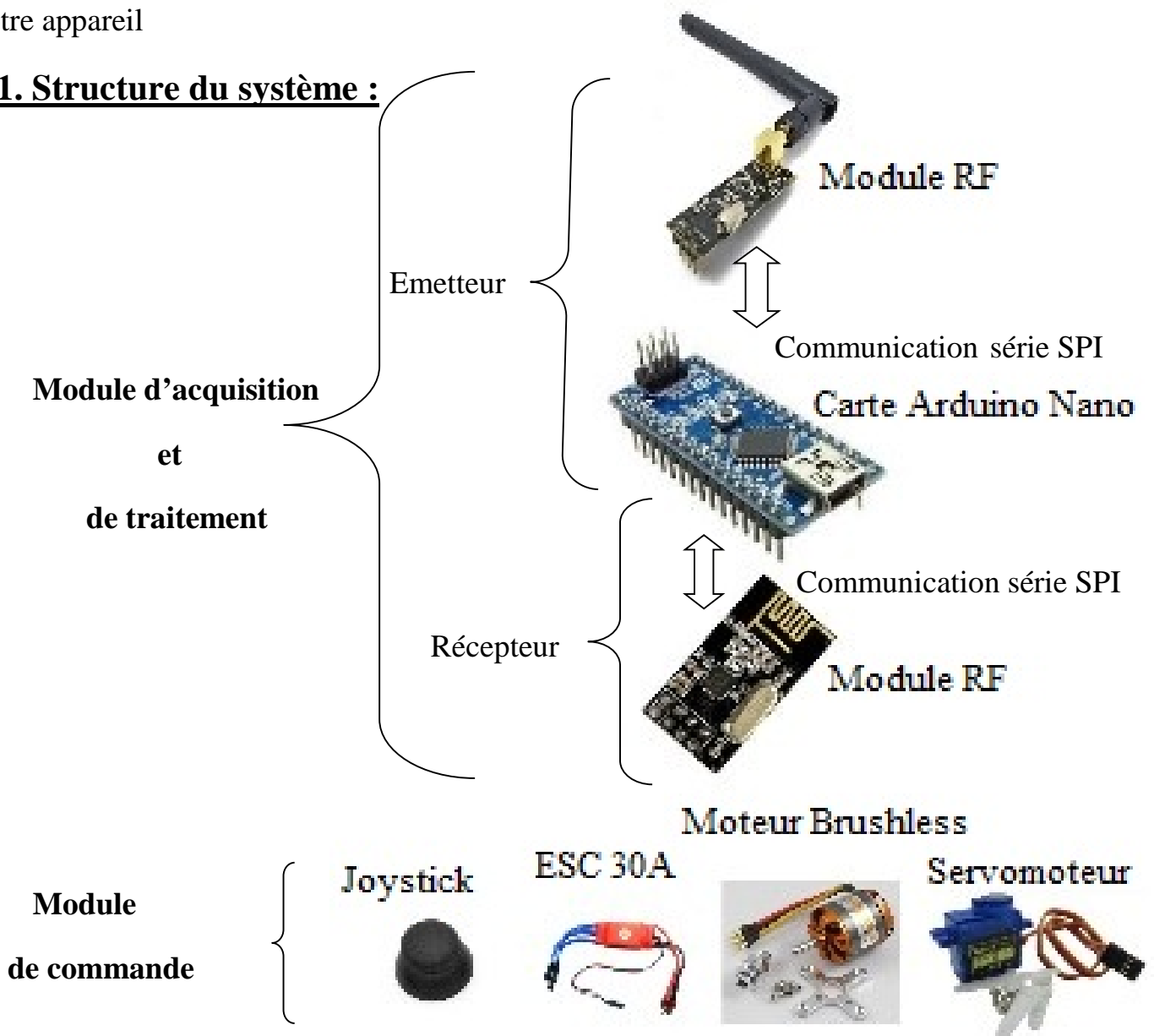


Figure III.1 : schéma synoptique de la structure du système

Le système que nous avons conçu est constitué essentiellement de deux module essentiels dans chacun accomplit une ou plusieurs fonction qui lui sont propres. Le premier module représente l'acquisition de données, le second module représente le module de commande qui sert à gérer la commande adéquate au mouvement souhaité et varie la vitesse de rotation des moteurs.

### **1.1.1. Le module d'acquisition et de traitement de données :**

C'est la partie qui prend en charge la réception et l'émission des différentes informations entre les deux modules et il représente l'interface entre le capteur et l'ordinateur dans notre cas il s'agit d'une carte Arduino Nano doté d'un microcontrôleur ATmega 328; donc d'une manier générale c'est la partie Hardware du système.

#### **1.1.1. a. Structure du module d'acquisition et de traitement de données :**

Pour la réalisation de cette partie du projet, nous avons opté pour les composants suivants :

- 1. Une carte Arduino Nano 3.0*
- 2. Un module Radio Fréquence 2.4GHz (RF) nRF24L01+*

#### **1. Carte Arduino Nano :**

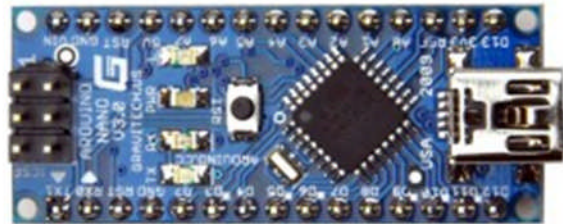
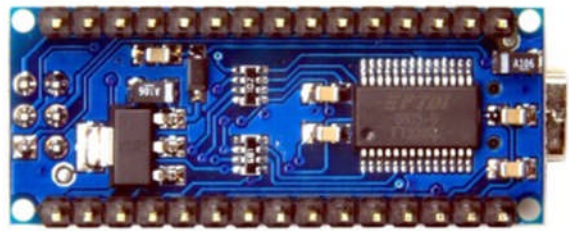
La carte Arduino Nano est basée sur un ATmega328 cadencé à 16 MHz. Sa mémoire de 32 kB et son grand nombre d'E/S font de ce circuit compatible DIL30 un élément idéal pour les systèmes embarqués ou pour des applications robotiques nécessitant du multitâches.

La Nano 3.0 peut se programmer avec le logiciel Arduino. Le contrôleur ATmega328 contient un bootloader qui permet de modifier le programme sans passer par un programmeur dont la programmation peut être réalisée en langage C en utilisant le logiciel ArduinoIDE.

#### **Caractéristiques principales:**

- alimentation: via port USB ou 5 Vcc régulée sur broche 27 ou 6 à 20 V non régulée sur broche 30 (Vin)
- microprocesseur: ATmega328
- mémoire flash: 32 kB

- mémoire SRAM: 2 kB
- mémoire EEPROM: 1 kB
- 14 broches d'E/S dont 6 PWM
- 8 entrées analogiques 10 bits
- intensité par E/S: 40 mA
- cadencement: 16 MHz
- bus série, I2C et SPI
- gestion des interruptions
- fiche USB: mini-USB B
- boîtier DIL30
- dimensions: 45 x 18 x 18 mm



La version d'origine des cartes Arduino sont fabriquée en Italie.

### Entrés – Sorties

Les E/S digitales du Nano peuvent être utilisées en entrée ou en sortie avec un niveau logique de 5v. Chaque pin peut fournir 40mA au maximum et comporte une résistance de pull-up interne (désactivée par défaut) de 20 à 50 KOhms.

Certains pins peuvent avoir des fonctions spéciales :

- Série : 0 (Rx) et 1 (Tx)
- Interruptions externes : 2 et 3. Ces pins peuvent être configurés pour déclencher une interruption sur n'importe quel changement d'état
- PWM : 3, 5, 6, 9, 10 et 11. Ces pins produisent une sortie PWM sur 8-bit
- SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). Ces pins peuvent servir pour la communication avec d'autres périphériques SPI.

## 2. Module RF 2.4GHz nRF24L01+ :

Le module radio NRf24L01+ est un module radio fréquence de la fabrication NordicSemi-conducteur. Il s'agit d'un module radio intégrant tout le nécessaire pour émettre et recevoir des données sur la gamme de fréquences de 2.4GHz

(comme le Wifi ou le Bluetooth, mais n'est pas compatible avec ceux deux protocoles) .

Il existe deux version du module Nrf24L01 ; la version classique et la version "+"  
Le Nrf24L01+ est la nouvelle version du radio cette version apporte énormément d'amélioration au module radio. Ces modules ne disposent pas de régulateur de tension intégré, il faut donc les connecte à une alimentation 3.3Volts. Le module nRF24L01+ il fonctionne avec une tension d'alimentation de 3.3 V, mais ses signaux sont tolérants au 5 V et il peut donc être utilisé avec une carte Arduino

### **Caractéristiques principales:**

- Fréquence : 2.4 GHz ISM (Industrial, Scientific and Medical) band
- Tension d'alimentation : 1.9 à 3.6 V
- Interface SPI jusqu'à 10 Mb/s (tolérant 5 V)
- Vitesses de transmission : 250 kb/s<sup>1</sup>, 1 Mb/s et 2 Mb/s
- Très basse consommation (plusieurs mois,
- Peut être utilisé avec des microcontrôleurs très basiques comme l'ATtiny
- Portée : quelques mètres avec une antenne PCB  
et jusqu'à un kilomètre avec une antenne externe



### **Brochage et communication :**

Le module radio Nrf24L01+ communique au moyen d'un bus SPI (Serial Peripheral Interface) est un bus de données série crée par Motorola fonctionne en full duplex (les deux circuits peuvent communiquer en même temps sur le même bus) .Il communique selon un schéma maitre-esclaves, ou le maitre contrôle la communication.

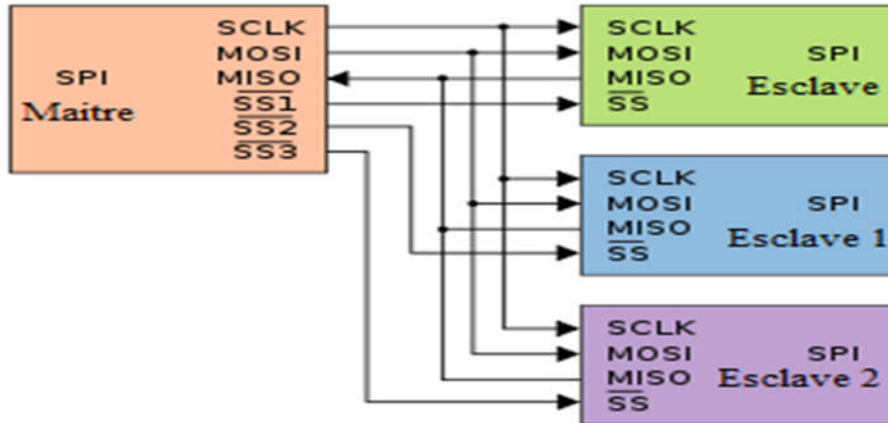
Leur fonctionnement c'est à base de communication entre un maitre et un esclave

- Le maitre génère l'horloge et sélectionne l'esclave
- L'esclave répond aux requêtes du maitre

Le bus SPI utilise quatre signaux logiques :

- SCLK : Serial Clock Horloge généré par le maitre

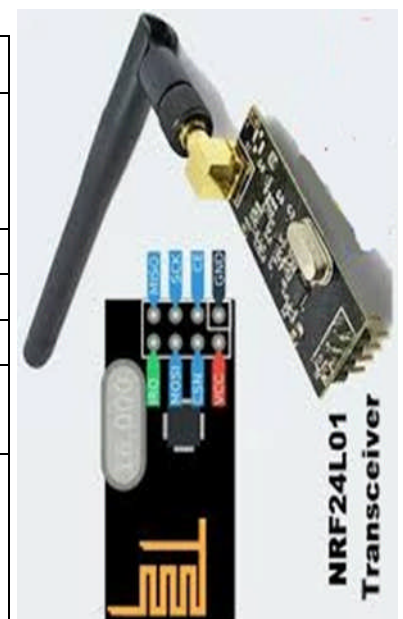
- MOSI : Master Output Slave Input généré par le maitre
- MISO : Master Input Slave Output généré par l’esclave
- SS : Slave Select actif à l’état bas est généré par le maitre



**Figure III.2:** schéma de fonctionnement du bus SPI (maitre =>esclave)

Au niveau du brochage du Nrf24L01+, le bus SPI et le module RF dispose de trois broches communes à savoir : MISO (données esclave => maitre), MOSI (données maitre => esclave) et SCK (horloge), de même que deux broches pour la sélection du module sur le bus SPI et son activation CSN et CE. Le module nRF24L01+ dispose aussi d’une broche d’interruption nommée IRQ, permettant d’avertir le microcontrôleur maitre qu’un nouveau paquet de données vient d’être reçu.

Signal	Direction	Description
CE	input	Chip EnableCe signal est actif à 1 et sert à configurer le module en mode 1réception (RX) ou de transmission (TX)
CSN	input	SPI Chip Select
SCK	input	SPI Clock
MOSI	input	SPI Slave Data Input
MISO	output	SPI Slave Data Output, with tri-state option
IRQ	output	Maskableinterrupt pin Ce signal est actif à 0 et contrôlé par trois sources d’interruption masquables



**Figure III.3:** tableau décrit les pins du modules Nrf24L01+ et leur description ainsi leur direction

### 1.1.2. Module de commande :

Il assure la commande de moteurs Brushless à travers une carte de puissance ESC (Electronic Speed Controller) (contrôle de vitesse électronique), il a pour rôle aussi de commande les Servomoteurs ; tous sa en suivant les instructions envoyer après avoir traité par la carte Arduino.

#### 1.1.2. a. Structure du module de commande :

Pour la réalisation de cette partie du projet, nous avons opté pour les composants suivants :

1. *Carte de puissance ESC*
2. *Moteur Brushless 1000Kv*
3. *Des Servomoteurs 9g*
4. *Module Joysticks à deux axes*

#### 1. La carte de puissance ESC :

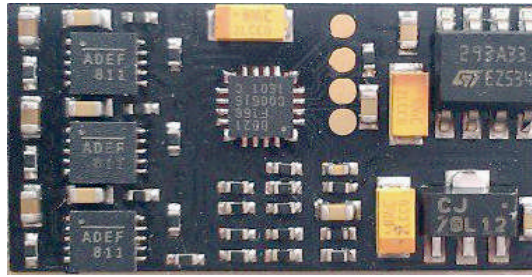
Un contrôle de vitesse électronique ESC est un circuit électronique qui contrôle et régule la vitesse d'un moteur électrique synchrone, il peut également prévoir une inversion du freinage moteur dynamique (frein dynamique).



**Figure III.4** : Un contrôle de vitesse électronique ESC 30A

ESC possèdent un microcontrôleur et un circuit de puissance (pont en H) et dans le cas des moteur Brushless un dispositif d'acquisition ils permettent de gérer

- La vitesse
- La direction
- Le freinage



**Figure III.5** : différents composant d'ESC

**Câblage** : les ESC possèdent une interface de commande de type servomoteur à 3 fils : les deux fils d'alimentation (noir / rouge) sont sensés être utiliser pour alimenter les autres composant reliés au même système et le fils marron reliés à une entre numérique PWM.

## 2. Moteur Brushless :

Un moteur Brushless ou moteur sans balais, ou machine synchrone autopilotée à aimant permanents c'est-à-dire qu'il tourne à la même vitesse que le système de tension qui l'alimente (le rotor sui le champ magnétique). Ilse comporte comme un moteur à courant continu traditionnel ; il présente des caractéristiques semblables à ce dernier et au moteur alternatif mais sans les inconvénients de ces moteurs comme :

- L'usure mécanique des moteurs courant continu ; le moteur Brushless n'a pas de commutation mécanique mais une commutation électrique ; il n'y a pas donc de couple de frottement dû à la friction des balais sur les lames
- Sans bruit, sans parasite électrique dû au frottement des balais sur les lames du collecteur

La commutation des moteurs est assurée par des cartes de puissance électronique (ESC) qui permettent de les positionnés et de l'entraînés avec précision



**Figure III.6** : moteur Brushless avec adaptateur d'hélice

**Les caractéristiques fonctionnelles :**

- Une durée de vie longue
- Une forte constante de couple
- Une puissance importante
- Une haute vitesse de fonctionnement

**Les caractéristiques dimensionnelles :**

- Dimension : 37.2x60.3mm
- Poids : 133g
- Voltage : 12v
- Alimentation : Accumulateur Lipo 3-4 éléments
- KV : 1000 T/V
- Diamètre Axe : 5.0mm
- Courant max : 30A
- Puissance max : 470 W/Min

**Le KV d'un moteur Brushless :**

Le KV d'un moteur Brushless est la vitesse de rotation de moteur pour 1 volt ; il indique le nombre de tour/min/volt du moteur à vide ; si un moteur est alimenté par une tension U, sa vitesse de rotation est égale à :  $N=U*KV$

Le KV n'est qu'une valeur théorique à vide, en charge cette valeur peut baisser entre 25% et 50% ; plus le KV est haut et plus cette perte est importante

Exemple : un moteur avec 1400Kv sous 10V tournerait à 14000 tour/min s'il est à vide

**Fonctionnement :****▪ Démarrage d'un moteur Brushless :**

Le système de contrôle électronique (ESC) assure un démarrage progressif, car le rotor ne peut pas atteindre instantanément la vitesse de rotation du champ. La fréquence des tensions d'alimentations sera donc très basse au départ, puis augmentée progressivement en tenant compte de la réaction du moteur ; l'objectif collecteur.

- **Fonctionnement par apport au moteur CC :**

Fonctionnement du moteur sans balai comparé au moteur traditionnel avec balais Un moteur « brushless » est constitué d'aimants permanents sur le rotor et d'un bobinage triphasé sur le stator. Il suffit de faire passer un courant dans une partie du bobinage pour créer un champ magnétique qui va attirer les aimants et les aligner avec le Champ magnétique. Le bobinage est généralement en triphasé, c.à.d. Qu'il est constitué de 3 Groupes de bobines reliées entre elles. En alimentant successivement les groupes de bobines, le rotor va à chaque fois s'aligner sur les champs et tourner. Le moteur est simple mais la commande électronique (contrôleur ESC) est plus élaborée. En effet, il faut connaître à chaque instant la position du rotor et envoyer le courant dans les groupes de bobines (capteur à effet Hall). Celle-ci transforme le courant continu en courant triphasé à fréquence variable et va alimenter successivement les bobines (enroulements) pour créer un champ tournant et donc la rotation.

Dans le cas du moteur traditionnel DC à charbons a balais , le système de commutation qui permet de faire passer le courant successivement dans les bobinages n'est pas réalisé électroniquement mais mécaniquement par l'intermédiaire des lamelles du collecteur.

### Les différents types de moteur Brushless :

- **Moteur Brushless outrunner :**

Les moteurs brushless outrunners comprenant plus de 3 bobines et 2 pôles ne font qu'une fraction de tour lorsque le champ a tourné de 180°. Leur fréquence de rotation est donc plus faible mais le couple très élevé. Ces moteurs brushless outrunners sont souvent utilisés dans des applications qui nécessitent un fort couple, car ils peuvent être reliés à la charge sans nécessiter de dispositif de réduction. Leur coefficient KV est relativement faible par rapport aux autres types de moteurs brushless.



**Figure III.7 :** moteur Brushless outrunner

- **Moteur Brushless inrunner :**

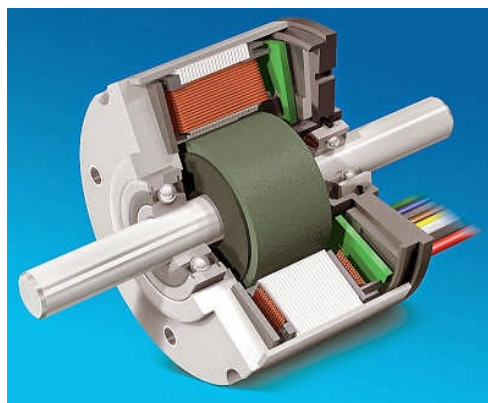
Les « inrunners » ont été les seuls moteurs brushless utilisés au début de la propulsion électrique en aéromodélisme. Ils ont le plus souvent deux à quatre pôles. Ils sont d'une utilisation plutôt rare aujourd'hui dans notre univers car supplantés par les « outrunners ». On les distingue facilement par le fait que leur forme est un cylindre fixe avec seul un axe tournant à une extrémité.



**Figure III.8 :** Moteur Brushless inrunner

- **Moteur Brushless disque :**

Le rotor et le stator peuvent également être constitués de deux disques faces à face, avec les rayons et les bobines répartis selon les rayons de ces deux disques. Ce type de moteur brushless est peu employé car l'action des bobines sur les aimants crée un effort axial important qui nécessite des butées à billes conséquentes

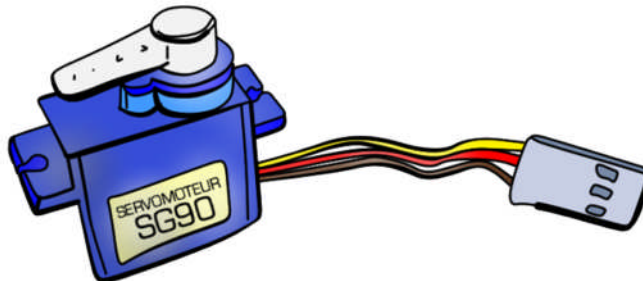


**Figure III.9 :** Moteur Brushless disque

**3. Les Servomoteurs :**

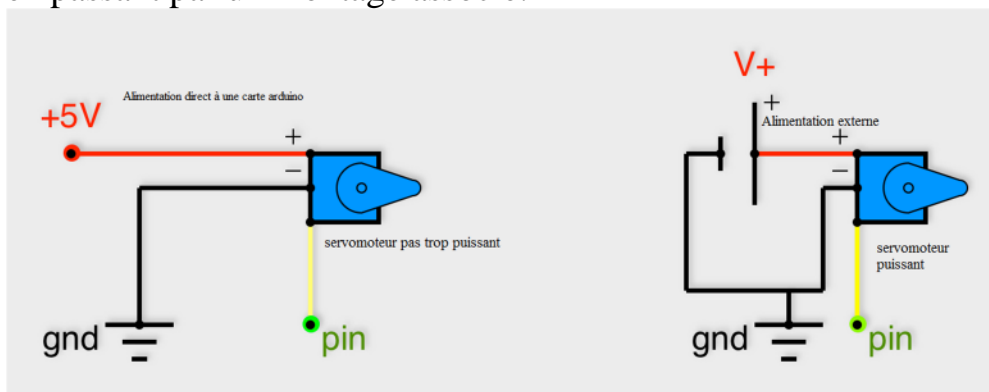
▪ **Présentation**

Le servomoteur est un moteur (rotatif) qui peut effectuer des rotations très précises (dans une portion de tour seulement) et en un certain nombre de pas (de micro-déplacements). Il y a toutes sortes de servomoteurs.



**Figure III.10 :** servomoteur type SG90

Un des avantages des servomoteurs est sa possibilité de maintenir avec force une position donnée. On peut piloter des rotations avec l'Arduino, quelques fois directement avec la carte si le moteur n'est pas trop puissant, sinon en passant par un montage associé.

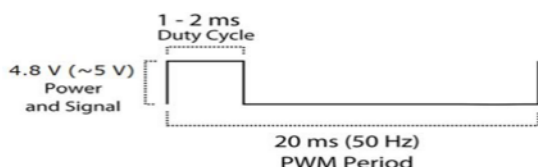


**Figure III.11 :** alimentation des servomoteurs

▪ **Fonctionnement**

Un servomoteur standard est positionnable de 0 à 180°. La position est obtenue en envoyant une pulsation de durée définie entre 1 et 2 ms, 1,5 ms donne la position milieu (90°), 1 ms la position mini (0°) et 2 ms la position maxi (180°).

Signal de commande :

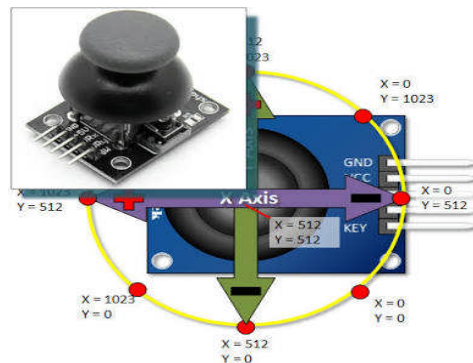


Raccordement :



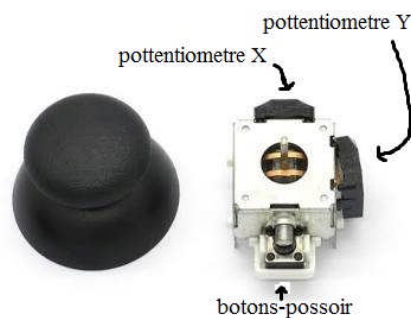
#### 4. Module Joysticks à deux axes :

Un joystick est un périphérique d'entrée constitué d'un manche posé sur un socle et des bouton-poussoir 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.



**Figure III.12 :** joystick à deux axes

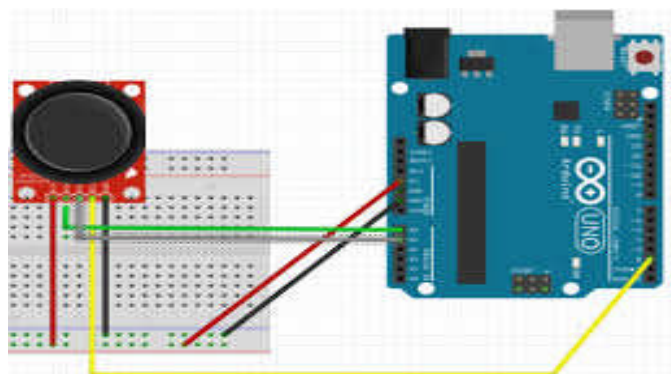
Le joystick est composé de deux potentiomètres ; un pour l'axe X et l'autre pour l'axe Y ainsi un bouton-poussoir



**Figure III.13 :** structure d'un joystick à deux axes

##### ▪ Fonctionnement

Le joystick est alimenté avec 5v d'arduino et GND, VRx et VRy vers une entrée analogique, le bouton-poussoir vers une entrée PWM de la carte Arduino.

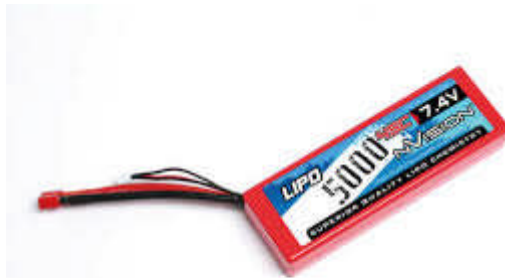


**Figure III.14 :** câblage d'un joystick avec Arduino

### **1.1.3. D'autres matériels utilisés :**

#### **1.1.3. a. Un accumulateur LiPo3s (Lithium Polymère 3 cellules) avec chargeur LiPo :**

Les batteries LiPo demeurent des accumulateurs électrochimiques dont la réaction est basée sur le lithium non pas à l'état ionique (exemple : le Li-Ion) mais à l'état de polymère ce qui le rend beaucoup plus performant à la LI-Ion et au Ni-Mh.



**Figure III.15 : accumulateur LiPo 3S**

#### ▪ **Précaution à prendre lors de l'utilisation :**

- Laisser les accumulateurs refroidir entre chaque charge/décharge
- Lors d'un crash assuré que votre accumulateur n'a pas été percé ou endommagé
- Il faut charger l'accumulateur avec équilibrage d'où il faut utiliser un chargeur LiPo

#### ▪ **Chargeur LiPo équilibré :**

Est un appareil permettant de recharger/décharger un ou plusieurs accumulateurs, groupés ou non en batterie.



**Figure III.16 : chargeur LiPo équilibré**

▪ **Précautions d'utilisation :**

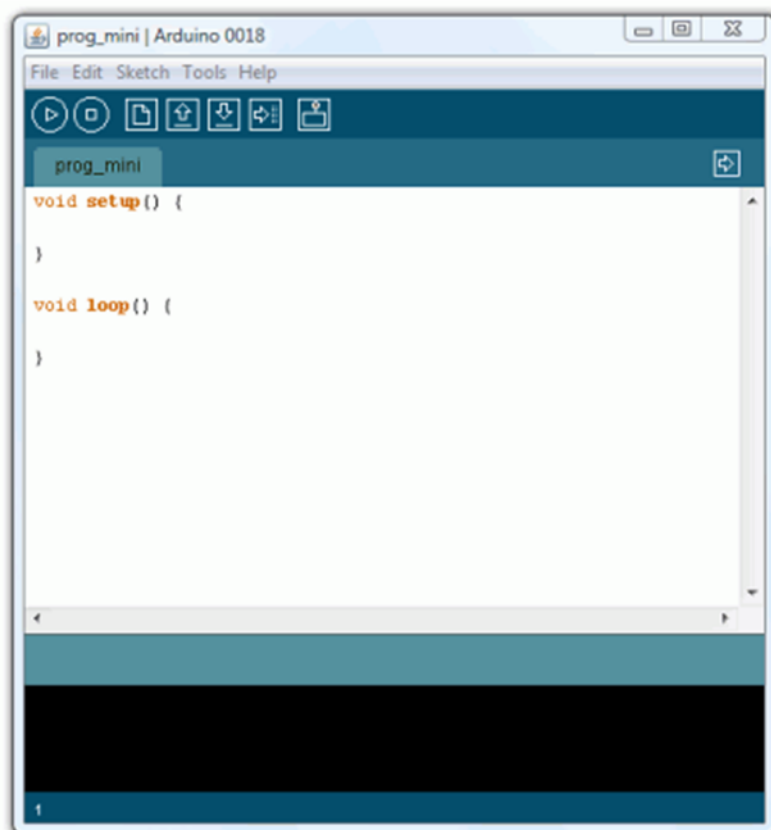
- Vérifier qu'il convient au type de batterie à recharger/décharger
- Suivre les instructions du fabricant
- Respecter la polarité de la batterie à recharger / décharger

**1.2.1. Logiciel du programmation Arduino IDE :**

Le logiciel Arduino est un environnement de développement (IDE) open source et gratuit, il peut télécharger sur le site officiel Arduino.

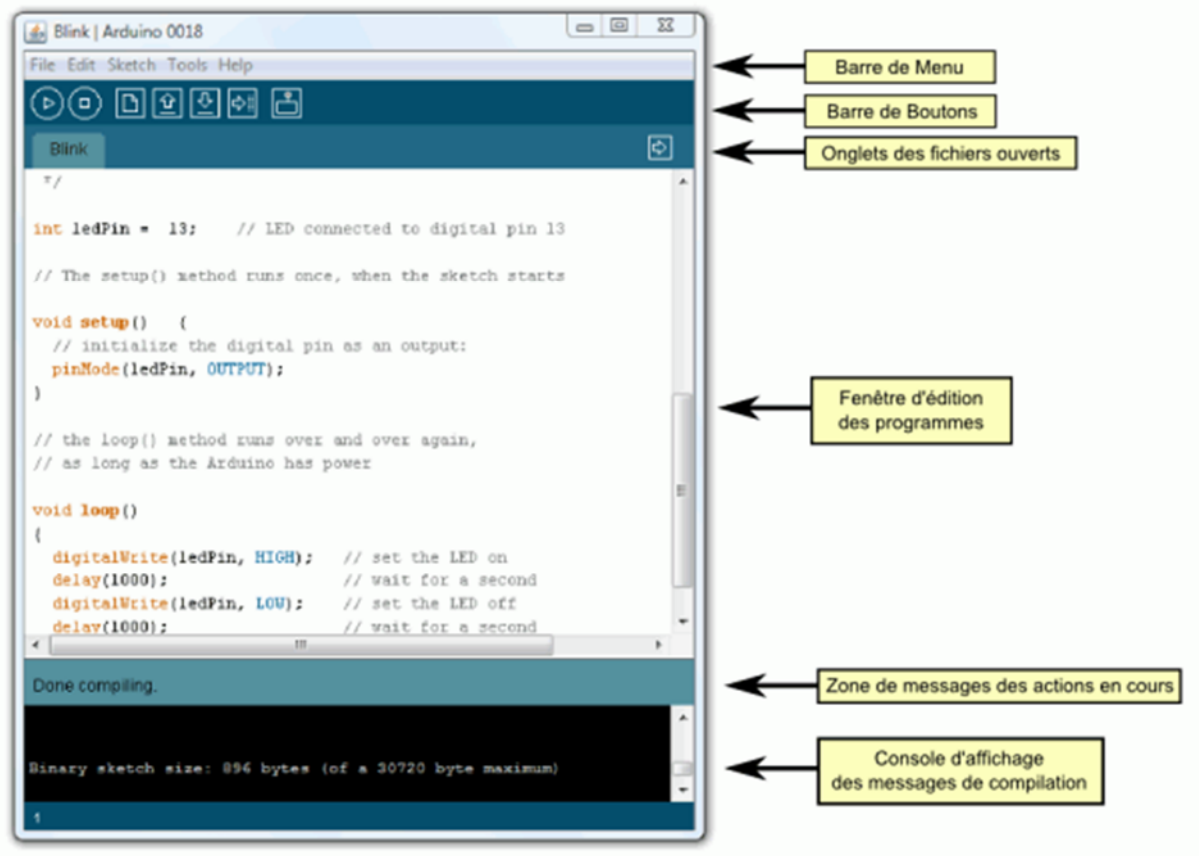
Le logiciel Arduino a pour fonctions principales :

- de pouvoir écrire et compiler des programmes pour la carte Arduino
- de se connecter avec la carte Arduino pour y transférer les programmes
- de communiquer avec la carte Arduino



**Figure III.17:** Logiciel Arduino IDE

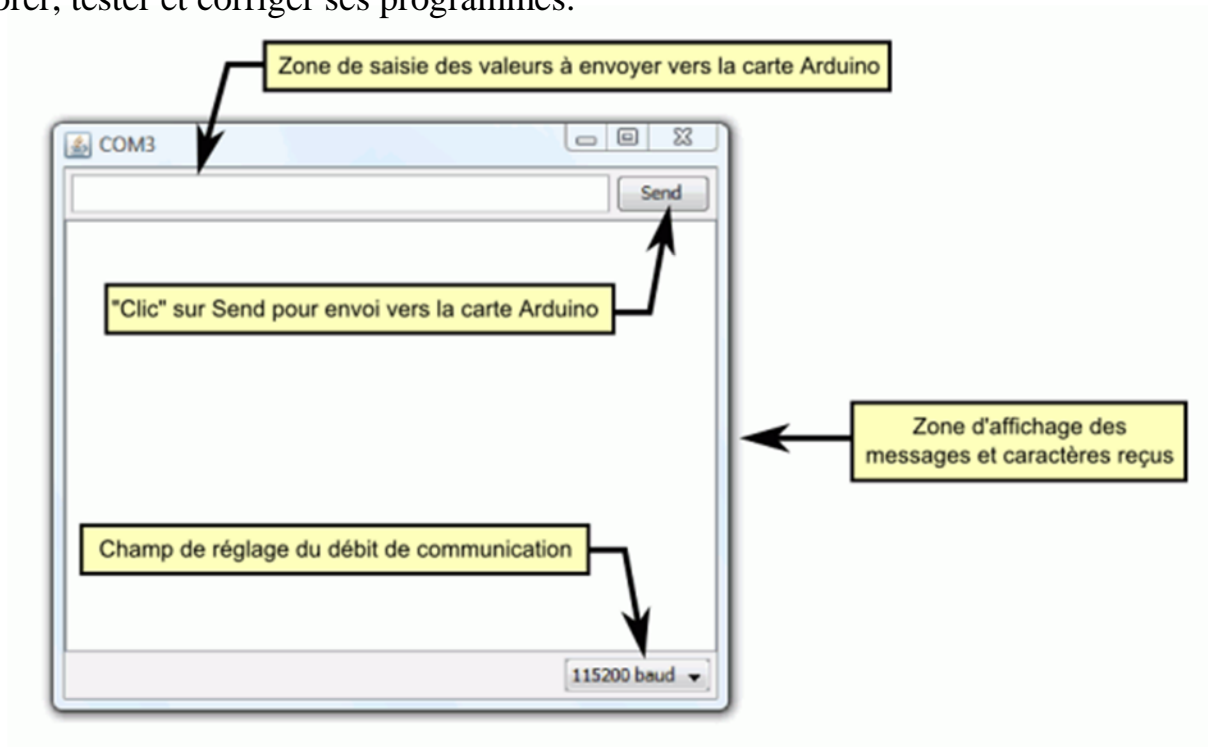
- **Arduino IDE comporte :**
- une BARRE DE MENUS comme pour tout logiciel une interface graphique (GUI),
- une BARRE DE BOUTONS qui donne un accès direct aux fonctions essentielles du logiciel et fait toute sa simplicité d'utilisation,
- un EDITEUR (à coloration syntaxique) pour écrire le code de votre programme, avec onglets de navigation,
- une ZONE DE MESSAGES qui affiche indique l'état des actions en cours,
- une CONSOLE TEXTE qui affiche les messages concernant le résultat de la compilation du programme



**Figure III.18 :** fenêtre du logiciel Arduino IDE

▪ **Le logiciel Arduino intègre également :**

Un TERMINAL SERIE (fenêtre séparée) qui permet d'afficher des messages textes reçus de la carte Arduino et d'envoyer des caractères vers la carte Arduino. Cette fonctionnalité permet une mise au point facilitée des programmes, permettant d'afficher sur l'ordinateur l'état de variables, de résultats de calculs ou de conversions analogique-numérique : un élément essentiel pour améliorer, tester et corriger ses programmes.



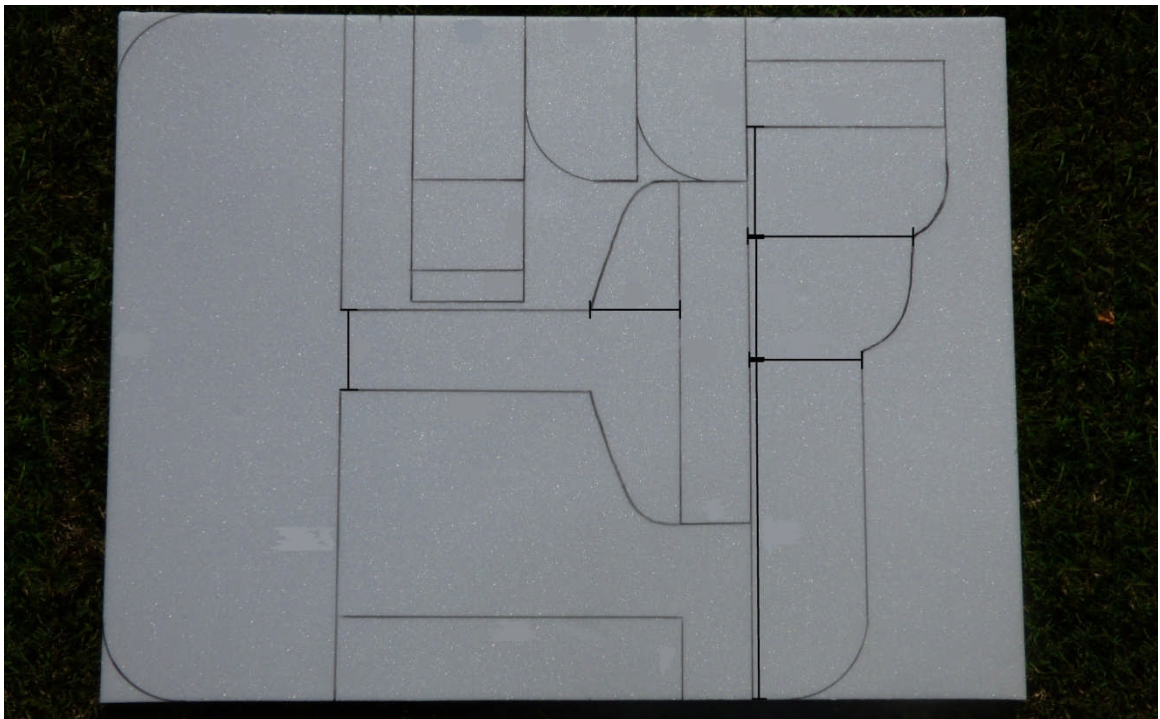
**Figure III.19 :** TERMINAL SERIE Arduino IDE

## **2. Deuxième Partie : Désigne Et Réalisation De La Commande :**

### **2.1. Partie Désigne :**

A fin de réaliser le chassie de l'avion il faut procéder comme suit : au début il faut réaliser un dessin technique pour l'avion et un traçage du plans puis découpage des différents partie composant l'avion et à la fin assemblage et formation du plans de l'avion.

**2.1.1. Traçage du plans :** Au début, nous dessinons un plan sur une feuille en utilisant le matériels de traçage et de mesure puis, en recoupons le dessin sur la feuille polystyrène.



**Figure III.a.**Traçage du plan d'avion

**2.1.2. Découpage du plan :** Après avoir fini de copier le dessin de l'avion sur la feuille polystyrène, nous allons couper les différents partie composant l'avion (fuselage, ailes et les stabilisateurs horizontal et vertical) en utilisant le matériels du découpage.



**Figure III.b.**Découpage du plan de l'avion

**2.1.3. Assemblage et formation du plan de l'avion :** Après l'achèvement du processus de coupe, nous collectons les différentes parties de l'avion en utilisant la colle et de scotch.

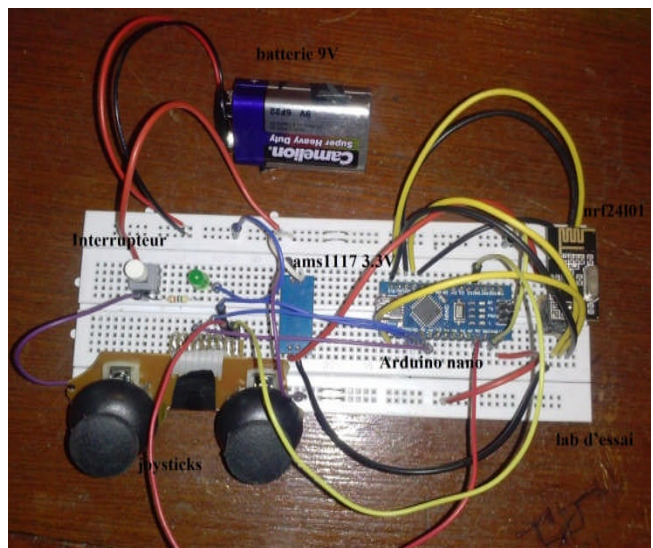
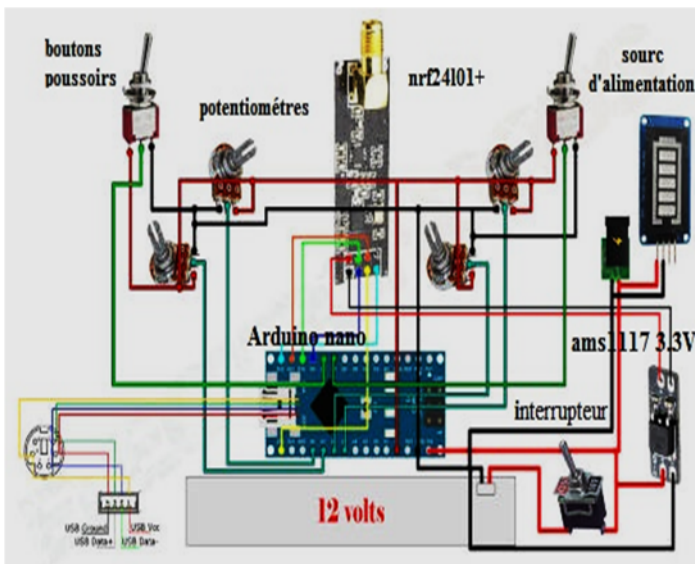


**Figure III.c.**Formation du plan de l'avion

## 2.2. Partie commande :

La commande à distance c'est la méthode qui permet de contrôler l'avion en temps réel elle est constituée d'un émetteur et d'un récepteur qui permet à l'un de manipuler l'autre à distance par des ondes radio.

**2.2.1. Réalisation du l'émetteur :** Au début, nous faisons un schéma électronique et un plan de câblage pour la manette, puis le montage sera construit sur une « breadboard » lab d'essai pour faire des tests et après avoir confirmé l'exactitude de l'installation nous faisons assembler toutes les composants sur la plaque perforée en utilisant les matériels à souder.

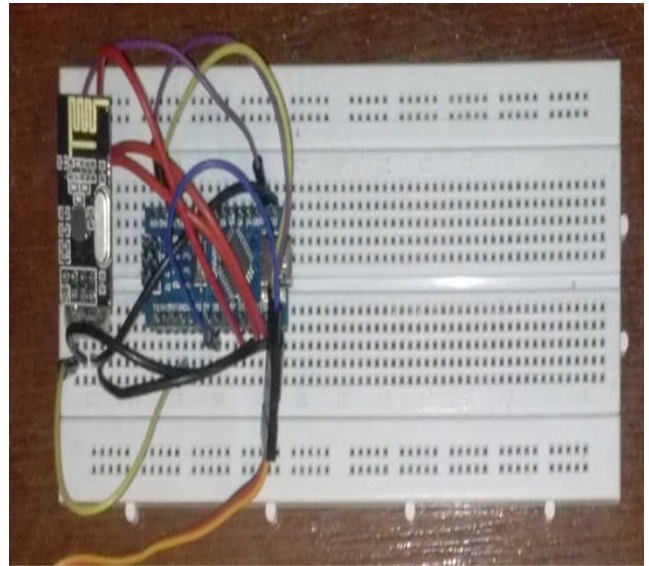
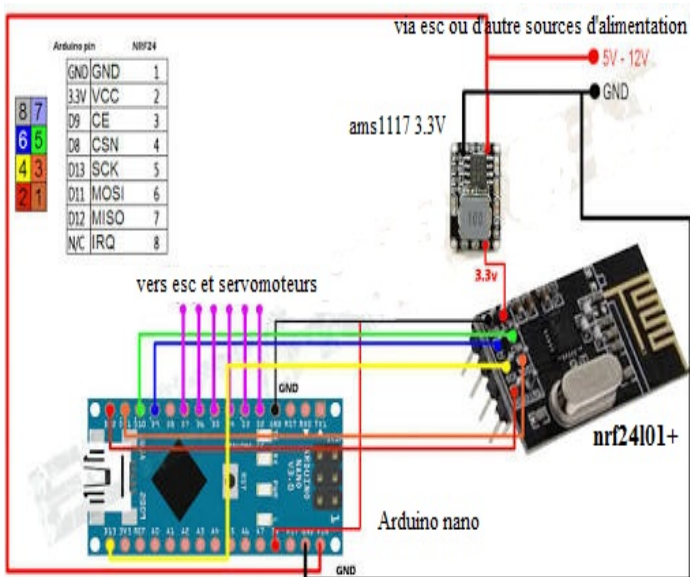


**Figure III.d.**Schéma électronique de câblage et un montage sur une lab d'essai

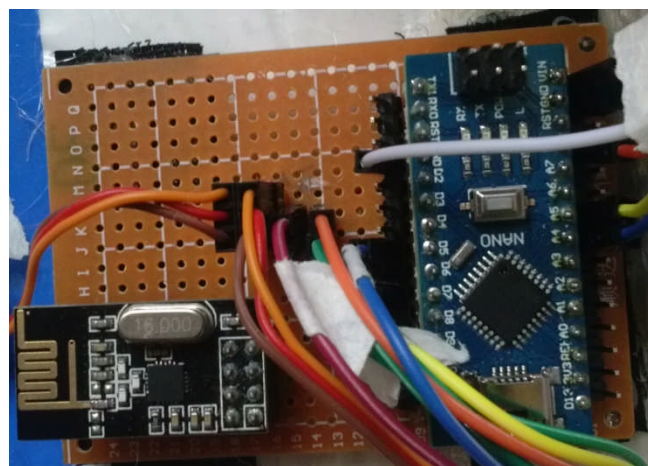


**Figure III.e.**Manette RC pour contrôler l'avion

**2.2.2. Réalisation du récepteur :** comme l'émetteur, nous faisons un schéma électronique et un plans de câblage pour la manette, puis le montage sera construit sur une « breadboard » lab d'essai pour faire des testes et après avoir confirmé l'exactitude de l'installation nous faisons assemble toutes les composants sur la plaque perfore en utilisant le matériels à souder.



**Figure III.f.**Schéma électronique de câblage et un montage sur une lab d'essai.



**Figure III.g.**recepteur du l'avion

### **3. Troisième Partie : Teste De Décollage De L'avion Et De Commande:**

#### **3.1. Préparatifs avant le vol :**

L'avion est maintenant prêt. Il est possible de s'entraîner à piloter sur l'ordinateur avec la télécommande. Il existe plusieurs simulateurs d'avion RC comme « Phoeni model flight simulation ». Ce dernier est très réaliste. Il y a différents avions à choix et les paramètres de vols sont bien programmés.

Une fois bien entraîné et prêt pour le vol, s'assurer que les commandes fonctionnent bien à distance. Pour cela tester la portée de la commande en s'éloignant de l'avion et en vérifiant que les gouvernes sont actionnées. Ceci fait, l'avion est prêt.

#### **3.2. Le prototype :**

Malheureusement, nous ne sommes pas capables d'affirmer que le plan est destiné à un avion télécommandé qui vole réellement. L'avion que nous avons construit n'a pas pu rejoindre les oiseaux. Malgré le fait que on 'a suivi à la lettre le plan à la première construction. Il s'agit donc après un échec, de comprendre ce qui c'est passé afin de ne pas reproduire les mêmes erreurs. Malheureusement, le manque de temps a fait qu'on a été obligé d'admettre notre défaite...pour l'instant. Le moment de déception passé, il nous a appris beaucoup de nos échecs. Il faut donc être persévérant pour obtenir une réussite.

Il s'agit donc d'analyser le prototype afin de mettre en évidence ce qui ne fonctionne pas.

#### **3.3. Analyse de prototype :**

L'accumulation de plusieurs facteurs a fait que l'avion n'a pas pu voler. En analysant les vidéos, on voit qu'il avait un temps de roulage beaucoup trop long avant de décoller et qu'une fois décollé, il perdait toute stabilité. Il y avait donc un problème au niveau de la force de portance. De plus la profondeur n'était pas assez performante. Il aurait fallu avoir des gouvernes plus larges pour gagner en efficacité. Si la profondeur n'était pas efficace et que le profil de l'aile n'était pas suffisamment aérodynamique, la profondeur ne pouvait pas donner un angle d'attaque à l'aile suffisant pour que l'avion décolle. L'avion devait donc avoir une vitesse très rapide pour décoller. Une fois en l'air, il était instable. Il s'était tout de suite penché sur la gauche perdant ainsi beaucoup de portance jusqu'à ce qu'il décroche. Le problème de stabilité en l'air, dû à une asymétrie de l'avion et une mauvaise répartition du poids ; trop en avant ou sur un côté a fait qu'il était incontrôlable et que son destin était de s'écraser dans les hautes herbes.

Pour terminer, ce qui a provoqué sa dernière chute, provient du fait qu'il était impossible de le faire décoller depuis la route, la solution était donc de le lancer. Mais du fait qu'il n'était pas du tout solide et stable les ails sont cassés au moment de le lancer. Et faire voler un modèle réduit comporte beaucoup de risques car le modèle évolue dans les trois dimensions, aussi est-il nécessaire d'apprendre au même titre que la conduite d'une voiture ou d'une moto. Il est illusoire de penser réussir seul à faire voler un avion radiocommandé.

Il s'agit donc de ne pas reproduire ces mêmes erreurs dans la prochaine construction. Un fuselage plus solide, une profondeur plus efficace avec un angle d'attaque suffisant pour le décollage et aussi bien répartie le poids d'une manier à avoir une meilleur stabilité.

En définitive il est conseillé de s'inscrire dans un club aéromodélisme.

## Conclusion :

A la fin, on peut dire que ce projet nous a été une expérience très fructueuse, bénéfique et enrichissante. Il nous a permis de mettre le premier pas dans le monde pratique de l'aéromodélisme. Il nous a permis également d'exploiter les différents éléments pertinents de la conception et de la commande des avions réduits piloter. Sur le plans software, ce projet nous a mis directement en contact avec des langages de programmation tel que : IDE Arduino, processing.

Pour commander le moteur brushless, les servomoteurs ou piloter notre avion en général, nous nous somme intéresse a comprendre les caractéristique, le mode de fonctionnement et la limite d'utilisation de chaque composants et comment associer tous ces éléments « carte Arduino NANO, Nrf24L01+, ESC 30A, » et leurs programme afin d'avoir une meilleur navigation pour notre avion dans son environnement.

Ce mémoire est donc le résumé le plus possible du notre projet. Toutefois, en effet, ce projet est vaste et complexe et il a été impossible de documenter dans le détail de tous les composants du projet. Ainsi, certaines parties ont été résumées brièvement et il serait alors nécessaire de les documenter plus en détails pour permettre comprendre mieux le fonctionnement de la commande et avoir une meilleure connaissance sur le mode de navigation de robot aérienne. Comme perspectives nous proposons :

- La commande d'une façon autonome
- Ajouter un correcteurs « IMUS » pour avoir un vol stable
- Ajouter un afficheur LCD sur la manette
- Utiliser une camera embarquer
- Utiliser un GPS

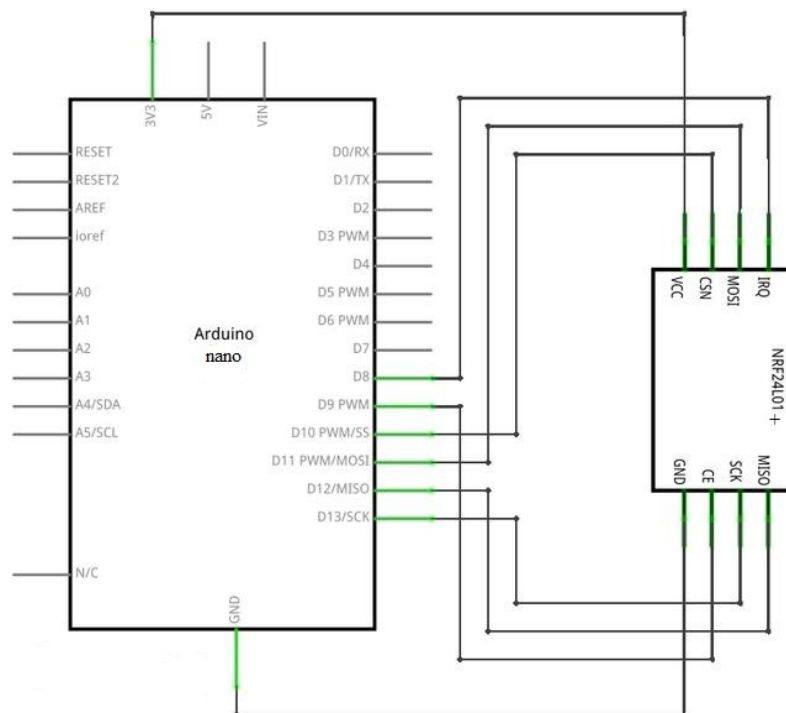
## ANNEXES

### Programmation du nRF24L01+ avec Arduino :

- Circuit électrique pour l'émetteur :

Broche module	Broche Arduino	Fonction
1	GND	Masse
2	3.3v	VCC/3.3v
3	9(configurable)	CE
4	10(configurable)	CSN
5	13	SCK
6	11	MOSI
7	12	MISO
8	non connectée	IRQ

### Branchement du module nRF24L01+ avec Arduino

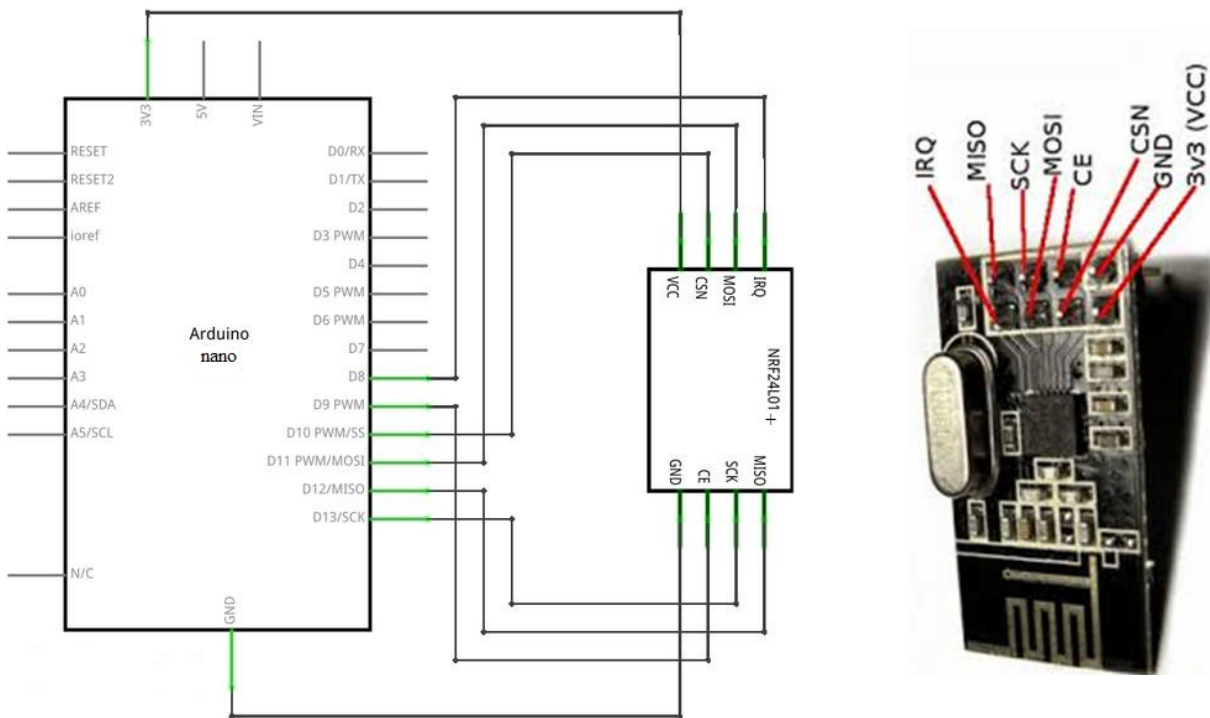


Attention l'alimentation du module RF s'effectue en 3.3v les autres broches pour le dialogue supporte le 5v

## ANNEXES

- Circuit électrique pour le récepteur :

Le branchement du module nRF24L01+ avec Arduino sera le suivant :



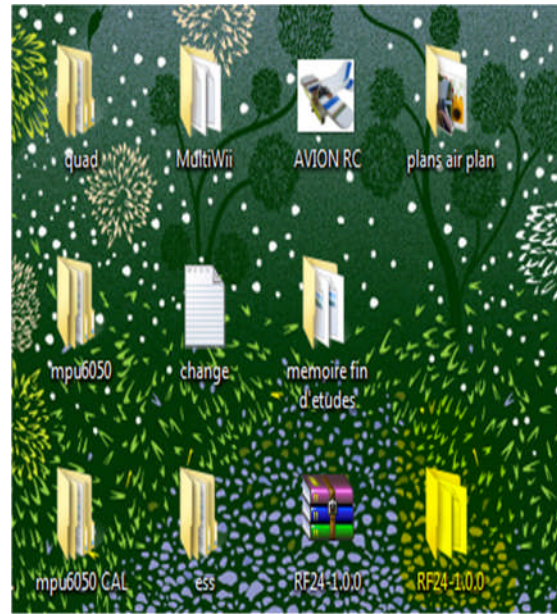
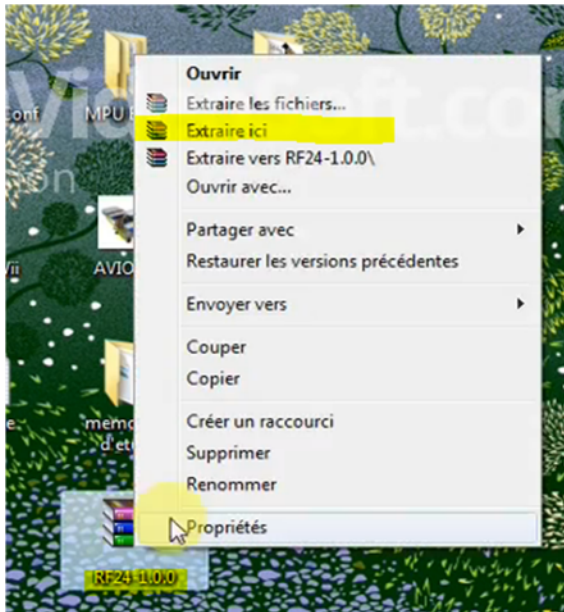
- Téléchargement de la bibliothèque RF24 et l'installée sur Arduino IDE :

Une librairie de nom « RF24 » est nécessaire pour l'utilisation de module RF avec l'arduino, est fournie par plusieurs adresses internet en se tons par exemple l'adresse suivant :<http://GitHub.com> >maniacbug> RF24Il suffit de télécharger le fichier « RF24.zip »

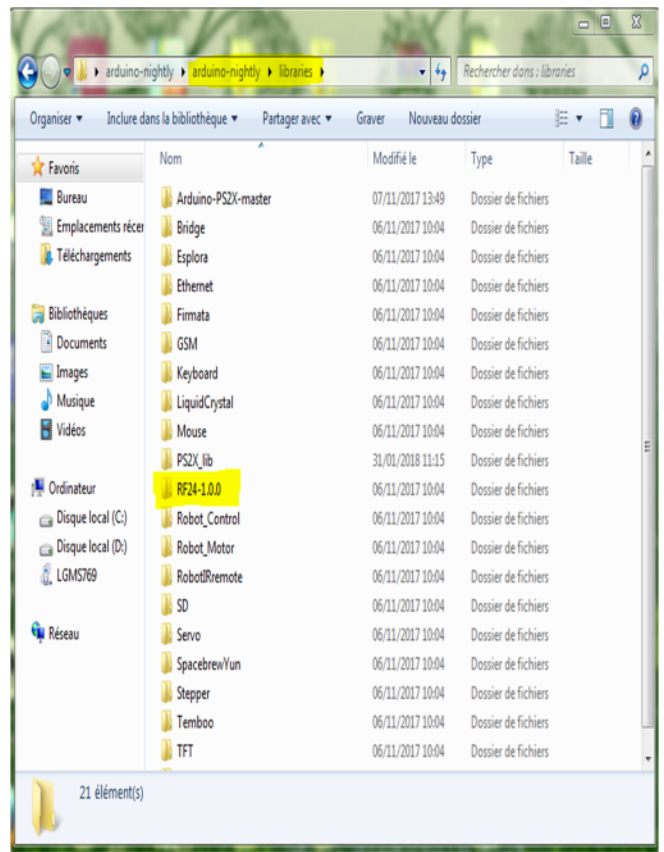
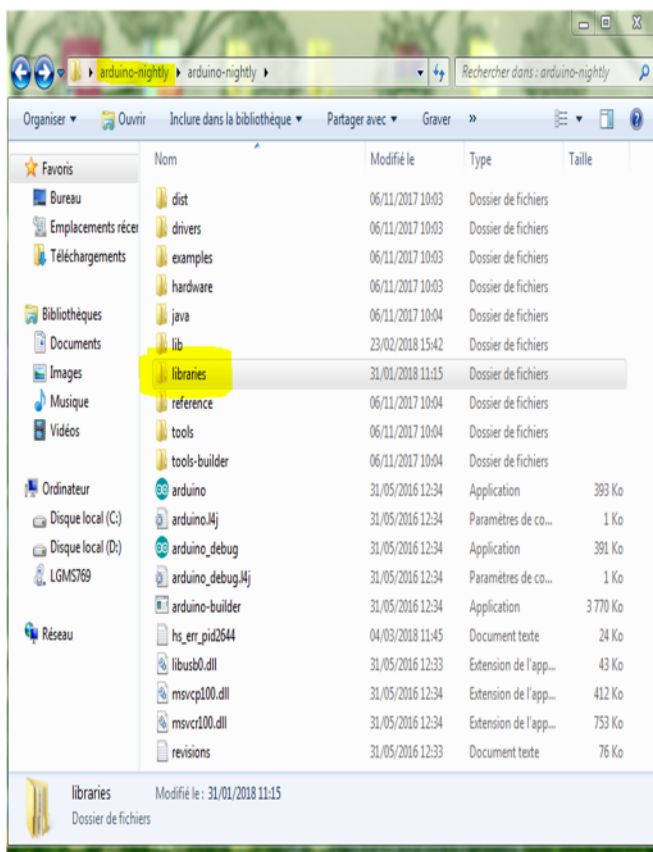


## ANNEXES

Puis de le décompresser

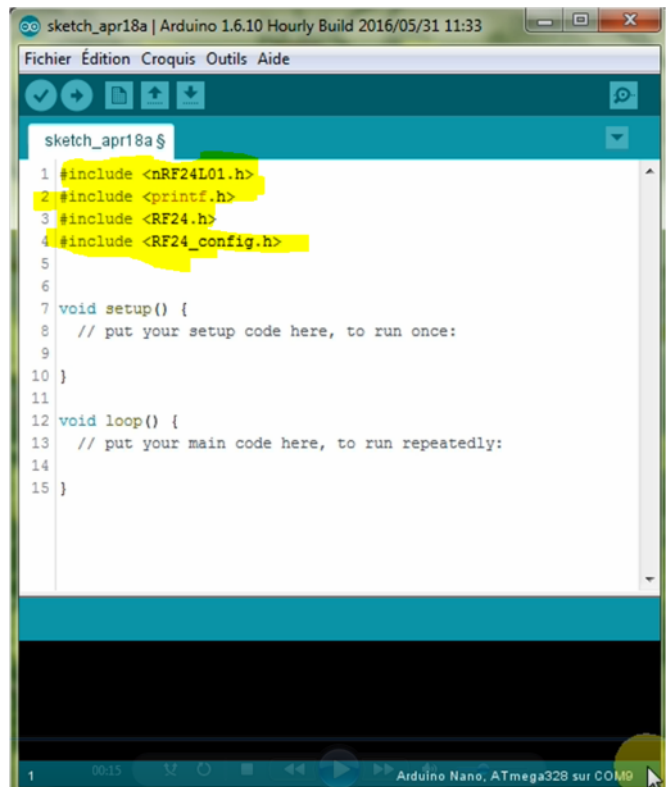
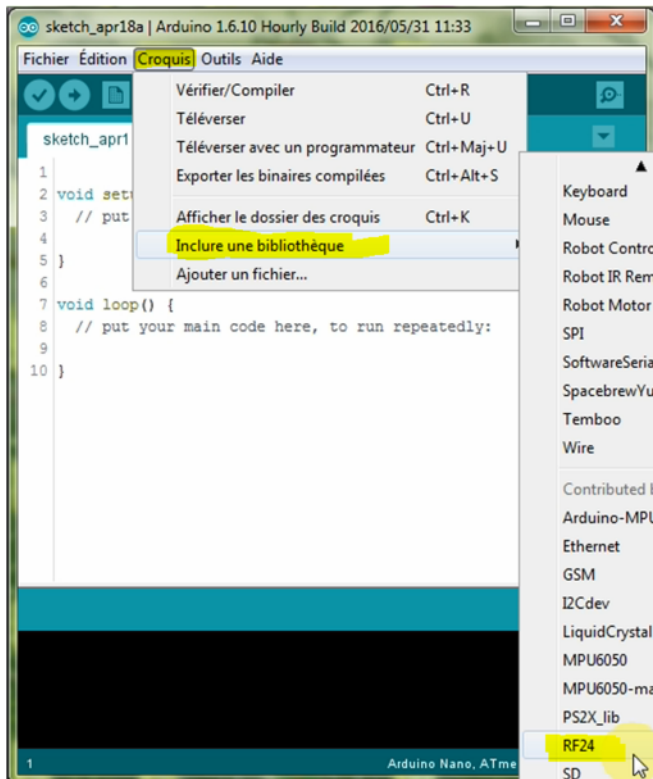


Ensuite de copier le dossier « RF24 » dans le dossier « libraries » de Arduino IDE



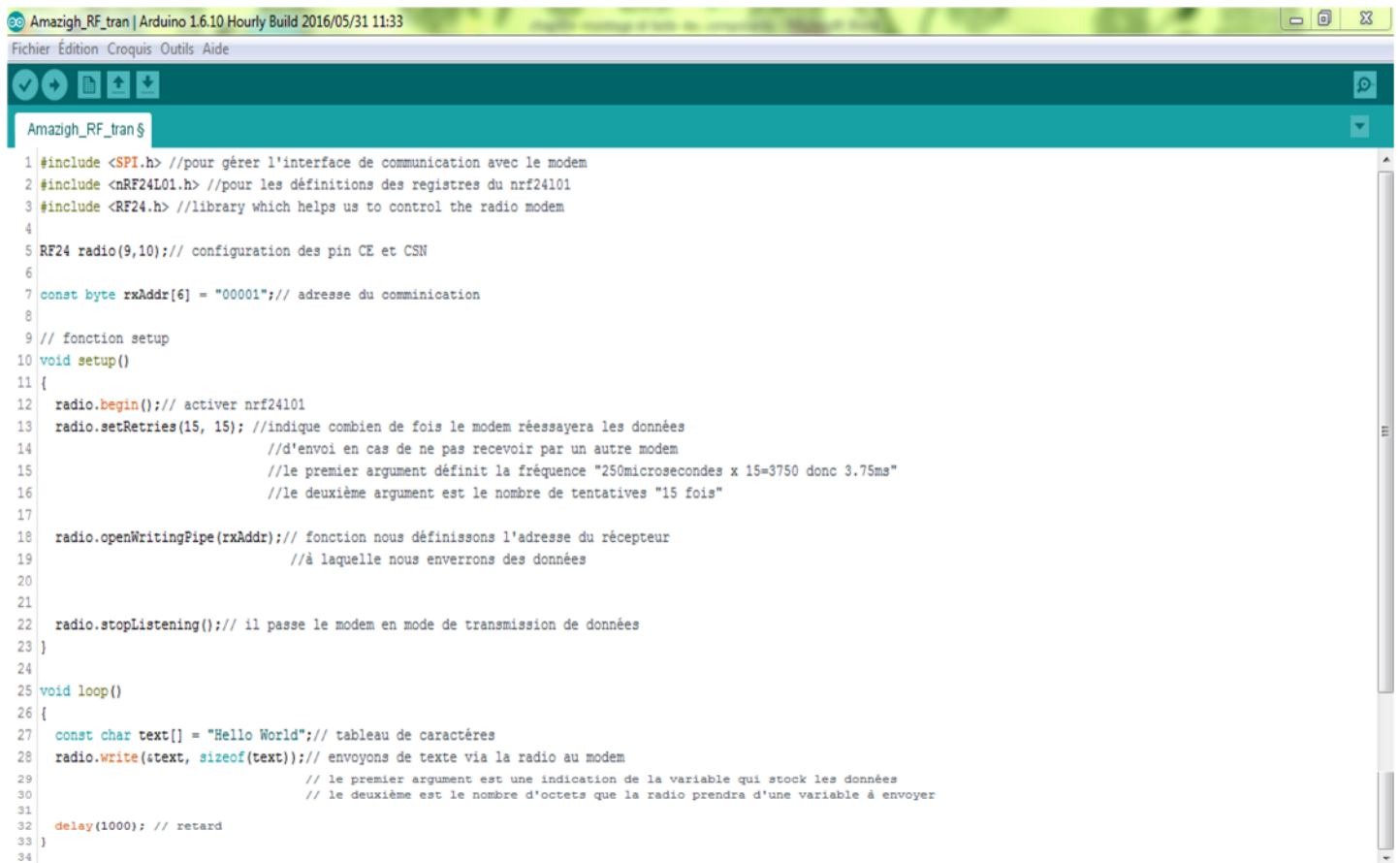
Maintenant on peut faire appel à la librairie « RF24 » facilement avec Arduino IDE

# ANNEXES



## 1.Code Arduino pour l'émetteur :

Le programme coté émetteur sera le suivant :



## ANNEXES

---

```
1 #include <SPI.h> //pour gérer l'interface de communication avec le modem
2 #include <nRF24L01.h> //pour les définitions des registres du nrf24101
3 #include <RF24.h> //library which helps us to control the radio modem
4
5 RF24 radio(9,10); // configuration des pin CE et CSN
6
7 const byte rxAddr[6] = "00001"; // adresse du communication
```

Le premier bloc de code permet d'initialiser la bibliothèque elle-même en fournissant les numéros de broches CE et CSN et de choisir l'adresse d'émission et de la réception du module

```
10 void setup()
11 {
12   radio.begin(); // activer nrf24101
13   radio.setRetries(15, 15); // indique combien de fois le modem réessayera les données
14   // d'envoi en cas de ne pas recevoir par un autre modem
15   // le premier argument définit la fréquence "250microsecondes x 15=3750 donc 3.75ms"
16   // le deuxième argument est le nombre de tentatives "15 fois"
17
18   radio.openWritingPipe(rxAddr); // fonction nous définissons l'adresse du récepteur
19   // à laquelle nous enverrons des données
20
21
22   radio.stopListening(); // il passe le modem en mode de transmission de données
23 }
```

Le second bloc de code permet d'activer le module et de le passer en mode transmission de données

```
25 void loop()
26 {
27   const char text[] = "Hello World"; // tableau de caractères
28   radio.write(&text, sizeof(text)); // envoyons de texte via la radio au modem
29   // le premier argument est une indication de la variable qui stock les données
30   // le deuxième est le nombre d'octets que la radio prendra d'une variable à envoyer
31
32   delay(1000); // retard
33 }
34
```

Le troisième bloc de code permet de fixer la taille des messages qui vont être transmis

# ANNEXES

## 2. Code Arduino pour le récepteur :

Le programme coté émetteur sera le suivant :



```
Amazigh_RF_recv | Arduino 1.6.10 Hourly Build 2016/05/31 11:33
Fichier Édition Croquis Outils Aide

Amazigh_RF_recv
1 #include <SPI.h>
2 #include <nRF24L01.h>
3 #include <RF24.h>
4
5 RF24 radio(9,10);
6
7 const byte rxAddr[6] = "00001";
8
9 void setup()
10 {
11   while (!Serial); //verifier que le port USB connectez sur le port COM
12   Serial.begin(9600); // définit la vitesse de transmission avec l'ordinateur
13
14   radio.begin(); // activer nrf24l01
15   radio.openReadingPipe(0, rxAddr); // adresse de modem qui reçoit les données
16
17   radio.startListening(); // activer la réception de données
18 }
19
20 void loop()
21 {
22   if (radio.available()) // vérifie si les données sont arrivées à l'adresse du modem
23   {
24     char text[32] = {0}; // crée un tableau de type char
25     radio.read(&text, sizeof(text)); // stock et lire les données
26
27     Serial.println(text); // afficher les données reçu
28   }
29 }
```

Le programme ressemble assez au programme de l'émetteur

```
1 #include <SPI.h>
2 #include <nRF24L01.h>
3 #include <RF24.h>
4
5 RF24 radio(9,10);
6
7 const byte rxAddr[6] = "00001";
8
9 void setup()
10 {
11   while (!Serial); //verifier que le port USB connectez sur le port COM
12   Serial.begin(9600); // définit la vitesse de transmission avec l'ordinateur
13
14   radio.begin(); // activer nrf24l01
15   radio.openReadingPipe(0, rxAddr); // adresse de modem qui reçoit les données
16
17   radio.startListening(); // activer la réception de données
18 }
```

Dans cette partie de programme en active le module et en le met en mode réception de données et en définit la vitesse de transmission avec l'ordinateur

```
20 void loop()
21 {
22   if (radio.available()) // vérifie si les données sont arrivées à l'adresse du modem
23   {
24     char text[32] = {0}; // crée un tableau de type char
25     radio.read(&text, sizeof(text)); // stock et lire les données
26
27     Serial.println(text); // afficher les données reçu
28   }
29 }
```

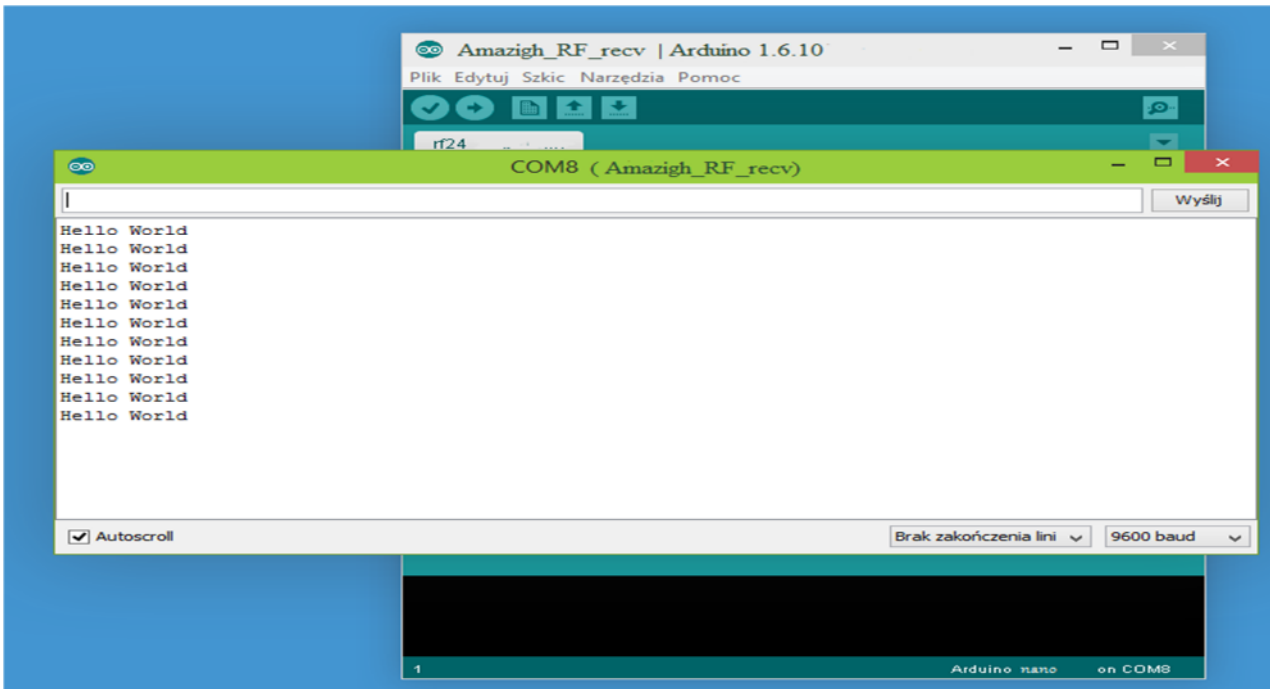
## ANNEXES

Dans la dernière partie de programme en vérifie si les données sont arrivées puis en affiche le message sur le port série de Arduino IDE.

### 3. Teste le code Arduino avec le moniteur série :

Pour les tests, nous allons envoyer un litre « Hello World » coté émetteur

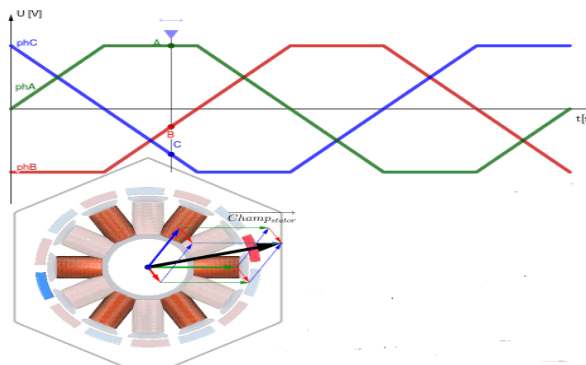
Coté récepteur nous afficherons le litre reçue pour vérifier le bon échange.



### Commodes du moteur Brushless avec Arduino :

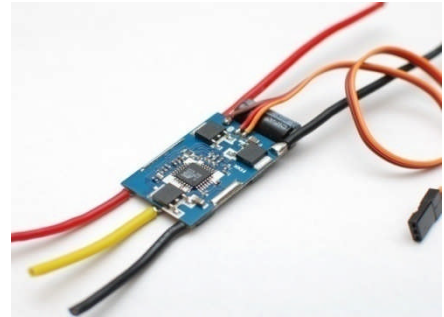
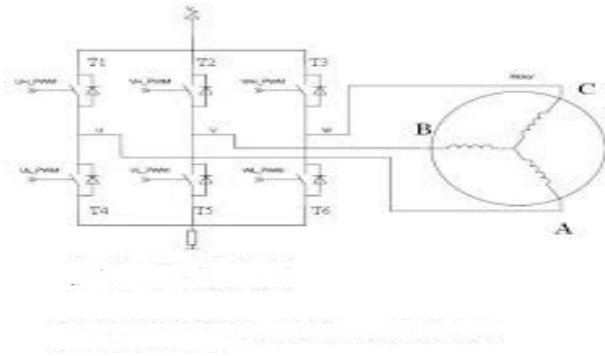
- **Utilisation de l'ESC pour contrôlé le moteur Brushless :**

La commande des moteurs Brushless avec Arduino est plus complexe par rapport au d'autre moteurs. le moteur Brushless il s'agit d'un moteur synchrone donc il faut générer trois signaux de fréquence proche de la fréquence de rotation, et déphasés de  $120^\circ$

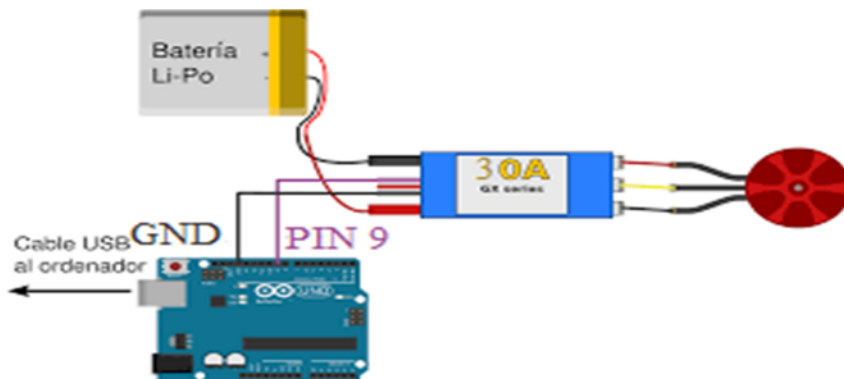


# ANNEXES

Pour qu'en peut commander le moteur Brushless en utilise l'ESC (Electronique Speed Contrôleur) qui est un circuit de puissance (pont en H)



## 1. vue prototypage du montage utiliser :



## 2. Code Arduino :

```
Amazigh_brushless_cont | Arduino 1.6.10 Hourly Build 2016/05/31 11:33
Fichier Édition Croquis Outils Aide

Amazigh_brushless_cont
1 #include <Servo.h> // cette librairie permet à une carte Arduino
2 //de piloter des servomoteurs
3
4 Servo esc; // Création de l'objet permettant le contrôle de l'ESC
5
6 int val = 0; // initialisation de la variable val
7
8 void setup() {
9   esc.attach(9); // On attache l'ESC au port numérique 9 (port PWM obligatoire)
10  delay(15); // attente de 15ms
11  Serial.begin(9600); //définit la vitesse de transmission avec l'ordinateur
12
13  // Initialisation de l'ESC
14  // (certains ESC ont besoin d'une "procédure d'initialisation"
15  esc.write(0); // le moteur est en position stop
16  delay(1000); // attente de 1S
17  esc.write(180); // le moteur tourne à plein régime
18  delay(1000); // attente de 1S
19  esc.write(0); // le moteur va lire la valeur 0
20  //qui correspond à la position stop
21
22  // Quelques informations pour l'utilisateur
23  //qui affiche à l'ouverture de port série
24  Serial.println("Saisir un nombre entre 0 et 179");
25  Serial.println("(0 = arrêt - 179 = vitesse maxi");
26  Serial.println(" démarrage a partir de 20)");
27  }
28
29 void loop() {
30  if (Serial.available() > 0) { // lire l'octet entrant
31    val = Serial.parseInt(); // lecture de la valeur passée par le port série
32    Serial.println(val); // afficher la valeur de "val" dans le moniteur série
33    esc.write(val); // le moteur se positionne selon la valeur de "val"
34    delay(15); // attente de 15ms
35  }
36  }
37
```

## ANNEXES

```
1 #include <Servo.h> // cette librairie permet à une carte Arduino
2 //de piloter des servomoteurs
3
4 Servo esc; // Création de l'objet permettant le contrôle de l'ESC
5
6 int val = 0; // initialisation de la variable val
```

Dans cette partie de code en va introduire la librairie « Servo.h » pour faciliter à la carte Arduino de piloter le moteur Brushless, puis en crée un objet « Servo .esc » pour contrôler l'ESC ensuite en déclare une variable de type « int » qui est initialement à zéro

```
8 void setup() {
9   esc.attach(9); // On attache l'ESC au port numérique 9 (port PWM obligatoire)
10  delay(15); // attente de 15ms
11  Serial.begin(9600); //définit la vitesse de transmission avec l'ordinateur |
```

Dans la fonction « setup » en va configurée la pin numérique correspondant à l'ESC et la vitesse de transmission des données

```
13 // Initialisation de l'ESC
14 // (certains ESC ont besoin d'une "procédure d'initialisation"
15 esc.write(0); // le moteur est en position stop
16 delay(1000); // attente de 1S
17 esc.write(180); // le moteur tourne à plein régime
18 delay(1000); // attente de 1S
19 esc.write(0); // le moteur va lire la valeur 0
20 //qui correspond à la position stop
```

Cette partie de code est généralement utiliser pour l'initialisation et la calibration de l'ESC

```
22 // Quelques informations pour l'utilisateur
23 //qui affiche à l'ouverture de port série
24 Serial.println("Saisir un nombre entre 0 et 179");
25 Serial.println("(0 = arrêt - 179 = vitesse maxi");
26 Serial.println(" démarrage a partir de 20)");
```

Ce code permet à l'utilisateur de contrôlée et varie la vitesse de moteur

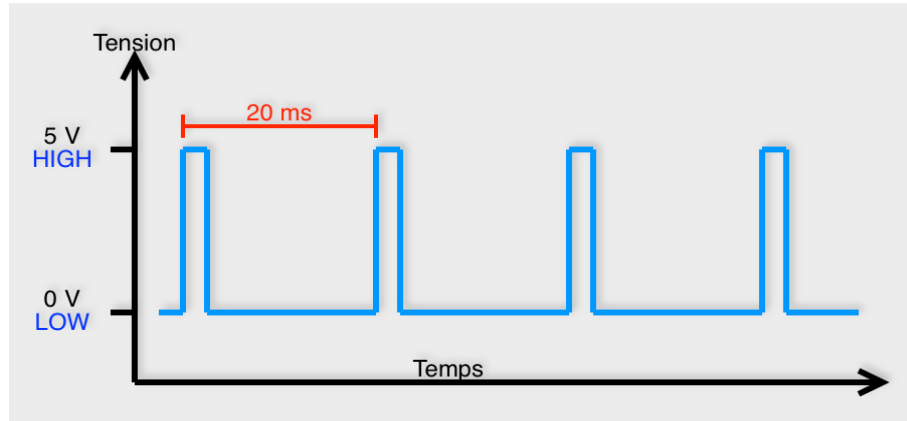
```
29 void loop() {
30   if (Serial.available() > 0) { // lire l'octet entrant
31     val = Serial.parseInt(); // lecture de la valeur passée par le port série
32     Serial.println(val); // afficher la valeur de "val" dans le moniteur série
33     esc.write(val); // le moteur se positionne selon la valeur de "val"
34     delay(15); // attente de 15ms
```

Dans la fonction « loop() » en va lire et afficher la valeur de « val » ,ainsi le moteur va positionner selon la valeur de val qui correspond à un nombres entre (0-179) saisir par l'utilisateur

## ANNEXES

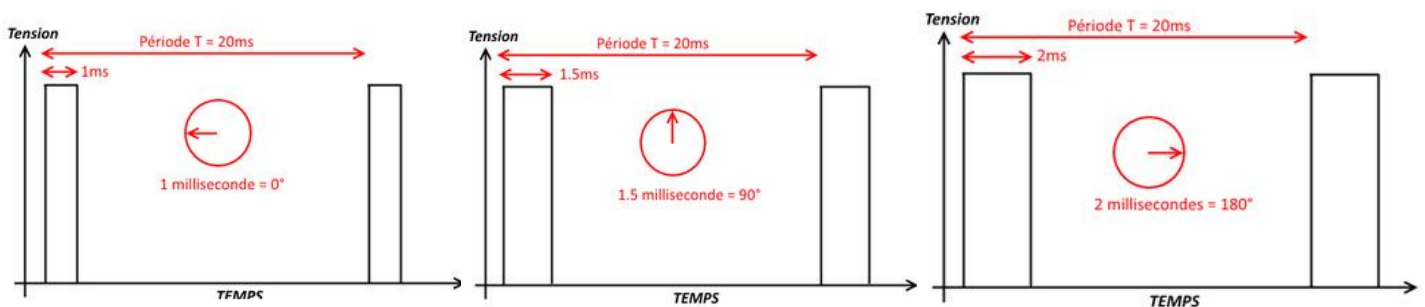
### Commande des servo-moteurs avec Arduino :

Pour commander un servo-moteur, il faut lui envoyer des trains d'impulsion électriques ce se traduit par des envois de courant électrique qui se suivent à l'intervalle et durée précis .L'intervalle de temps entre chaque impulsion appelé aussi une période



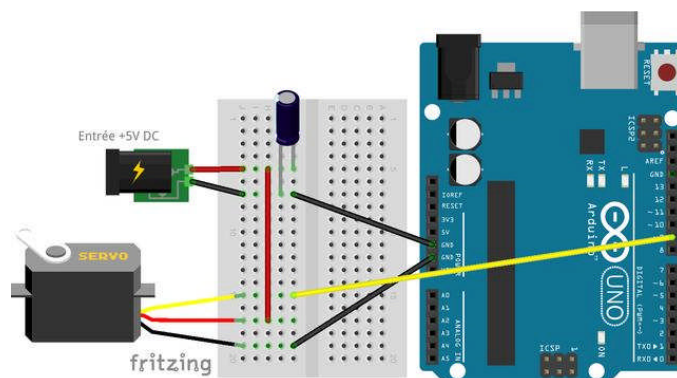
- La valeur de la tension est 5V « HIGH » et 0V « LOW » via l'Arduino
- Les impulsions sont envoyées chaque 20 millisecondes

La durée d'impulsion peut varier ; c'est grâce à elle que nous allons piloter notre servo-moteur



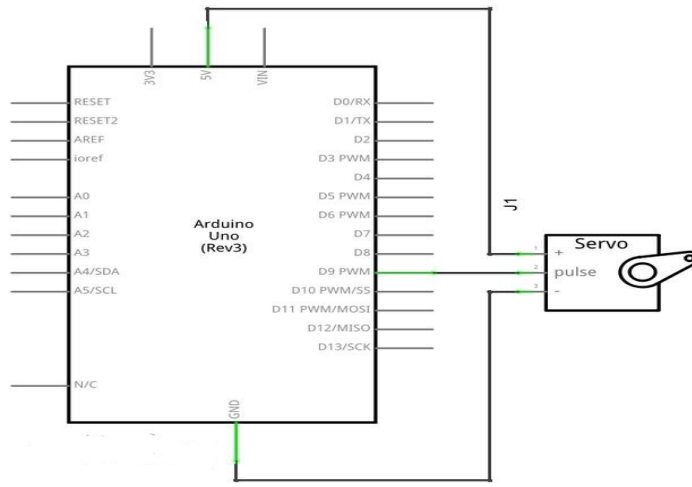
### **1.vue prototype du montage utiliser :**

Le câblage est simple : fil rouge du sevomoteur sur la broche 5v et le fil noir sur la broche GND de la carte Arduino ,le fil jaune (ou blanc) sur la broche D9 de la carte Arduino



# ANNEXES

## 2.vue schématique du montage utiliser :



## 3. Code Arduino :

En utilise un code existant dans les exemples du Arduino IDE « exemple Sweep » pour un servomoteur ,il fait des va-et-vient

```
Sweep | Arduino 1.6.10 Hourly Build 2016/05/31 11:33
Fichier Edition Croquis Outils Aide
Sweep $
1 // Exemple Sweep
2 // inclut la lib Servo pour manipuler le servomoteur
3 #include <Servo.h>
4
5 Servo myservo; // crée un objet servo pour contrôler un servo
6 // douze objets servo peuvent être créés sur la plupart des cartes
7
8 int pos = 0; // variable pour stocker la position du servo
9
10 void setup() {
11   myservo.attach(9); // attache le servo sur la broche 9 à l'objet servo
12 }
13
14 void loop() {
15   for (pos = 0; pos <= 180; pos += 1) { // va de 0 degré à 180 degré
16     // Dans les étapes de 1 degré
17     myservo.write(pos); // dites au servo de se positionner en variable "pos"
18     delay(15); // attend 15ms pour que le servo atteigne la position
19   }
20   for (pos = 180; pos >= 0; pos -= 1) { // va de 180 degré à 0 degré
21     myservo.write(pos); // dites au servo de se positionner en variable "pos"
22     delay(15); // attend 15ms pour que le servo atteigne la position
23   }
24 }
25
```

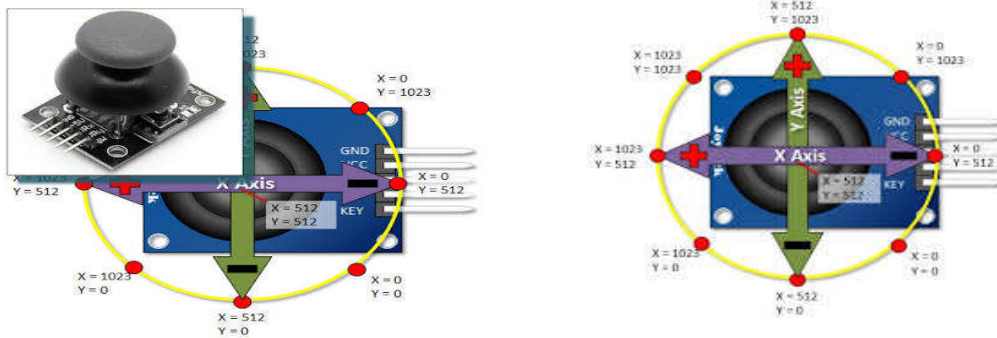
# ANNEXES

## Commandes Joystick avec Arduino :

Le module joystick comporte deux potentiomètres de 10k ohm, un pour l'axe X et l'autre pour l'axe Y et comporte également un bouton poussoir.

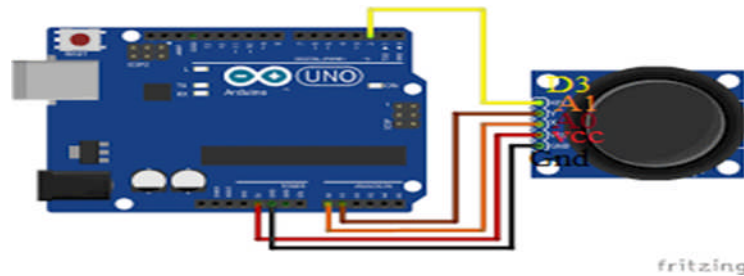
Les deux sorties de joystick délivrent une tension analogique

- $V_x=2.5\text{ V}$  et  $V_y=2.5\text{ V}$  si le joystick est au repos
- $V_x$  et  $V_y$  varient entre 1 et 4 V en fonction de la position du joystick



Ce module doit être relié à un connecteur analogique de la carte Arduino

### 1. Vue prototype de montage utiliser :



### 2. Code arduino :

Ce programme il affiche dans le moniteur série les coordonnées du joystick

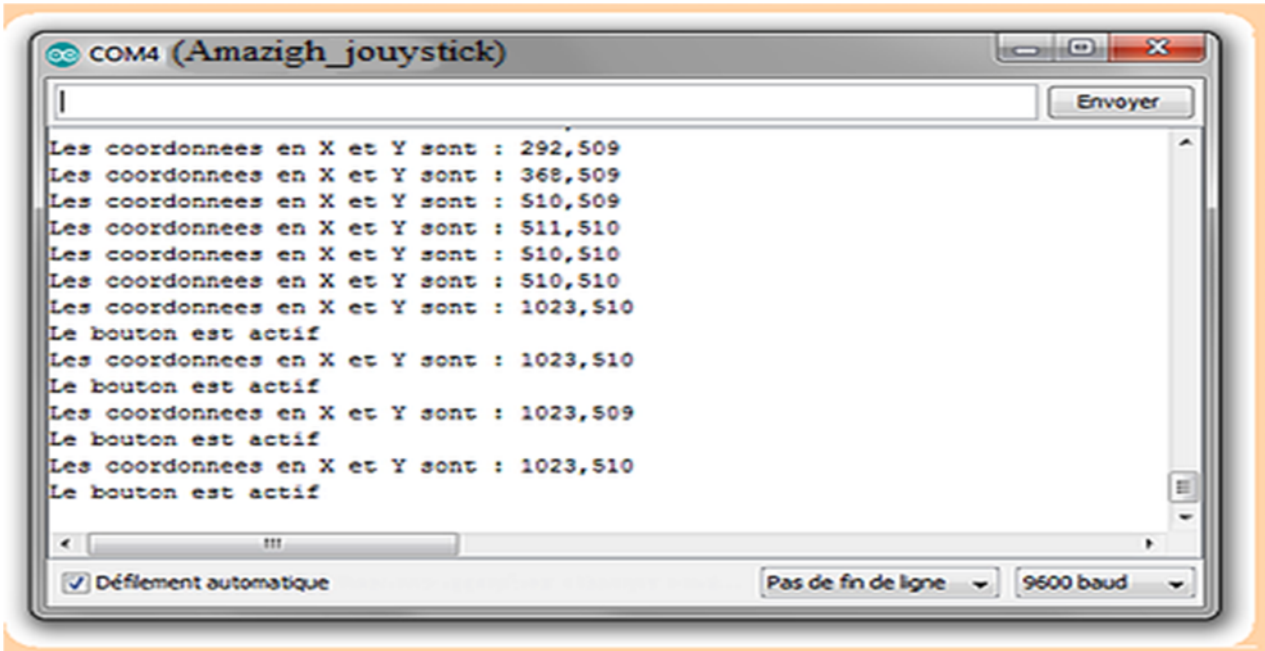
```
Amazigh_joystick | Arduino 1.6.10 Hourly Build 2016/05/31 11:33
Fichier Édition Croquis Outils Aide
Amazigh_joystick
1 #define X A0 // affectation des broches
2 #define Y A1
3
4 int joy_X;// variable pour récupérer la valeur de l'axe X
5 int joy_Y;// variable pour récupérer la valeur de l'axe Y
6
7 void setup()
8 {
9   Serial.begin(9600); // initialisation du moniteur série
10 }
11
12 void loop()
13 {
14   joy_X = analogRead(X); // acquisition de X
15   joy_Y = analogRead(Y); // acquisition de Y
16   Serial.print("Les coordonnées en X et Y sont : "); // affichage
17   Serial.print(joy_X); // afficher la valeur de l'axe X
18   Serial.print(", ");
19   Serial.println(joy_Y); // afficher la valeur de l'axe X
20   if (joy_X==1023) // si bouton est actif
21   {
22     Serial.println("Le bouton est actif"); // afficher le message
23   }
24   delay(400);
25 }
```

## ANNEXES

---

### 3. Teste de code :

Pour les testes, nous allons utiliser le moniteur série pour afficher les valeurs de deux axes de joystick et l'état de bouton



## ANNEXES

---

### Définition :

- **Servomoteur :** c'est un système qui a pour but de produire un mouvement précis en réponse à une commande.



- **Angle d'attaque :** c'est l'angle formé entre la corde qui relie le bord d'attaque avec le bord de fuite et la direction du vent qui vient d'en face.



- **Formule de l'aérodynamique :** la formule utilisée pour nos calculs est la formule de base de l'aérodynamique. Il existe d'autres pour des cas moins généralisés.
- **Dépron :** matière plastique légère fabriquée à partir de polystyrène.
- **Décrochage :** c'est le moment où l'air n'est plus laminaire sur l'aile. Il y a des tourbillons qui se forment dessus. Il n'y a par conséquent plus de portance et l'avion tombe. Cela arrive lorsque l'avion ne va pas assez vite ou lorsqu'il a un angle d'attaque trop élevé.

## Bibliographie

---

- Pedro Castillo, Rogelio Lozano and Alejandro E. Dzul, “Modelling and Control of Mini-Flying Machines”. Springer-Verlag London. 2005
- François Veysset, “Modélisation et identification de comportements de l’avion en vol turbulent par modèles à retards“,15 Dec 2006
- L. Belkoura : Identifiability of systems described by convolution equations. Automatica, 41:505-512, 2005.
- W. Charon et R. Verbrugge : Nouvelles techniques d’essais sur maquettes libres en labo-ratoire pour la détermination de caractéristiques aérodynamiques instationnaires. AGARD-CP-235, 1978.
- P. Coton : DTP Turbulence - Identification du modèle aérodynamique instationnaire. Rapport technique RT 2/06110 DCSD, ONERA, 2002.
- P. Donely: Summary of information relating to gusts loads on airplanes. Rapport technique 997, NACA, 1950. 51 p.
- R.T. Jones : The unsteady lift of a wing of finite aspect ratio. Rapport technique 681, NACA, 1940.
- P. Rebuffet : Aérodynamique expérimentale. Troisième édition, 1969.
- T. Theodorsen : General theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter. Rapport technique 496, NACA, 1935.
- D. Tristrant et P. Coton : Le B20 : un nouveau laboratoire d’analyse du vol pour l’ONERA. 2002.
- F. Veysset, L. Belkoura, P. Coton et J-P. Richard : Modélisation de la dynamique du vol longitudinal d’un avion dans la turbulence par modèles à retards. In CIFA2006, 4th IEEE Conférence Internationale Francophone d’Automatique, Bordeaux, France, May-June 2006.

## Bibliographie

---

- Astalaseven and E. etolyte, Arduino pour bien commencer en électronique et en programmation. Site de zéro, 2014.
- Philippe LOUSSOUARN, Fonctionnement et montage d'une radio-commande
- Le magazine MRA (Modèle réduit d'avions)
- Les différents conseils techniques sur <http://www.aeromodelisme.org/>
- Lourdoueix St Pierre(23), Guide du debutant en aeromodelisme
- MARIE Florian , ORTEGA Vincent, VALERY Sylvain, Dossier TPE : les avion radiocommandés , 2008-2009
- Fédération Française d'Aéro-Modélisme, INITIATION A L'AERO – MODELISME(Radio-commandé),APPROCH DE LA CONSTRUCTION, Edition juillet 2009
- Fédération Française d'Aéro-Modélisme, INITIATION A L'AERO – MODELISME(Radio-commandé), GENERALITES, Edition juillet 2009
- <http://www.wikipédia.org>
- <http://www.mrcmodelisme.com>
- <http://forums.futura-sciences.com>
- <http://forum.modelisme.com>
- <http://le-modelisme-et-lamcs.skynetblogs.be>
- <http://www.ffam.asso.fr/>
- <http://www.maketdistrib.com/>
- <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00116673v2>

### Résumer :

Notre travail consiste à réaliser un avion modèle réduit qui va être commandé à distance à travers des radios fréquences nRF24L01+ en utilisant la carte Arduino-Nano

### Mots clés :

- Avion
- Radio commande
- Arduino
- Nrf24l01+
- Voleur fixe
- Non linéaire
- Radio fréquence

# Chapitre II

## Modélisation Du Vol Pour Un Avion à Voilure Fixe

# Chapitre III

Réalisation Pratique Et Teste  
De vole

# Chapitre I

Généralité Sur

Les Radio Commandes

# Annexes

# Introduction

Conclusion

Général

# Bibliographie