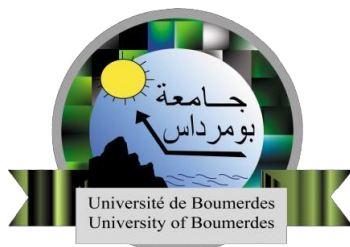


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة امحمد بوقرة بومرداس  
Université M'Hamed Bougara Bumerdes



**Faculté des Sciences de l'Ingénieur**

Département : Ingénierie des Systèmes Electriques

# Mémoire de fin d'études

Présenté par :

**Hicham AKLIL & Asma DRIDI**

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Electronique des Systèmes

Embarqués

**Thème :**

**Conception et réalisation d'un drone quadri-rotor avec  
système de sécurité des données**

Soutenu publiquement le 24/06/2018 devant le jury composé de :

Dr. GUERBAI Yasmine

MCB

**Présidente**

M<sup>elle</sup> MAHDI Ismahane

MAA

**Examinatrice**

Dr. HARRAR Khaled

MCA

**Encadreur**

Promotion : Juin 2018

# *Remerciements*

*C'est avec un grand plaisir que nous tenons tout d'abord à exprimer toute notre reconnaissance à notre cher encadreur Monsieur. Khaled Harrar, pour l'attention qu'il a apportée à notre projet et pour ces précieux conseils.*

*Nos vifs remerciements vont à Monsieur Ait amer mezianouelhadj pour le support qu'il nous a fourni toute la durée de ce mémoire et pour nous avoir recrutés au sein de l'équipe de la recherche et développement du « HB technologies ». De plus, il a fait preuve de beaucoup de flexibilité, pendant toute la durée que je faisais parti du Club Scientifique ELECTRO, sans oublier l'équipe du Club Ihab, Housseem, Nabil, Rafik, Mouhamed, Mahdi, Kenza.....etc. Nous sommes fiers d'avoir travaillé avec eux.*

*Enfin, le plus grand mérite revient au soutien de nos parents, soit moralement ou bien financièrement. C'est grâce à eux pour ce que je suis maintenant. Merci du fond de notre cœur.*

## ملخص

العمل المقدم في هذه المذكرة، هو عبارة عن مشروع التخرج لنهاية التدرج للحصول على شهادة ماستر 2 في التخصص إلكترونيك للأنظمة المدمجة تحت عنوان تصميم و تنفيذ طائرة بدون طيار ذات أربعة محركات مع نظام حماية المعلومات بين جهاز التحكم و الطائرة بدون طيار.

مرت عملية الصنع على ثلاث مراحل: المرحلة الأولى، هيكل الطائرة صنع من خشب و جهاز التحكم بأشعة تحت الحمراء، المرحلة الثانية، هيكل الطائرة من الألمنيوم و جهاز التحكم بالمتحكم بلاى ستيشن مع اتصالات التردد اللاسلكي، و في المرحلة الأخيرة، لقد قمنا بالعمل على جهاز استشعار جيروسكوب و أدخلنا في البرنامج تنظيم متناسب، محول، مكامل . لقد أطفنا كذلك ميزة حماية المعلومات بين الطائرة بدون طيار و جهاز التحكم عن بعد عبر البطاقة الذكية. هذه الطائرة بدون طيار توفر مجموعة من الميزات مثل استكشاف البيانات اليومية، خطرة والتي يتعذر الوصول إليها، فإنها تضمن أمن المعلومات التي يتم استردادها من قبل طائرة بدون طيار.

**الكلمات المفتاحية :** طائرة بدون طيار، بطاقة القيادة، جيروسكوب، البرنامج تنظيم، اتصالات التردد اللاسلكي، البطاقة الذكية.

## Résumé

Le travail présenté dans ce rapport, est dans le cadre du projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme MASTER 2 en électronique des systèmes embarqués. Il concerne la conception et la réalisation d'un drone quadri-rotor avec un système de sécurité des données.

Trois plateformes furent développées, le premier châssis en bois et la commande en infra rouge, La seconde, châssis en aluminium et la commande par manette de PlayStation avec communication radiofréquence, la dernière nous avons ajouté un capteur gyroscope et une régulation PID, avec modification sur télécommande. Nous avons ajoutée une propriété de la sécurité des données entre la télécommande et le drone avec carte à puce.

Ce drone assure un ensemble de fonctionnalités tels que l'exploration des milieux quotidiens, dangereux et inaccessibles, il assure la sécurité des informations récupéré par le drone.

**Mots-clés:** drone quadri-rotor, carte de pilotage, IMU, PID, radiofréquence, carte a puce, DES, MAC.

## Abstract

The work presented in this report is part of the graduation project for the MASTER 2 Diploma in Embedded Systems Electronics. It concerns the design and realization of a quad-rotor drone with a data security system.

Three platforms were developed, the first, wooden chassis and the infrared control, the second, aluminum chassis and PlayStation joystick control with radio frequency communication, the latest, we added gyroscope sensor and PID control in program, with modification on remote control of second version. We added a property of data security between the remote control and the drone with smart card.

This drone provides a set of features such as exploration of everyday environments, dangerous and inaccessible, it ensures the security of information retrieved by the drone.

**Keywords:** quad-rotor drone, flight control, IMU, PID, radiofrequency, smart card, DES, MAC.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>Remerciements</b> .....	I
<b>Résumé</b> .....	II
<b>Table des matières</b> .....	III
<b>Liste des figures</b> .....	VII
<b>Liste des tableaux</b> .....	X
<b>Liste des acronymes</b> .....	XI
<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Problématique</b> .....	3
<b>CHAPITRE 1 : Conception du drone Quadri-rotor</b> .....	4
1.1 Introduction.....	5
1.2 Modèles des drones .....	5
1.3 Modélisation .....	7
1.4 Principe de fonctionnement du Quadri-rotor .....	9
1.5 Définition des repères.....	10
1.6 Architecture de commande des drones .....	11
1.6.1 Approches linéaires .....	11
1.6.2 Approches non linéaires .....	11
1.6.3 Modèles de commandes selon leurs approches .....	12
1.7 Partie commande .....	12
1.7.1 Commande par régulation PID .....	12
1.7.2 Principe de la commande.....	13
1.7.3 Design de contrôle PID .....	14
1.8 Capteur utilisé pour la stabilité du drone.....	15
1.8.1 Les capteurs extéroceptifs.....	15
1.8.2 Les capteurs proprioceptifs.....	15
1.8.3 Résultats des signaux PWM du capteur MPU-6050.....	20
1.9 Conclusion .....	21
<b>CHAPITRE 2: Commande du drone</b> .....	22

2.1	Introduction.....	23
2.2	Module de la communication.....	23
2.2.1	Présentation du NRF24L01+ .....	23
2.2.2	Caractéristiques du NRF24L01+ .....	23
2.2.3	Diagramme duNRF24L01+ .....	24
2.2.4	Opérations SPI et synchronisation du NRF24L01+.....	24
2.3	Bus d’adresse SPI.....	25
2.3.1	Philosophie du bus SPI.....	26
2.3.2	Format de transfert des données.....	26
2.4	L’objectif de la télécommande.....	28
2.4.1	Principe du contrôle des moteurs BLDC avec joystick.....	28
2.4.2	Résultats des signaux PWM de la télécommande.....	29
2.5	Conclusion .....	30
<b>CHAPITRE 3: Sécurité et cryptage des données .....</b>		<b>31</b>
3.1	Introduction.....	32
3.2	Historique.....	32
3.3	Généralités sur les cartes à puce.....	32
3.3.1	Architecture des cartes à puce.....	32
3.3.2	Cartes avec contacts .....	35
3.3.3	Cartes sans contacts.....	35
3.3.4	Carte SIM.....	36
3.3.5	Normes de la carte à microcircuit .....	37
3.4	Sécurité des données.....	38
3.4.1	Authentification par clé symétrique .....	39
3.4.2	Authentification par clé asymétrique .....	40
3.5	Réponse à reset (ANSWER TO RESET ATR) .....	41
3.6	Commande APDU.....	41
3.6.1	Structure de la réponse APDU .....	42
3.6.2	Protocole de transmission.....	43
3.7	Méthode de travail.....	44
3.8	Principe de la sécurité des données entre la télécommande et le drone .....	44
3.9	Conclusion .....	45

<b>Chapitre 4: Réalisations</b> .....	46
4.1 Introduction .....	47
4.2 Présentation des pièces du drone.....	47
4.2.1 Microcontrôleur .....	47
4.2.2 Hélice.....	49
4.2.3 Moteurs BLDC.....	49
4.2.4 ESC (electronic speed controler) régulateur de vitesse électronique .....	52
4.2.5 Distributeur de puissance.....	52
4.2.6 Batterie LiPo .....	52
4.2.7 Châssis .....	53
4.2.8 Chargeur batterie LiPo .....	53
4.2.9 Radio fréquence .....	54
4.2.10 Carte à puce .....	54
4.2.11 Capteur IMU .....	55
4.2.12 Moniteurs basse tension avec alarme pour batteries LiPo 1-8S .....	55
4.3 Présentation des pièces de la télécommande .....	55
4.3.1 Joystick .....	55
4.3.2 Boutons poussoir.....	56
4.3.3 LED Indicateur de tension .....	56
4.4 Schéma électronique.....	56
4.4.1 Schéma du drone .....	56
4.4.2 Schéma de la télécommande.....	59
4.4.3 Schéma du système de suivi en temps réel.....	61
4.5 Calcul de la durée de vol .....	62
4.5.1 Calculer le poids de drone .....	62
4.5.2 Caractéristiques des moteurs .....	62
4.5.3 Rapport Poids / Poussée (Weight to Lift Ratio).....	62
4.5.4 Consommation .....	62
4.5.5 Durée de vol.....	62
4.6 Étapes de fabrication du drone.....	63
4.6.1 Première étape.....	63
4.6.2 Deuxième étape.....	63

4.6.3	Troisième étape .....	65
4.7	Test de vol.....	65
4.8	Participation aux événements et aux compétitions .....	66
4.8.1	Participation au regroupement national « Student's Camp » à SOUK AHRAS ..	66
4.8.2	Participation à la compétition scientifique « yawm el ailm » à l'université de boumerdes .....	66
4.8.3	Participation au salon national des recherches scientifique « SAFEX ».....	67
4.8.4	Participation au carrefour national « des jeunes scientifiques et des jeunes inventeurs » à Tizi ousou.....	67
4.9	Conclusion .....	68
	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>69</b>
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>70</b>

## Liste des figures

Figure 1.1 : Présentation des deux modèles de Quadri-rotors en forme de (X) et (+) .....	8
Figure 1.2 : Présentation des sens de rotation .....	8
Figure 1.3 : Mouvements du Quadri-rotors. ....	9
Figure 1.4 : Présentation de la vitesse du moteur BLDC .....	10
Figure 1.5 : Système d'axes utilisés comme référentiels .....	10
Figure 1.6 : Boucle de commande par PID.....	13
Figure 1.7 : Principe de contrôle sur notre programme .....	14
Figure 1.8 : Présentation de la relation entre capteur gyroscope, télécommande et régulateur PID.....	14
Figure 1.9 : Capteur MPU-6050.....	15
Figure 1.10 : Orientation des axes de sensibilité et polarité de rotation.....	16
Figure 1.11 : Diagramme de synchronisation du bus I2C du 1 <sup>er</sup> au 9 <sup>em</sup> cycle d'horloge [10]..	17
Figure 1.12 : Bloc diagramme du capteur MPU-6050 [10].....	17
Figure 1.13 : START et STOP Conditions [10].....	18
Figure 1.14 : Principe de reconnaissance sur le bus I2C [10].....	18
Figure 1.15 : Principe pour compléter le transfert de données I2C [10]. ....	18
Figure 1.16 : Principe de fonctionnement MPU-6050 avec moteur BLDC .....	19
Figure 1.17 : Test des signaux depuis la carte arduino mega et MPU-6050 .....	20
Figure 1.18 : Variation des signaux PWN du MPU-6050 vers la sortie de l'ESC .....	20
Figure 2.19 : Module NRF24L01+.....	23
Figure 2.20 : Diagramme d'état du contrôle radio NRF24L01+ [11].....	24
Figure 2.21 : Opération de lecture SPI du NRF24L01 [11].....	24
Figure 2.22 : Opération d'écriture SPI du NRF24L01 [11]. ....	25
Figure 2.23 : Diagramme de temporisation SPI NOP du NRF24L01 [11].....	25
Figure 2.24 : Présentation du bus d'adresse SPI .....	26
Figure 2.25 : Présentation du transfert de données lorsque CPHA = 0 [11].....	27
Figure 2.26 : Présentation du transfert de données lorsque CPHA = 1 [11].....	27
Figure 2.27 : Principe de fonctionnement du joystick avec le moteur BLDC .....	28
Figure 2.28 : Récupération des signaux depuis la carte de pilotage.....	29
Figure 2.29 : Variation des signaux PWM du joystick vers la sortie d'ESC .....	30
Figure 3.31 : Architecture typique d'une carte mémoire de type contact avec logique de sécurité [12]. ....	33
Figure 3.30 : Carte à logique câblée EPROM.....	33
Figure 3.32 : Carte à microprocesseur edahabia .....	34
Figure 3.33 : Architecture typique d'une carte à microprocesseur de type contact avec un coprocesseur [12]. ....	34
Figure 3.35 : Architecture interne d'un microcontrôleur de carte à puce.....	35
Figure 3.34 : Brochage d'une carte à puce .....	35
Figure 3.36 : Architecture typique d'une carte à microprocesseur avec un coprocesseur et une interface sans contact [14]. ....	36
Figure 3.37 : Format et contact d'une carte SIM .....	36



Figure 3.38 : L'identification Union Internationale des Télécommunications .....	37
Figure 3.39 : Authentification à l'aide de la cryptographie à clé symétrique. ....	39
Figure 3.40 : Authentification par clé publique à l'aide du crypto système Rivest Shamir Adelman.....	40
Figure 3.41 : Diagramme temporel du signal de remise à zéro et du démarrage de l'ATR, conformément à l'ISO / CEI 7816-3 (400 cycles d'horloge $\leq t_1 \leq 40\ 000$ cycles d'horloge) .....	41
Figure 3.42 : Structure APDU de commande, composée d'un en-tête (header) et d'un corps (body).....	41
Figure 3.44 : Les deux types d'APDU de réponse .....	42
Figure 3.45 : Système de classification du code de retour défini par l'ISO / CEI 7816-4.....	42
Figure 3.43 : Structure de la réponse APDU .....	42
Figure 3.46 : Classification des protocoles de transmission utilisés avec les cartes à puce de type contact .....	43
Figure 3.47 : Temps de transmission des données pour certaines commandes typiques avec le protocole T = 1 2 bits d'arrêt et 8 octets de données par commande (C = commande, R = réponse).....	44
Figure 3.48 : Principe de la sécurité des données entre la télécommande et le drone .....	44
Figure 3.49 : Exemple d'un signaleur du command, réponse et temps de réponse .....	45
Figure 3.50 : Exemple de vérification de commande, réponse et temps de réponse .....	45
Figure 4.51 : Microcontrôleur .....	47
Figure 4.52 : Bloc diagramme de l'ATmega328/p .....	48
Figure 4.53 : L'instruction parallèle est récupérée et exécutée .....	48
Figure 4.54 : Opération ALU à cycle unique.....	49
Figure 4.56 : Hélice cw et ccw.....	49
Figure 4.55 : Les hélices .....	49
Figure 4.57 : Diagramme du moteur BLDC [16].....	50
Figure 4.58 : Moteur BLDC.....	50
Figure 4.59 : Capteur du moteur BLDC triphasé en fonction du temps d'entraînement .....	51
Figure 4.60 : Caractéristiques et spécifications du moteur BLDC air 2213 920 KV .....	51
Figure 4.61 : ESC Contrôle de vitesse électronique.....	52
Figure 4.62 : Distributeur de puissance .....	52
Figure 4.63 : Batterie LiPo S4 .....	53
Figure 4.64 : Châssis du drone.....	53
Figure 4.65 : Chargeur batterie LiPo.....	54
Figure 4.66 : Radio fréquence NRF24L01+ .....	54
Figure 4.67 : Carte à puce SIM.....	54
Figure 4.69 : Moniteur de voltage .....	55
Figure 4.68 : Capteur IMU baromètre.....	55
Figure 4.70 : Joystick.....	56
Figure 4.71 : Bouton poussoir.....	56
Figure 4.72 : LED indicateur de tension.....	56
Figure 4.73 : schéma d'interconnexions des éléments du drone.....	57
Figure 4.74 : Schéma électronique de la carte de pilotage .....	58
Figure 4.76 : Schéma d'interconnexions des éléments de la télécommande .....	59

Figure 4.75 : Conception de la carte de pilotage.....	59
Figure 4.77 : Schéma électronique de la carte de télécommande .....	60
Figure 4.78 : Conception de la carte mère de la télécommande .....	61
Figure 4.79 : Schéma d'interconnexions les éléments du système de suivi en temps réel .....	61
Figure 4.80 : 1er prototype de drone .....	63
Figure 4.81 : Deuxième prototype de drone .....	64
Figure 4.82 : Troisième prototype de drone.....	65
Figure 4.83 : 1er test de vol .....	66
Figure 4.84 : Participation et obtention de la1 <sup>ère</sup> place à la compétition « yawm el ailm » .....	67
Figure 4.85 : Participation et obtention de la1 <sup>ère</sup> place à la compétition nationale « SAFEX » .	67
Figure 4.86 : Participation au carrefour national à Tizi Ouzou .....	68

## Listedes tableaux

Tableau 1.1 : Presentation des differents modèles des drone .....	7
Tableau 1.2 : Appellation des mouvements pour différents degrés de liberté.....	8
Tableau 1.3 : Classification des commandes selon leurs approches .....	12
Tableau 1.4 : Influence de l'augmentation des paramètres du PID sur le comportement du système en boucle fermée .....	14
Tableau 1.5 : Abréviations utilisées dans les figures 1.13, 1.14, 1.15 [10]. .....	19
Tableau 2.6 : Abréviations utilisées dans les Figures 2.21, 2.22, 2.23 [11]. .....	25
Tableau 3.7 : Désignations de contact et fonctions spécifiées dans les parties 2, 3, 10 et 12 de l'ISO / CEI 7816 [12].....	37
Tableau 4.8 : Présentation des caractéristiques du microcontrôleur ATmegas328/p .....	47

## Liste des acronymes

<b>ADC</b>	Analog <b>D</b> igital <b>C</b> onverter
<b>APDU</b>	Application <b>P</b> rotocol <b>D</b> ata <b>U</b> nit
<b>ATR</b>	Answer <b>T</b> o <b>R</b> eset
<b>BLDC</b>	Brushless <b>D</b> irect <b>C</b> urrent
<b>CAD</b>	Chip <b>A</b> ccepting <b>D</b> evice
<b>CLK</b>	Clock
<b>CPU</b>	Central <b>P</b> rocessing <b>U</b> nit
<b>CCW</b>	Conter <b>C</b> lock <b>W</b> ise
<b>CW</b>	Clock <b>W</b> ise
<b>DES</b>	<b>D</b> ata <b>E</b> ncryption <b>S</b> tandard
<b>E / S</b>	Entré / <b>S</b> ortie
<b>ESC</b>	Electronic <b>S</b> peed <b>C</b> ontroler
<b>EEPROM</b>	Electrically- <b>E</b> rasable <b>P</b> rogrammable <b>R</b> ead- <b>O</b> nly <b>M</b> emory
<b>EPROM</b>	<b>E</b> rasable <b>P</b> rogrammable <b>R</b> ead- <b>O</b> nly <b>M</b> emory
<b>I2C</b>	Inter- <b>I</b> ntegrated <b>C</b> ircuit
<b>I / O</b>	<b>I</b> n/ <b>O</b> ut
<b>IATA</b>	International <b>A</b> ir <b>T</b> ransport <b>A</b> ssociation
<b>IMSI</b>	International <b>M</b> obile <b>S</b> ubscriber <b>I</b> dentify
<b>IMU</b>	Inertial <b>M</b> easurement <b>U</b> nit
<b>INTAMIC</b>	<b>I</b> nternational <b>A</b> ssociation for <b>M</b> icrocircuit <b>C</b> ard
<b>ISO</b>	International <b>O</b> rganization for <b>S</b> tandardization
<b>GND</b>	<b>G</b> round
<b>GSM</b>	<b>G</b> lobal <b>S</b> ystem for <b>M</b> obile
<b>LED</b>	<b>L</b> ight- <b>E</b> mitting <b>D</b> iode
<b>LIPO</b>	<b>L</b> ithium <b>P</b> olymer

<b>MEMS</b>	<b>Micro ElectroMechanicalSystems</b>
<b>PCB</b>	<b>Printed CyrcuitBoard</b>
<b>PID</b>	<b>Proportional Integrator Derivator</b>
<b>PVC</b>	<b>PolyVinylChloride</b>
<b>PWM</b>	<b>Pulse Width Modulation</b>
<b>RAM</b>	<b>Random Access Memory</b>
<b>RF</b>	<b>Radio Fréquence</b>
<b>ROM</b>	<b>Read-Only Memory</b>
<b>RPM</b>	<b>Revolutions PerMinute</b>
<b>RST</b>	<b>Reset</b>
<b>SIM</b>	<b>Subscriber Identity Module</b>
<b>SISO</b>	<b>Single Input - Single Output</b>
<b>UAV</b>	<b>UnmannedAerialVehicle</b>
<b>UIT</b>	<b>Union Internationale des Télécommunications</b>
<b>UMTS</b>	<b>Universal Mobile Telecommunications System</b>
<b>USB</b>	<b>Universal Serial Bus</b>

# **INTRODUCTION GENERALE**

---

# Introduction Générale

---

Un drone ou UnmannedAerialVehicle (UAV) est un aéronef sans passager ni pilote qui peut voler de façon autonome ou être contrôlé à distance depuis le sol. Le mot « drone » est une extrapolation d'un terme anglais qui signifie « faux-bourdon » en français, le terme est employé pour désigner des véhicules aériens, terrestres, de surface ou sous-marins, alors que la classification anglo-saxonne distingue chaque type d'appareil [1].

La première utilisation de drone dans l'histoire remonterait à juillet 1849, lorsque l'armée autrichienne envoya plusieurs ballons sans pilote munis de bombes à retardement au-dessus de la ville de Venise. Cet événement, qui passa presque inaperçu à l'époque, marqua pourtant un véritable tournant dans la façon de mener une guerre. Malgré quelques apparitions durant les premières et secondes guerres mondiales, ce n'est qu'à partir de la première guerre du Golfe en 1990 que l'intérêt pour les véhicules aériens autonomes a pris de l'ampleur. De nos jours, grâce aux nombreuses avancées techniques et technologiques, les drones sont de plus en plus performants et permettent de réaliser diverses missions, aussi bien civiles que militaires. Quoiqu'il en soit, la conception d'un système aérien autonome nécessite toujours une certaine expertise dans de nombreux domaines de l'ingénierie [2].

Le cadre dans lequel s'inscrit ce projet de fin d'études c'est la conception et la réalisation d'un drone quadri-rotor avec un système de sécurité des données. Pour atteindre notre objectif plusieurs techniques sont mise en œuvre, à savoir le pilotage, la télécommande, le cryptage des données, etc. Ce mémoire est composé de 4 chapitres :

## **CHAPITRE 1 : DroneQuadri-rotors**

Une description du principe de fonctionnement du drone quadri-rotor est présentée avec ses mouvements possibles ainsi que les modes de vol (tangage, roulis, lacet) correctes.

Un ensemble de repères doivent être donnés avant d'essayer de modéliser le quadri-rotor, ceci est expliqué dans ce chapitre.

Enfin, nous présentons le modèle de commande par la régulation PID et l'information récupéré par (IMU) centrales inertielle basées sur le capteur gyroscope de la technologie (MEMS – MicroElectronicMechanical System).

## **CHAPITRE 2 : Commande du drone**

Ce chapitre est consacré à la conception et le principe de fonctionnement de la télécommande de notre Quadri-rotors. Nous présentons le circuit électronique et l'architecture de la carte mère (PCB) de la télécommande.

## **CHAPITRE 3 : Sécurité et cryptage des données**

Dans ce chapitre nous proposons une configuration plus moderne, qui est en cours de développement par des chercheurs universitaires, et secteur militaire. Nous allons présenter la valeur ajoutée pour notre drone par rapport à ceux existants sur le marché mondial. Notre apport

# Introduction Générale

---

ici concerne la sécurité des données entre la télécommande et la carte de pilotage ainsi que l'utilisation d'une carte à puce.

## **CHAPITRE 4 : Réalisations**

Ce chapitre est consacré aux différentes étapes de la réalisation, les problèmes et les solutions proposées pour chaque étape.

Nous présenterons les différents composants électroniques que nous avons utilisés dans notre projet, ainsi que les logiciels et les langages de programmation que nous avons utilisés pour la réalisation de notre drone.

Une conclusion et des perspectives vont terminer notre mémoire.



# Problématique

---

## Problématique

Malgré les progrès du développement que connaissent les drones, notamment dans le domaine militaire et civil, sauf qu'ils manquent en termes de protection de l'information et de signaux de contrôle.

Même si le drone est équipé d'une caméra pour traiter les vidéos et qu'il est en mesure d'envoyer et de recevoir un flux de vidéos en temps réel pour exécuter une tâche bien précise, ceci requiert l'intervention humaine de surveillance en permanence et les retards des informations pour prendre des décisions .

## Solution proposée

Sur cette base, nous avons proposé un ensemble de solutions, à savoir effectuer une étude sur le drone de type quadri-rotor X (Carte de pilotage et Télécommande) avec un contrôle linéaire de type PID. En plus la réalisation d'une carte mère entre l'émetteur (télécommande) et le drone (carte de pilotage) pour le cryptage des données et les signaux échangés par une carte à puce, que nous avons développée avec l'équipe de recherche scientifique et de développement de la société HB Technologie.

De plus, le système de poursuite sera amélioré en temps réel grâce à une caméra connectée à une carte de développement Raspberry pi 3. Ce dernier est également équipé d'un système pour la poursuite d'objets en temps réel et ajusté d'un laser pour déterminer l'objet à suivre.

# **CHAPITRE 1**




## **CONCEPTION D'UN DRONE QUADRI- ROTOR**

## 1.1 Introduction

Ce chapitre porte sur les modèles des drones et sur le domaine d'utilisation (civil ou militaire). Dans un premier temps, nous présentons le principe de fonctionnement d'un drone de type Quadri-rotor X, et les repères de référence nécessaires pour l'orientation du quadri-rotor. Dans un deuxième temps, nous définissons la centrale inertielle pour l'équilibrage du drone en utilisant le modèle de régulation PID. Dans un troisième temps nous définissons le capteur gyroscope et son principe de fonctionnement.

## 1.2 Modèles des drones

Il existe plusieurs modèles des drones utilisés dans différents domaines. Nous allons présenter les différents modèles des drones dans le tableau 1.1.

Modèle	Description	L'image
Drones MALE	ayant une autonomie d'une trentaine d'heures et évoluant entre 5 000 et 15 000 mètres d'altitude	
Drones HALE	Le drone HALE ayant une autonomie de plusieurs jours pour certains et évoluant à plus 20 000 mètres d'altitude	
Drones TUAV	ayant une autonomie d'une dizaine d'heures et évoluant à moins de 5 000 mètres d'altitude	

Drone sous-marin

Ce type de drone est utilisé à des fins exploratoires et de recherche scientifique dans les mers.



Drone octa-copter

Drone a huit bras chacun relié à un moteur, l'avant de ce drone a tendance à être entre deux bras



Octa-copter X8

Un design X8 est un type d'octa-copter mais au lieu de huit bras, il possède quatre bras de support avec deux moteurs de chaque côté du bras.



Hexa-copter

Drone a six bras chacun relié à un moteur, l'avant de ce drone a tendance à être entre deux bras



Hexa-copter Y6

Un design Y6 est un type d'hexa copter mais au lieu de six bras, il possède trois bras de support avec deux moteurs de chaque côté du bras.



Quad-copter

Drone a quatre bras chacun relié à un moteur, l'avant de ce drone a tendance à être entre deux bras (configuration x) mais peut être également doté d'un bras (configuration +)



Tri-copter

Ce modèle a trois bras reliés chacun à un moteur, l'angle entre chaque bras est de 120 degrés.



Hélicoptères

Ce modèle avec un seul moteur au centre de gravité de drone et l'autre à l'extrémité de l'aile arrière pour l'orientation.



**Tableau 1.1** : Presentation des differents modèles des drone

### 1.3 Modélisation

La conception du contrôleur PID nécessite une modélisation préalable du système pour connaître son comportement. Quadri-rotors ont leurs quatre hélices placées sur les extrémités d'une structure en forme de croix X. Pour maintenir l'équilibre du couple global, une paire de rotors tourne dans le sens des aiguilles d'une montre tandis que la paire restante tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. La vitesse de chaque rotor est contrôlée indépendamment pour générer la poussée et le couple nécessaire pour déplacer l'avion. Selon l'orientation du mouvement, il existe deux modèles de Quadri-rotors, forme X et forme +(figure 1.1).

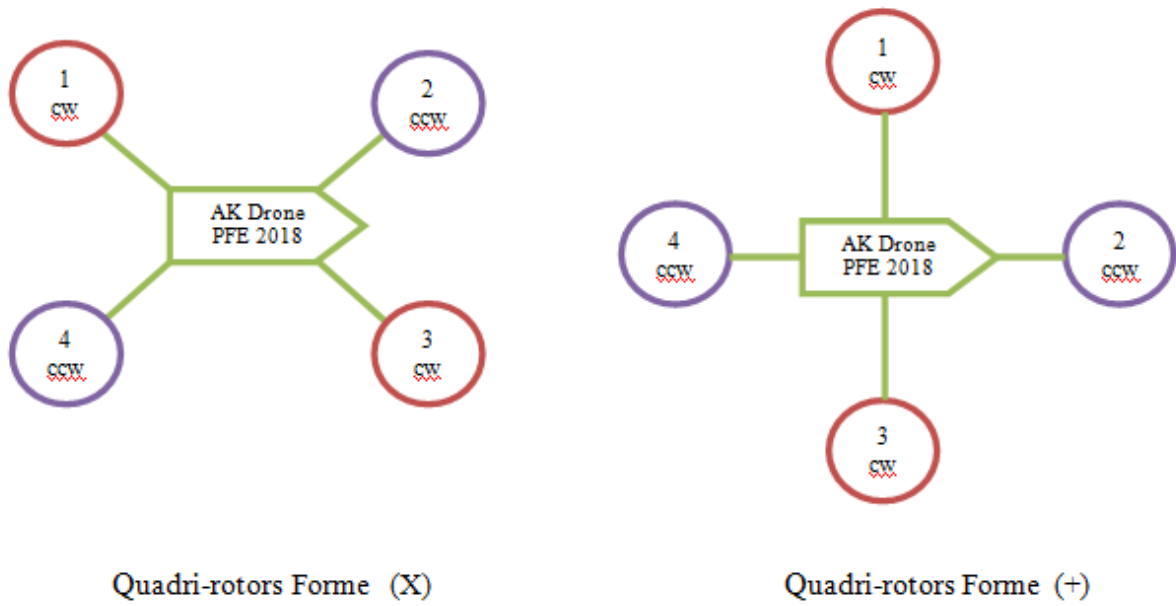


Figure 1.1 : Présentation des deux modèles de Quadri-rotors en forme de (X) et (+)

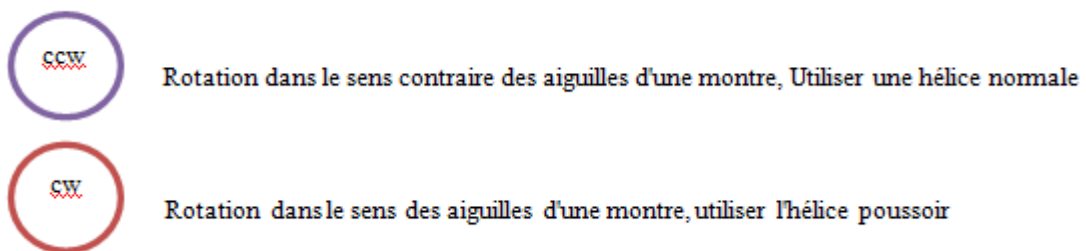


Figure 1.2 : Présentation des sens de rotation

Degré de liberté	Mouvement en français	Mouvement en anglais
<i>Translation Z</i>	Poussée/Gaz	Throttle
<i>Rotation selon X</i>	Roulis	Roll
<i>Rotation selon Y</i>	Tangage	Pitch
<i>Rotation selon Z</i>	Lacet	Yaw

Tableau 1.2 : Appellation des mouvements pour différents degrés de liberté

### 1.4 Principe de fonctionnement du Quadri-rotor

Le mode "X" est utilisé dans le présent projet, et les rotors dans ce mode sont identifiés comme, ② et ③ Frontal, ③ et ④ Droite, ④ et ① Arrière, ① et ② Gauche. De cette façon, les entrées du système sont définies comme la poussée verticale, le roulis, le tangage et le lacet ( $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$ ,  $u_4$ , respectivement). La poussée verticale ( $u_1$ ) est produite lorsque les quatre rotors augmentent ou diminuent leur vitesse de la même quantité. Le mouvement de roulis ( $u_2$ ) est produit quand ① et ② augmente sa vitesse et ④ et ③ diminue sa vitesse (ou vice versa), tous deux de la même quantité, de sorte que le couple global reste nul et la poussée maintient sa valeur. Le mouvement de tangage ( $u_3$ ) est similaire au roulis mais avec la paire de rotor restante (① et ④, ② et ③). Pour le mouvement de lacet ( $u_4$ ), la paire de rotors dans le sens des aiguilles d'une montre (① et ③)[3, 4, 5].

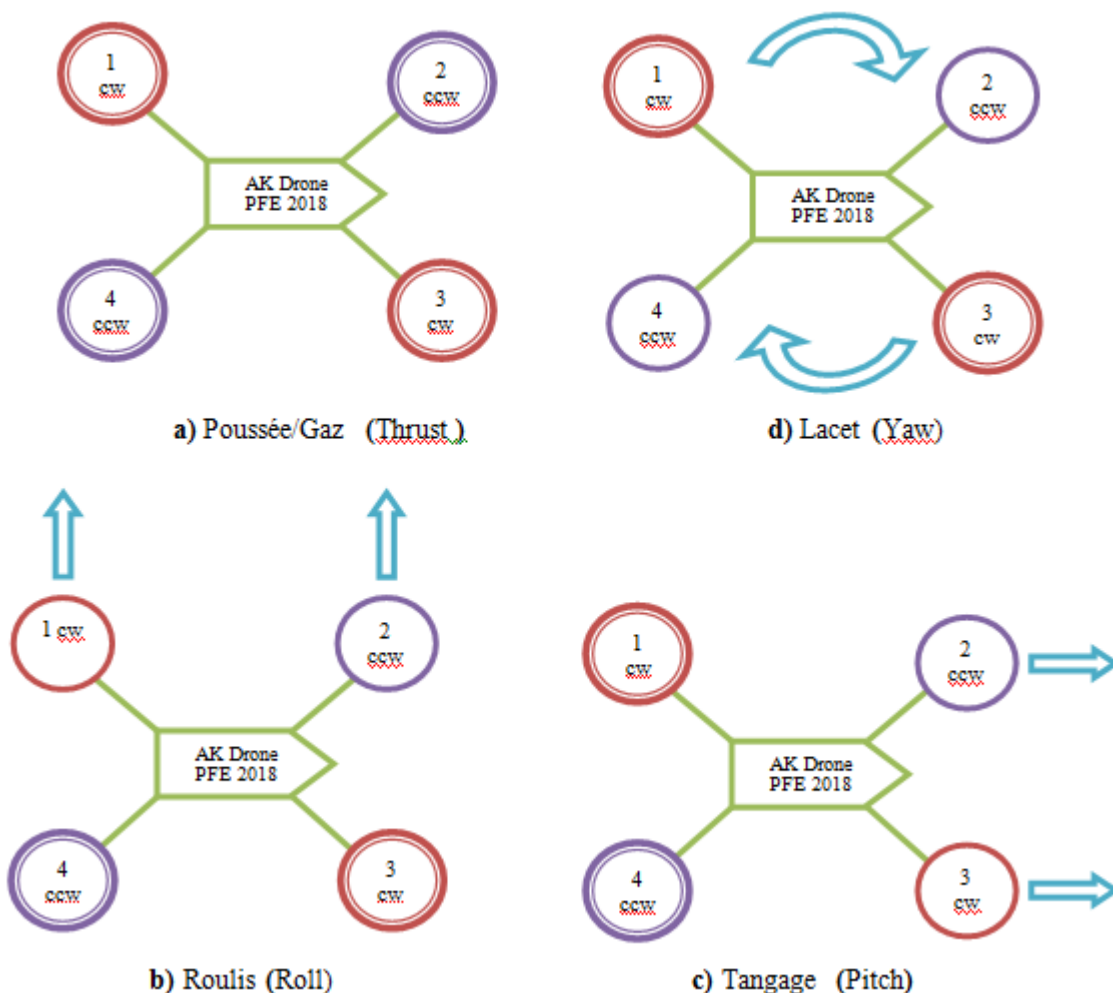


Figure 1.3 : Mouvements du Quadri-rotors.

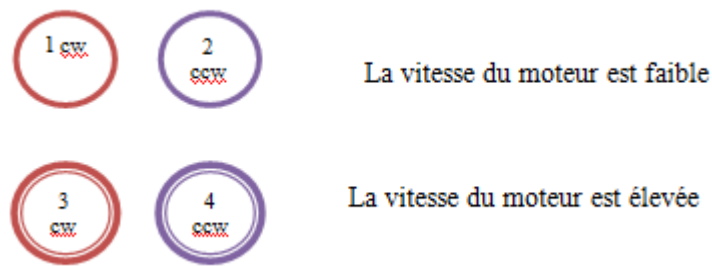


Figure 1.4 : Présentation de la vitesse du moteur BLDC

### 1.5 Définition des repères

Pour décrire la dynamique de vol du Quadri-rotors (figure1.5), un ensemble de repères de base et notations doivent être définis. Le premier repère est le repère inertiel ou repère de référence. Ce repère inertiel est lié à la terre.

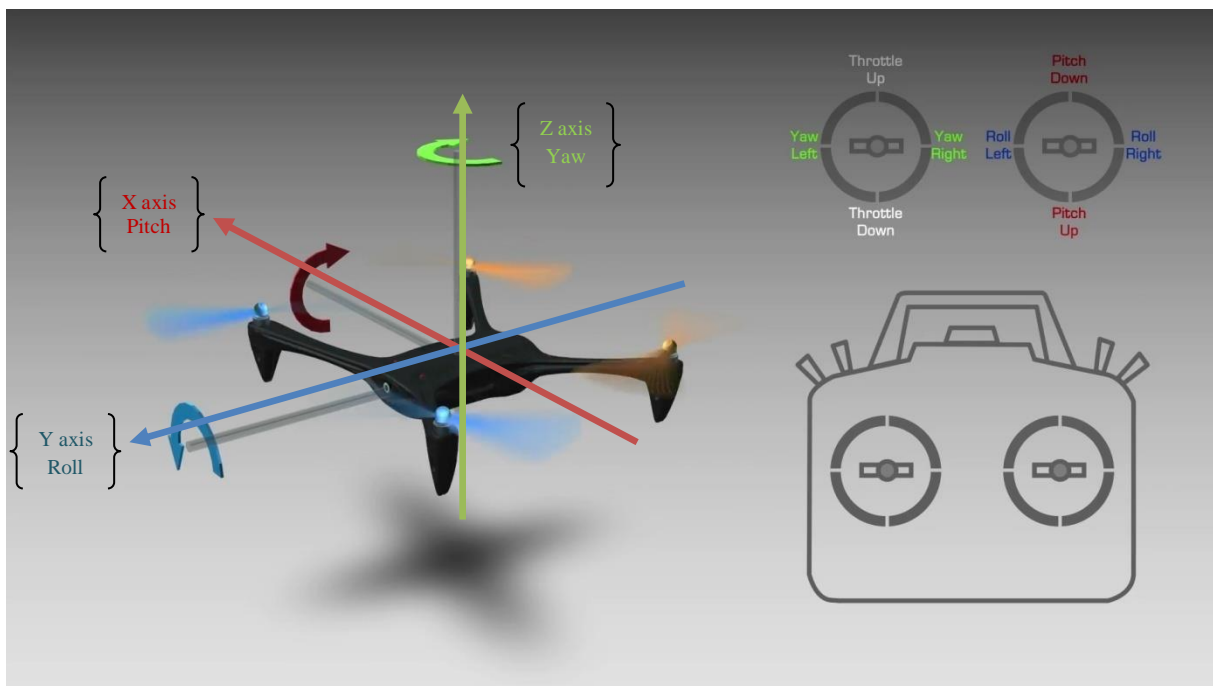


Figure 1.5 : Système d'axes utilisés comme référentiels



## 1.6 Architecture de commande des drones

Les drones possèdent quelques caractéristiques spécifiques qui rendent difficile la conception d'algorithmes de commande. En effet, ces appareils, et plus particulièrement les drones à voilure tournante, sont des systèmes sous-actionnés, sensibles aux perturbations aérodynamiques et dont la dynamique est fortement non linéaire. Cette dernière présente de plus un degré de couplage important entre les différentes variables d'état du système et ses entrées de commande. Ayant pour objectif de diminuer, voire de supprimer ces effets indésirables [2].

L'enjeu de la fonction de guidage est de définir les signaux de commande à envoyer aux différents actionneurs pour permettre à un véhicule d'adopter un comportement désiré. La fonction de pilotage sert quant à elle à concrétiser, via les actionneurs, les consignes exprimées par le guidage pour stabiliser l'appareil. Ces deux fonctions se placent donc entre l'humain et le système, en interprétant à la fois les consignes issues d'un utilisateur et les informations issues de différents capteurs dans le but de garantir un comportement en boucle fermée performant [2].

De manière générale, les différentes stratégies de commande sont classées comme étant linéaires ou non linéaires. Cette classification repose sur la représentation mathématique du véhicule qui est utilisée par la synthèse du système de commande. Les commandes dites linéaires sont très populaires car leur conception et leur exécution sont relativement simples, ce qui fait qu'elles ont été intégrées sur la majorité des véhicules aériens autonomes [9].

A l'inverse, l'implémentation des commandes dites non linéaires sur les drones est assez limitée, mais elles sont très appréciées pour leur contribution théorique.

### 1.6.1 Approches linéaires

Dans le cadre de la théorie des systèmes linéaires, la synthèse de la commande est basée sur une approximation linéaire du modèle dynamique du véhicule. Cette approche permet de découpler cette dynamique en quatre boucles de type SISO (de l'anglais Single Input - Single Output), associée à une seule entrée de commande. Généralement les quatre boucles décrivent la position ou la vitesse longitudinale du drone, sa position ou sa vitesse latérale, sa position ou sa vitesse verticale et son orientation autour de son axe vertical. L'approche linéaire facilite l'étude de la stabilité de chaque boucle dans le sens où il existe certains indicateurs comme la marge de gain et la marge de phase. Ces marges déterminent la quantité admissible de gain et de phase pouvant être injectée par la commande tout en conservant la stabilité de la boucle [2].

### 1.6.2 Approches non linéaires

Dans la plupart des applications, la commande embarquée est basée sur un modèle linéarisé de la dynamique du véhicule considéré. Cependant ces dernières années, de plus en plus de recherches se sont orientées vers des commandes basées sur une représentation non linéaire de la dynamique des véhicules aériens. Ces approches non linéaires apportent une contribution théorique certaine mais leur application, de part la complexité des modèles et des algorithmes de commande, reste toutefois limitée. Les architectures de commande non linéaire les plus utilisées pour le pilotage et le guidage des drones sont maintenant présentées [2].

### 1.6.3 Modèles de commandes selon leurs approches

Approches linéaires	Approches non linéaires
Commande par PID	Commande par linéarisation entrée - sortie
Commande par placement de pôles	Commande par backstepping
Commande linéaire quadratique	Commande hiérarchique
Commande linéaire quadratique gaussienne	Commande par saturations imbriquées
Commande $h_\infty$	Commande par modes glissants
Commande prédictive	Commande par logique floue
Commande par séquencement de gains	Commande adaptative
	Commande tolérante aux défauts
	Commande par platitude
	Commande H1 non linéaire
	Commande prédictive non linéaire
	Commande par asservissement visuel

**Tableau 1.3** : Classification des commandes selon leurs approches

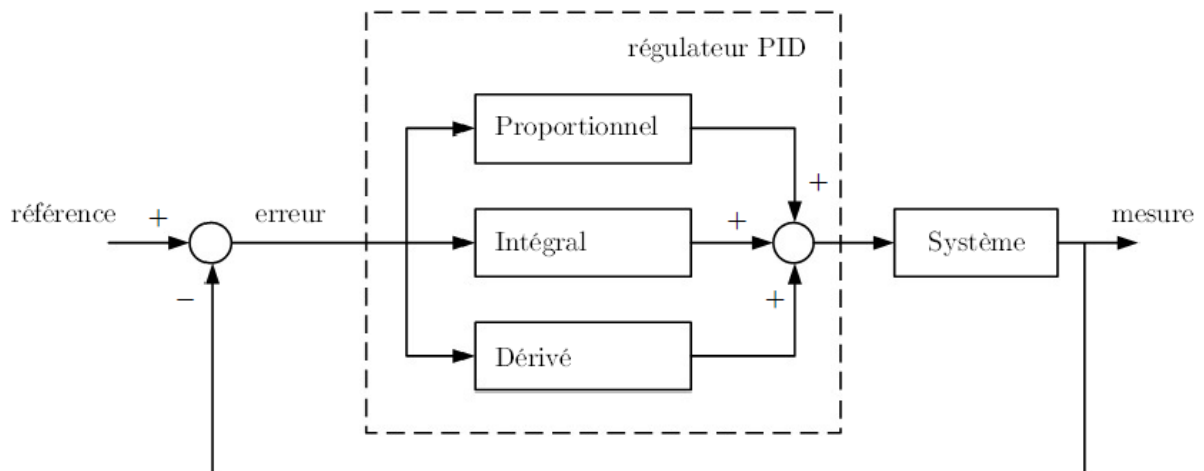
Dans notre cas nous avons choisi la commande linéaire PID car c'est la plus utilisée et la plus simple.

## 1.7 Partie commande

Malgré les avantages des Quadri-rotors, comme d'autres aéronefs, ce sont des systèmes extrêmement instables, et tout déséquilibre dans leur mouvement (surtout en roulis et en tangage) génère des accélérations angulaires et linéaires qui peuvent causer une collision si elles ne sont pas compensées rapidement. De plus, le système de Quadri-rotors est non linéaire et les mouvements sont couplés les uns aux autres. Les contrôleurs PID offrent une solution simple mais efficace pour stabiliser l'avion car ils permettent de traiter chaque variable indépendamment dans une plage limitée dans laquelle le comportement du quadri-rotor est approximativement linéaire [6,7].

### 1.7.1 Commande par régulation PID

La commande par régulation PID (pour Proportionnelle - Intégrale - Dérivée) est certainement la structure de commande la plus couramment utilisée dans l'industrie. Elle s'est en effet imposée dans plus de 90 % des architectures de commande, dont la plupart ne sont constituées que des actions proportionnelle et intégrale. La prévalence de cette approche vient, au-delà de sa simplicité, des performances qu'elle offre aux systèmes pilotés en boucle fermée, quel que soit leur domaine d'application [9].



**Figure 1.6 :** Boucle de commande par PID

### 1.7.2 Principe de la commande

L'idée centrale de ce type de régulateur est de délivrer un signal de commande à partir de la différence entre une consigne  $y_{ref}$  et une mesure  $y$ .

Soit  $e$  l'écart entre  $y_{ref}$  et  $y$  défini par :

$$e = y_{ref} - y \quad (1.1)$$

L'expression du signal de commande  $u$  généré par un correcteur PID est donnée dans le domaine temporel par :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.2)$$

Le signal de commande est donc la somme de trois termes : un terme proportionnel à l'erreur, un terme proportionnel à l'intégrale de l'erreur et un terme proportionnel à la dérivée de l'erreur. Les parties intégrale, proportionnelle et dérivée pouvant être considérées comme des actions de commande basées sur le passé, le présent et le futur respectivement. L'adaptation de la commande  $u$  aux exigences du système en boucle fermée se fait en sélectionnant de façon appropriée le gain proportionnel  $K_p$ , le gain intégral  $K_i$  et le gain dérivé  $K_d$ . Le tableau 1.4 indique le comportement de la boucle fermée lorsque les paramètres augmentent indépendamment les uns des autres. Cependant, il n'existe pas de méthode unique pour déterminer ces paramètres et il est alors nécessaire de réaliser des compromis entre durée du régime transitoire, dépassement, erreur statique et robustesse [8].

Paramètre	Temps de montée	Temps de stabilisation	Dépassement	Erreur statique
$K_P$	diminue	augmente	augmente	diminue
$K_I$	diminue	augmente	augmente	annule
$K_D$	–	diminue	diminue	–

Tableau 1.4 : Influence de l'augmentation des paramètres du PID sur le comportement du système en boucle fermée

### 1.7.3 Design de contrôle PID

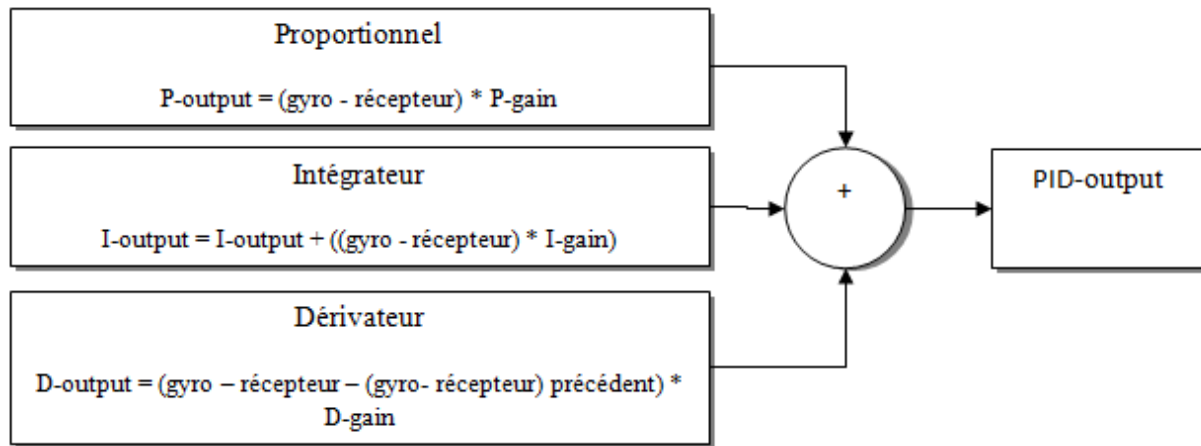


Figure 1.7 : Principe de contrôle sur notre programme

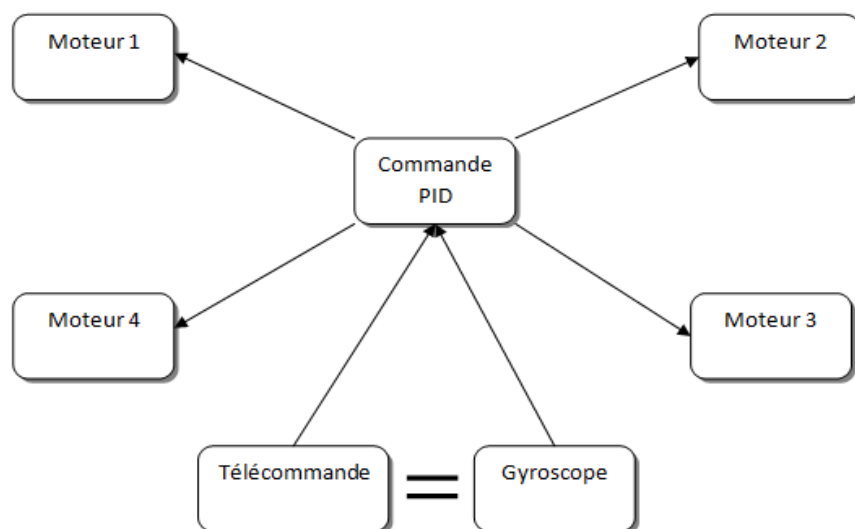


Figure 1.8 : Présentation de la relation entre capteur gyroscope, télécommande et régulateur PID

## 1.8 Capteur utilisé pour la stabilité du drone

Tous les capteurs utilisés dans le domaine de la robotique mobile fournissent des informations appartenant à l'une des deux grandes catégories d'informations : les informations proprioceptives et les informations extéroceptives [9].

### 1.8.1 Les capteurs extéroceptifs

#### 1.8.1.1 Les systèmes de positionnement par satellites

Le système de positionnement par satellites le plus connu et le plus répandu est certainement le système GPS (de l'anglais Global Positioning System), développé et contrôlé par les Etats-Unis d'Amérique [9].

### 1.8.2 Les capteurs proprioceptifs

#### 1.8.2.1 Les gyroscopes

Par définition, un gyroscope est un appareil qui, fixé à un mobile ou à tout autre objet, permet d'effectuer une mesure de la rotation absolue de ce dernier autour d'un axe. Par conséquent, trois gyroscopes sont nécessaires pour déterminer les trois rotations selon les trois axes orthogonaux de l'espace. Le fonctionnement de ces capteurs repose sur des effets mécanique, piézoélectrique ou encore optique [9].

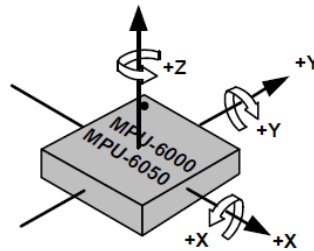
Le capteur que nous avons choisi est MPU-6050. C'est un gyroscope accéléromètre à trois axes présenté dans la figure 1.9.



Figure 1.9 : Capteur MPU-6050

#### 1.8.2.2 Présentation du capteur MPU-6050

Les dispositifs MPU fournissent la première solution intégrée de processeur de mouvement à 6 axes au monde qui élimine le désalignement de l'axe transversal du gyroscope et de l'accéléromètre associé aux solutions discrètes. Les appareils combinent un gyroscope à trois axes et un accéléromètre à trois axes sur la même puce en silicium avec un processeur de mouvement numérique (DMP™) (Digital Motion Processor™) capable de traiter des algorithmes complexes de fusion de capteurs à 9 axes utilisant le MotionFusion™ breveté.



**Figure 1.10** : Orientation des axes de sensibilité et polarité de rotation

Les algorithmes MotionFusion à 9 axes intégrés du MPU-6000 et du MPU-6050 accèdent à des magnétomètres externes ou à d'autres capteurs via un bus maître I2C auxiliaire, permettant aux dispositifs de rassembler un ensemble complet de données de capteur sans intervention du processeur système[10].

#### 1.8.2.2.1 Caractéristiques du MPU-6050

Le gyroscope MEMS à trois axes du MPU-60X0 comprend un large éventail de caractéristiques:

- Capteurs de vitesse angulaire (gyroscopes) à axe X, Y et Z à sortie numérique avec une plage de pleine échelle programmable par l'utilisateur de  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$  et  $\pm 2000$  ° / s
- Le signal de synchronisation externe connecté à la broche FSYNC prend en charge la synchronisation de l'image, de la vidéo et du GPS
- Les ADC 16 bits intégrés permettent l'échantillonnage simultané des gyroscopes
- Le biais amélioré et la stabilité de la température de sensibilité réduisent le besoin d'étalonnage de l'utilisateur
- Amélioration de la performance du bruit à basse fréquence
- Filtre passe-bas programmable numériquement
- Courant de fonctionnement du gyroscope: 3,6 mA
- Courant de veille: 5 $\mu$ A
- Facteur d'échelle de sensibilité calibré en usine
- Auto-test de l'utilisateur

#### 1.8.2.2.2 Diagramme de synchronisation du bus I2C du MPU-6050

La figure 1.11 montre le diagramme de synchronisation du bus I2C du capteur gyroscope MPU-6050 que nous avons utilisé dans notre projet.

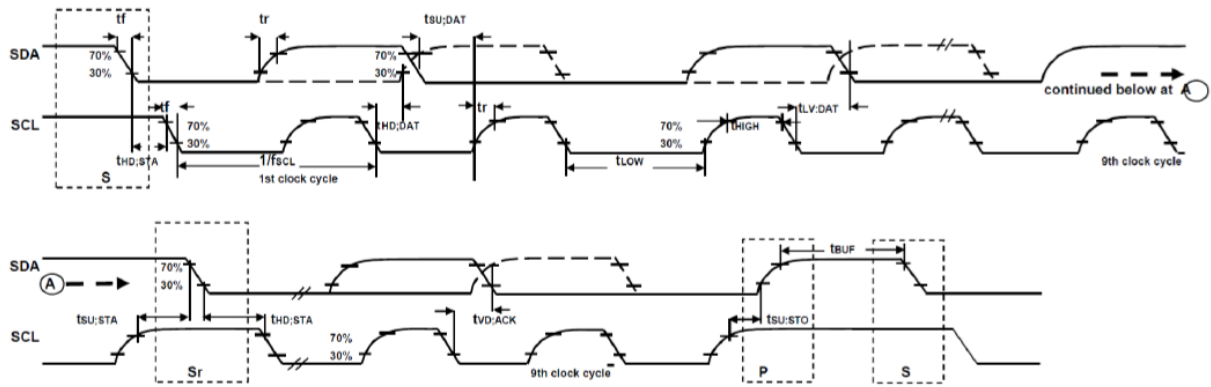


Figure 1.11 : Diagramme de synchronisation du bus I2C du 1<sup>er</sup> au 9<sup>em</sup>e cycle d'horloge [10].

1.8.2.2.3 Bloc diagramme du capteur MPU-6050

La figure 1.12 présente le bloc diagramme du capteur gyroscope MPU-6050 que nous avons utilisé dans notre projet.

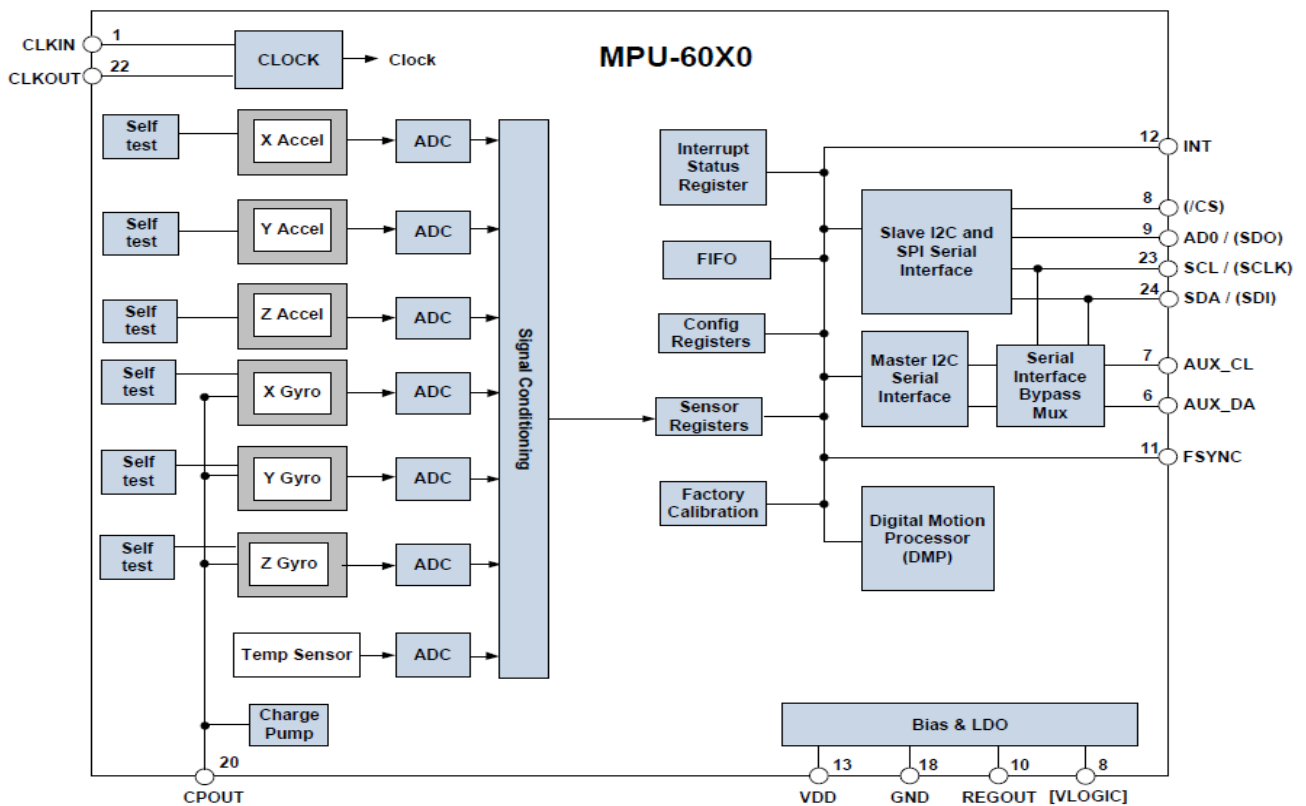


Figure 1.12 : Bloc diagramme du capteur MPU-6050 [10].

1.8.2.3 Bus d'adresse I2C

I2C est une interface à deux fils comprenant les signaux série (SDA) et l'horloge série (SCL). En général, les lignes sont à drain ouvert et bidirectionnelles. Dans une implémentation d'interface I2C généralisée, les périphériques connectés peuvent être un maître ou un esclave. Le périphérique maître place l'adresse de l'esclave sur le bus et le périphérique esclave avec l'adresse correspondante acquitte le maître.

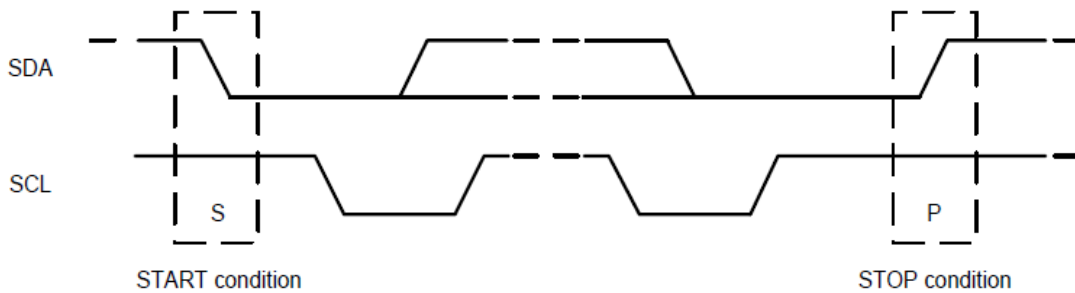


Figure 1.13 : START et STOP Conditions [10].

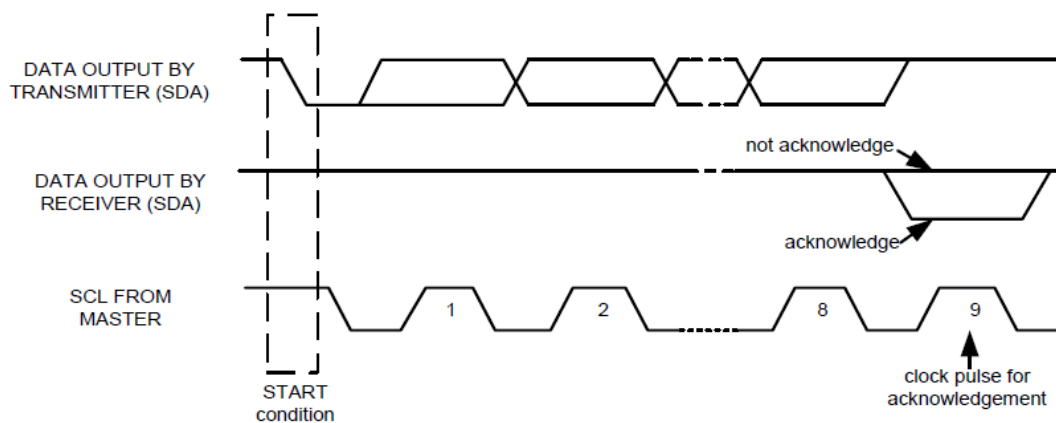


Figure 1.14 : Principe de reconnaissance sur le bus I2C [10].

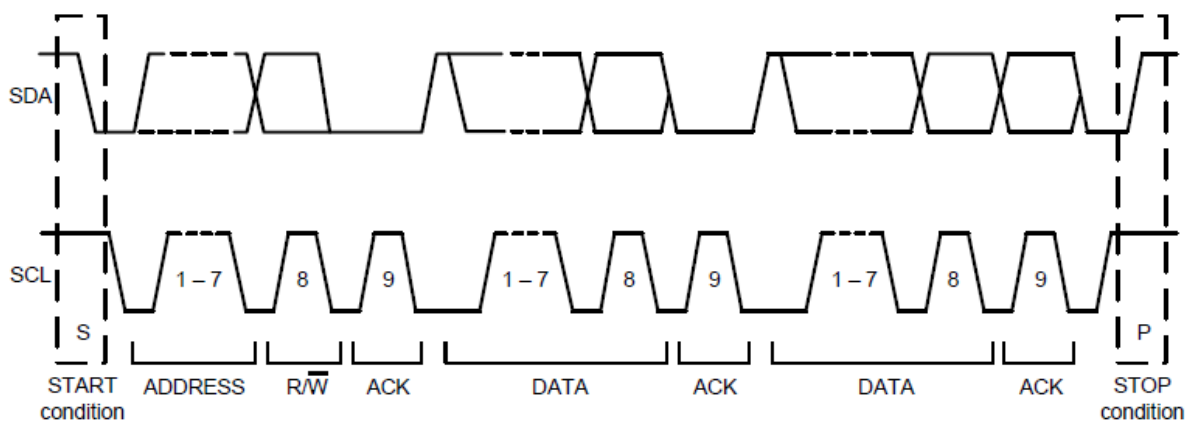


Figure 1.15 : Principe pour compléter le transfert de données I2C [10].

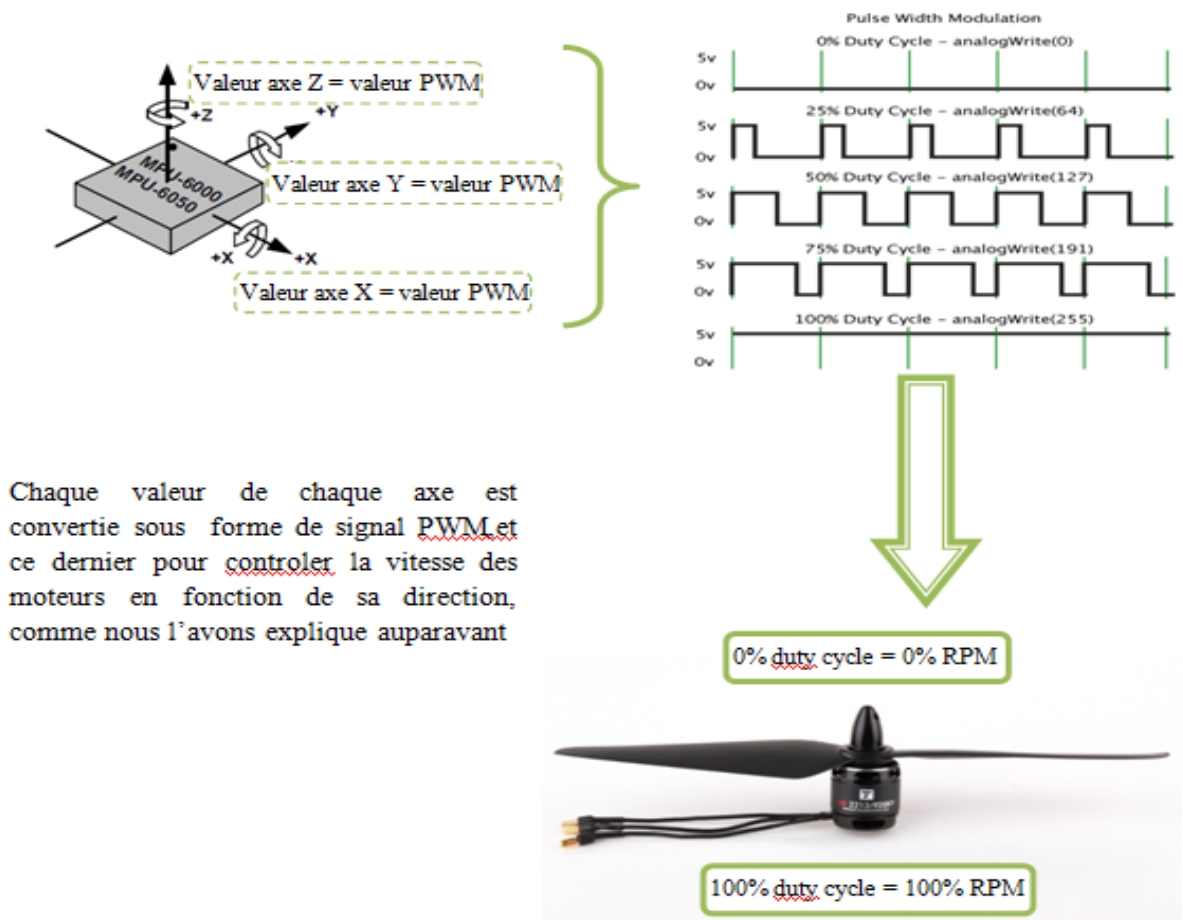


Signal	La description
S	Condition de démarrage: SDA passe de l'état haut à l'état bas tandis que SCL est à l'état haut
AD	Adresse esclave I2C
READ	R/W=0
WRITE	R/W=1
ACK	Acknowledge: la ligne SDA est basse alors que la ligne SCL est haute au 9ème cycle d'horloge
NACK	Not-Acknowledge: La ligne SDA reste haute au 9ème cycle d'horloge
RA	Adresse de registre interne MPU-60X0
DATA	Transmettre ou recevoir des données
P	Condition d'arrêt: SDA passe de l'état bas à l'état haut tandis que SCL est à l'état haut

Tableau 1.5 : Abréviations utilisées dans les figures 1.13, 1.14, 1.15[10].

1.8.2.4 Principe de contrôle des moteurs BLDC avec MPU-6050

La figure 1.16 présenter le principe de fonctionnement du capture gyroscope MPU-6050 et sa relation avec le moteur BLDC.



Chaque valeur de chaque axe est convertie sous forme de signal PWM et ce dernier pour contrôler la vitesse des moteurs en fonction de sa direction, comme nous l'avons expliqué auparavant.

Figure 1.16 : Principe de fonctionnement MPU-6050 avec moteur BLDC

### 1.8.3 Résultats des signaux PWM du capteur MPU-6050

Nous avons récupéré les résultats des signaux depuis l'oscilloscope digital, modèle SIGLENT de référence SDS 1102DL, les signaux que nous avons récupéré sont liés directement aux pins de variateur de vitesse ESC. Les figures suivantes présentent ces signaux.

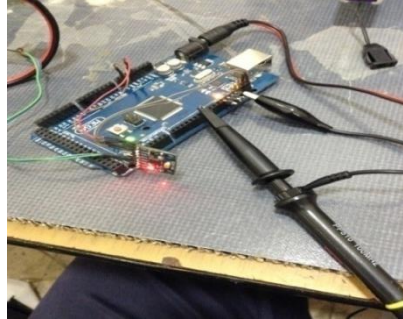


Figure 1.17 : Test des signaux depuis la carte arduinomega et MPU-6050

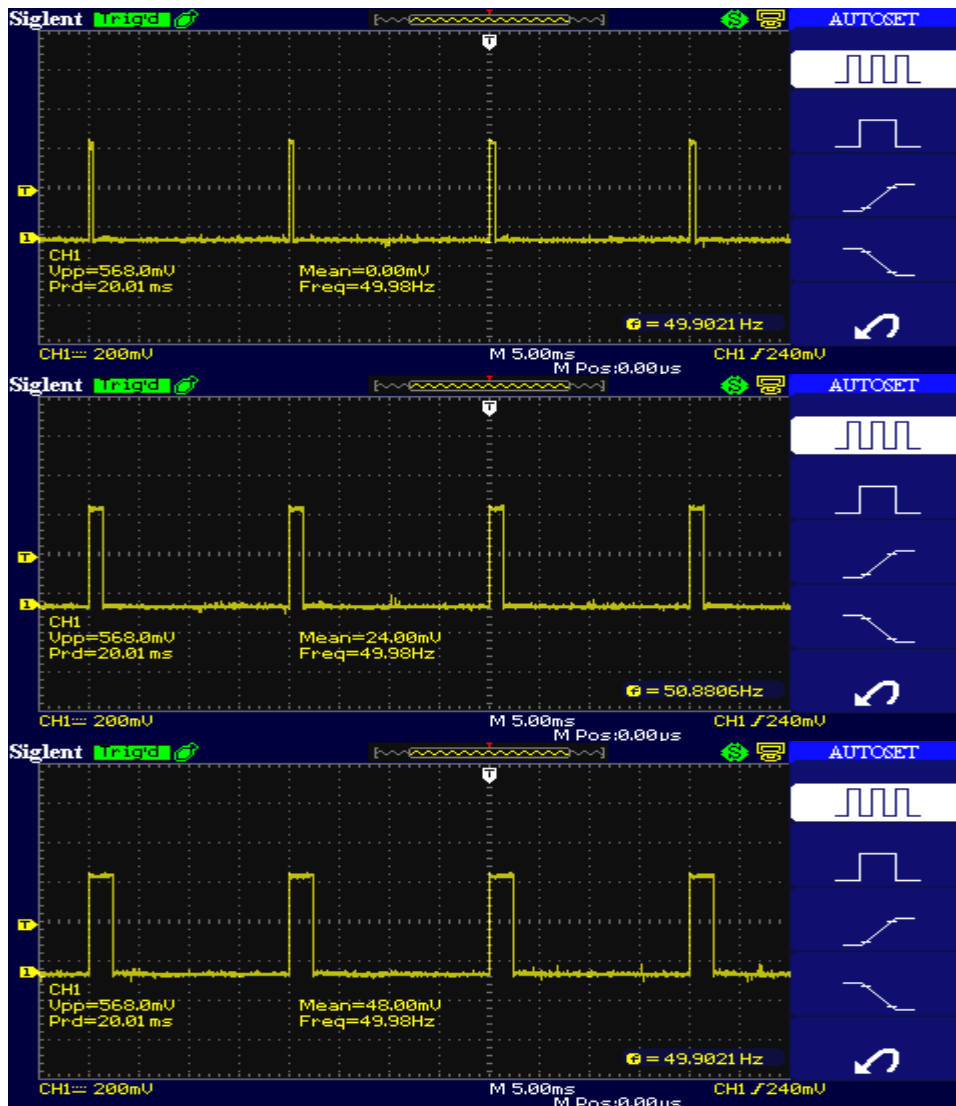


Figure 1.18 : Variation des signaux PWN du MPU-6050 vers la sortie de l'ESC

## 1.9 Conclusion

Ce chapitre est basé sur la modélisation de notre quadri-rotor. Nous avons présenté le principe de fonctionnement du drone quadri-rotor, dans laquelle nous avons présenté le type de régulation PID. L'objectif de notre travail est de construire un drone avec les avantages de sécurité, le système est transporté sur le drone. Et tout cela sera abordé dans les prochains chapitres.

## **CHAPITRE 2**

### **Commande du drone**

### 2.1 Introduction

Ce chapitre présente le modèle de communication que nous avons utilisé. Nous allons présenter le type de communication entre la télécommande et le drone, ainsi que les résultats de notre travail.

### 2.2 Module de la communication

Le choix de la transmission sans fil dans notre projet est basé sur un module de communication radiofréquence modèle NRF24L01+ présenté sur la figure suivante.

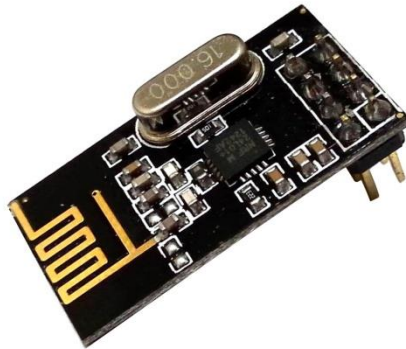


Figure 2.19 : Module NRF24L01+

#### 2.2.1 Présentation du NRF24L01+

Le NRF24L01+ est un émetteur-récepteur à puce unique de 2,4 GHz avec un moteur de protocole en bande de base intégré (Enhanced ShockBurst™), adapté aux applications sans fil ultra-basse consommation. Le NRF24L01+ est conçu pour fonctionner dans la bande de fréquence mondiale ISM à 2.400 - 2.4835GHz [11].

#### 2.2.2 Caractéristiques de NRF24L01

- Fonctionnement de la bande ISM 2,4 GHz dans le monde entier
- SPI matériel à 4 broches
- 126 canaux RF,
- Interface RX et TX commune
- 250 kbps, 1 et 2Mbps débit d'air Max 10 Mbps
- Accepte un coût réduit de  $\pm 60$ ppm 16MHz
- 6 canaux de données MultiCeiver™ pour réseaux 1: 6
- 1.9 à 3.6V gamme d'alimentation
- 13.5mA à 2Mbps

## CHAPITRE 2 Commande du drone

- sensibilité de -82dBm à 2Mbps, sensibilité de -85dBm à 1Mbps, sensibilité de -94dBm à 250kbps

### 2.2.3 Diagramme du NRF24L01+

La figure 2.20 illustre le bloc diagramme de la radiofréquence NRF24L01+ que nous avons utilisé dans notre projet.

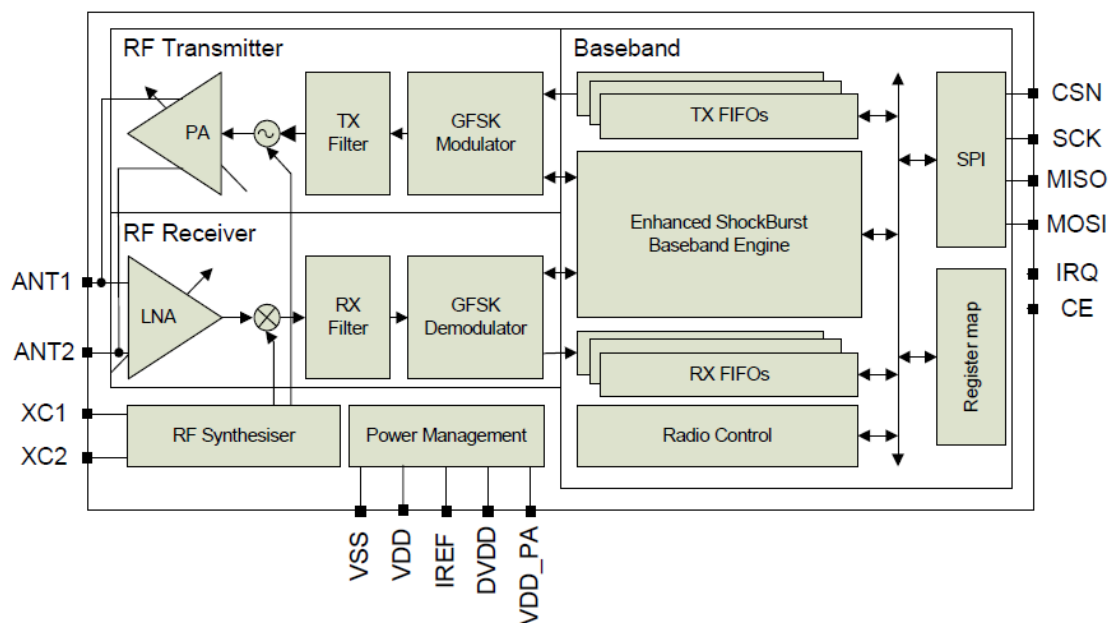


Figure 2.20 : Diagramme d'état du contrôle radio NRF24L01+[11].

### 2.2.4 Opérations SPI et synchronisation du NRF24L01

Les figures 2.21, 2.22, 2.23 présentent l'opération de lecture SPI de la radiofréquence NRF24L01+ que nous avons utilisé.

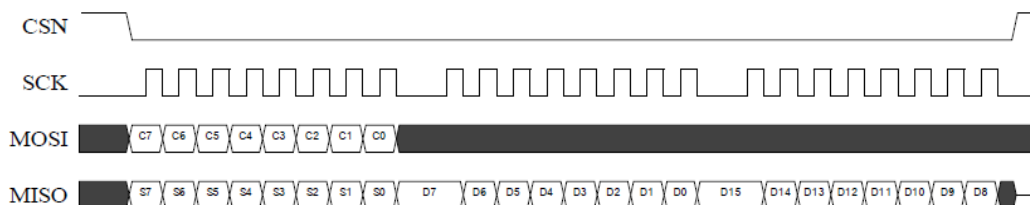
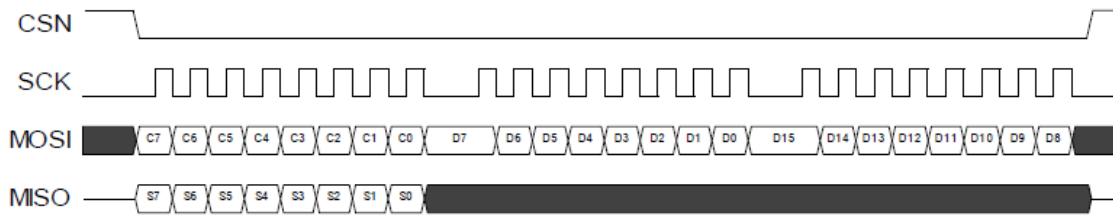
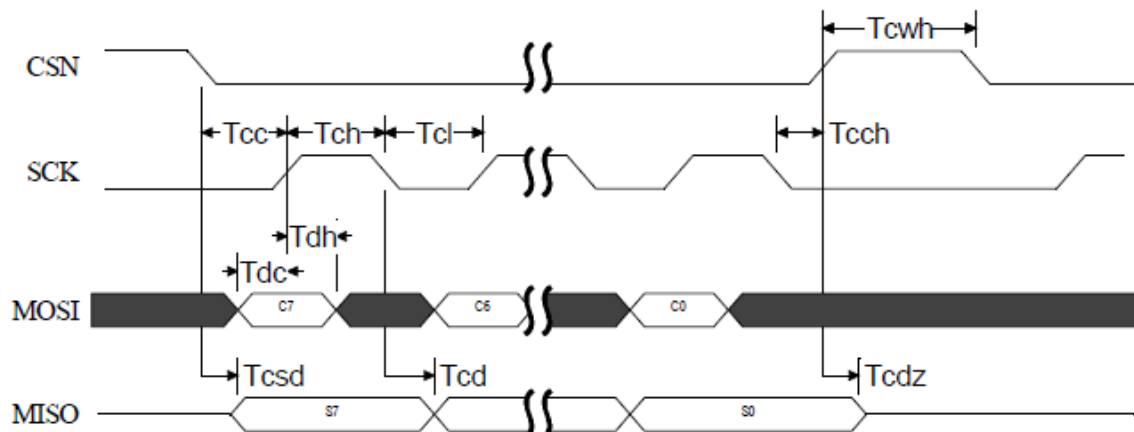


Figure 2.21 : Opération de lecture SPI du NRF24L01 [11].



**Figure 2.22** : Opération d'écriture SPI du NRF24L01[11].



**Figure 2.23** : Diagramme de temporisation SPI NOP du NRF24L01[11].

Abréviation	Description
<b>Cn</b>	bit de commande SPI
<b>Sn</b>	bit de registre STATUS
<b>Dn</b>	Data Bit (Remarque: LSByte à MSByte, MSBit dans chaque octet en premier)

**Tableau 2.6** : Abréviations utilisées dans les Figures 2.21, 2.22, 2.23 [11].

### 2.3 Bus d'adresse SPI

La sophistication et la complexité des appareils grand public ne permettent plus l'échange entre composants électroniques par liaisons parallèles, ces liaisons devenaient de plus en plus nombreuses et encombrantes. Dans ces systèmes à base de microcontrôleurs (téléphones mobiles...), les échanges de données entre les composants se font maintenant avec des bus série.

## CHAPITRE 2 Commande du drone

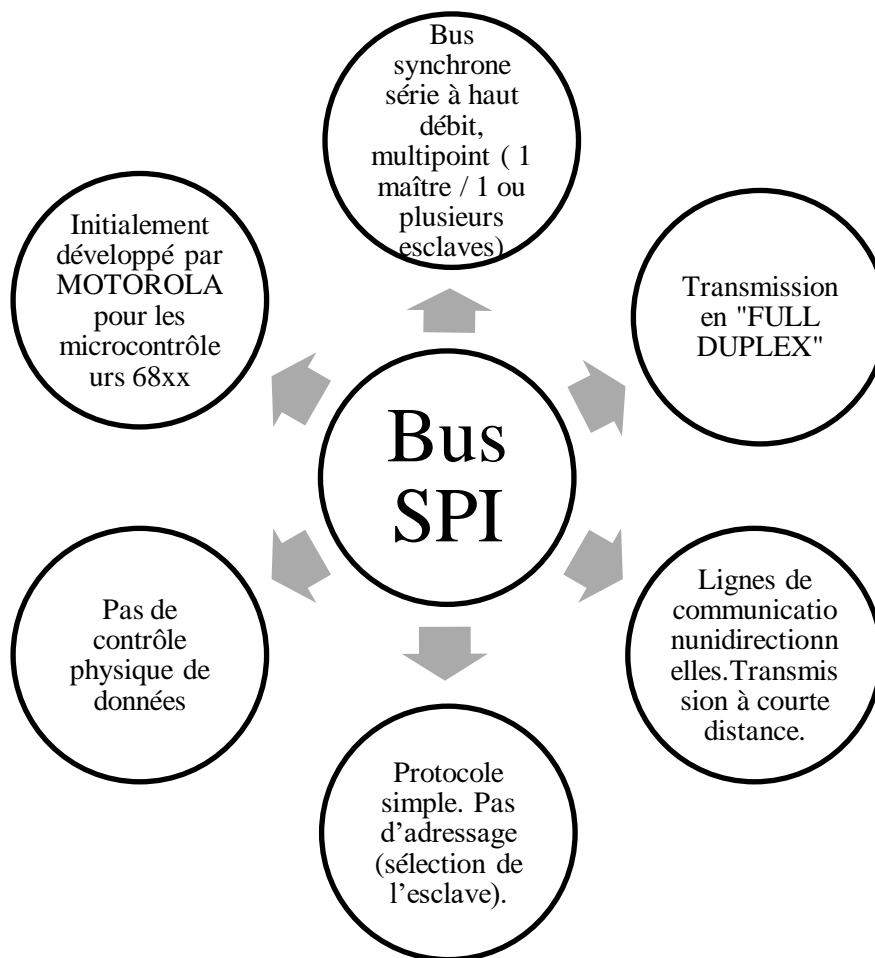
---

Dans le but de minimiser ces liaisons, et par conséquent d'en augmenter la fiabilité, a été créé le bus série SPI (Synchronous Peripheral Interface), initialement développé par Motorola.

D'autres fabricants (Microchip, Atmel, Texas Instrument...) ont adopté pour ce type de liaison et de nombreux composants sont apparus (mémoires, capteurs, microcontrôleurs...)[11].

### 2.3.1 Philosophie du bus SPI

La figure 2.24 illustre la philosophie du bus de la communication SPI.



**Figure 2.24** : Présentation du bus d'adresse SPI

### 2.3.2 Format de transfert des données

Lorsque  $CPHA = 0$ , les données sont valides au premier front du signal d'horloge. La polarité  $CPOL$  détermine s'il s'agit d'un front montant ou descendant. En effet, pour  $CPOL=0$ , au repos, l'horloge est au niveau BAS; le premier front est donc un front montant. Pour  $CPOL=1$ , au repos, l'horloge est sur le niveau HAUT; le premier front est donc un front



## CHAPITRE 2 Commande du drone

descendant. La polarité de l'horloge n'ayant pas d'influence sur le moment où le premier bit de données est valide, et elle n'a pas d'effet sur le format du transfert de données (voir figure ci-dessous)[11].

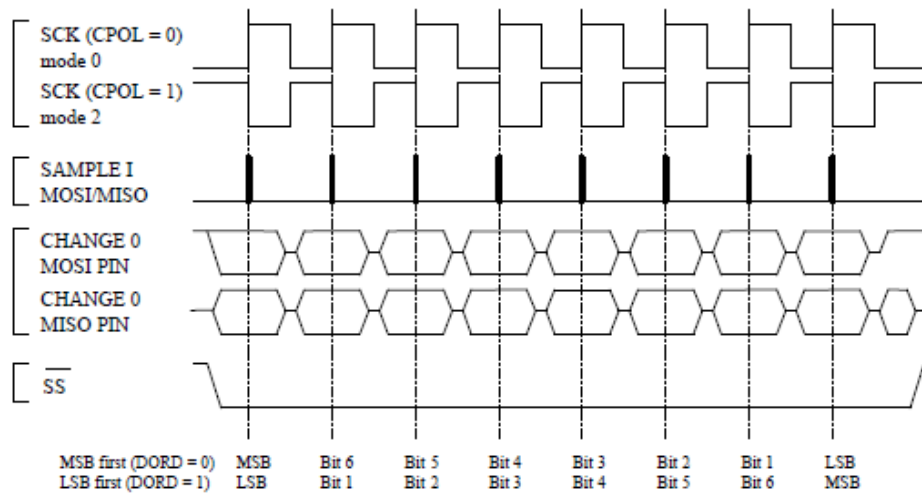


Figure 2.25 : Présentation du transfert de données lorsque CPHA = 0[11].

Lorsque CPHA = 1, les données sont réceptionnées avec le deuxième front du signal d'horloge. Pour CPOL=0, au repos, l'horloge est au niveau BAS et monte au niveau HAUT après le premier front, le deuxième front est donc un front descendant. Pour CPOL=1, au repos, l'horloge est au niveau HAUT et descend au niveau BAS après le premier front; le deuxième front est donc un front montant[11].

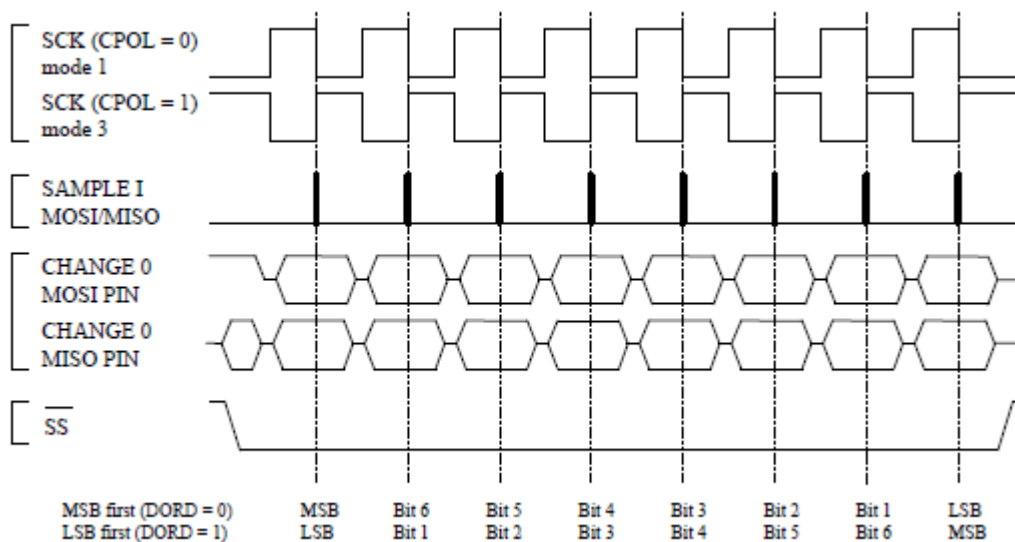


Figure 2.26 : Présentation du transfert de données lorsque CPHA = 1[11].

## CHAPITRE 2 Commande du drone

### 2.4 L'objectif de la télécommande

Pour effectuer la transmission des données nous allons fabriquer une télécommande constituée essentiellement d'un microcontrôleur atmega328-p, du NRF24L01+ et d'un joystick, pour contrôler la vitesse du moteur et la direction du drone.

#### 2.4.1 Principe du contrôle des moteurs BLDC avec joystick

La figure 2.27 présente le principe de fonctionnement du joystick de la télécommande et sa relation avec le moteur BLDC du drone.

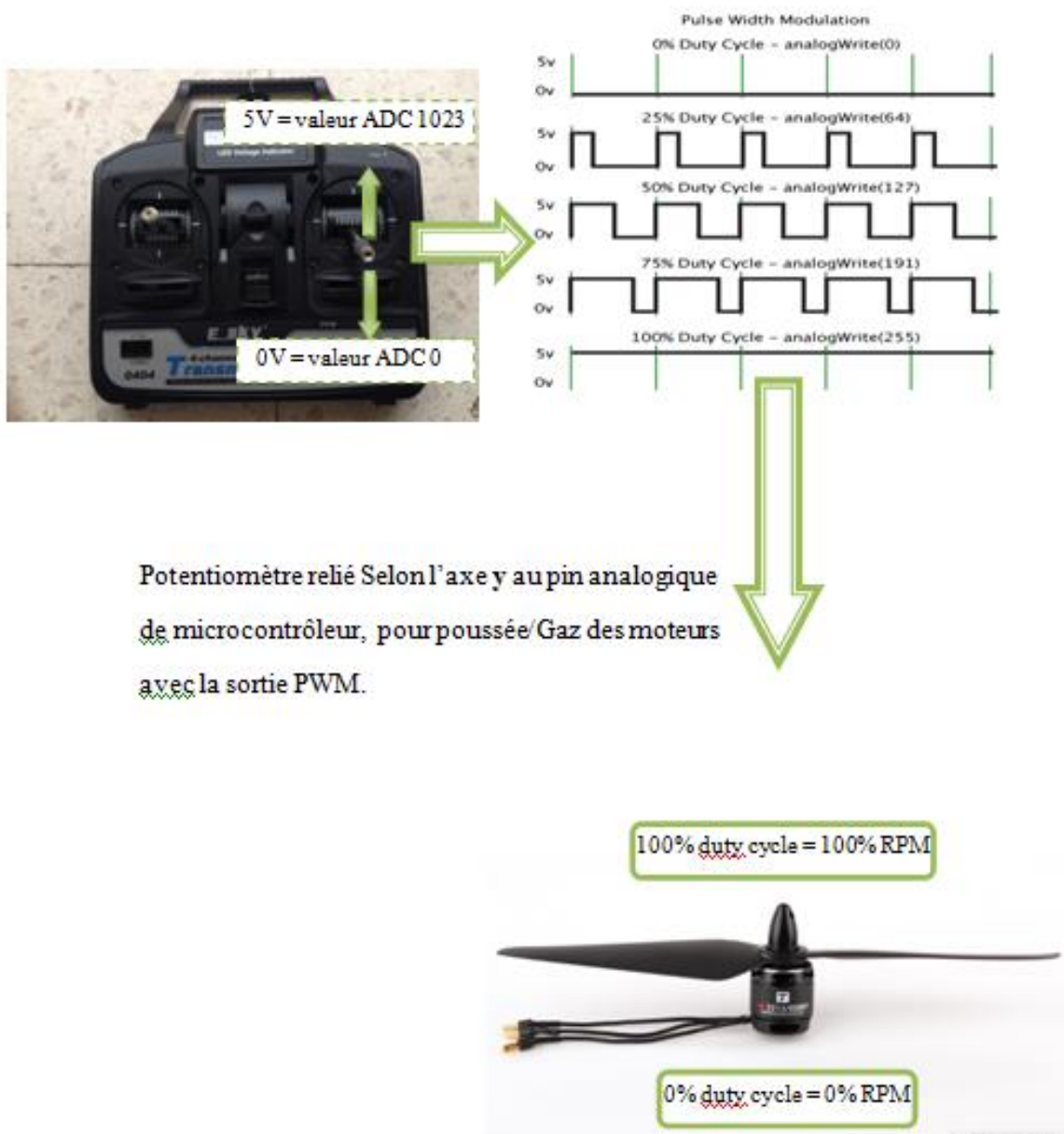


Figure 2.27 : Principe de fonctionnement du joystick avec le moteur BLDC

## CHAPITRE 2 Commande du drone

---

### 2.4.1.1 ADC (AnalogDigitalConverter)

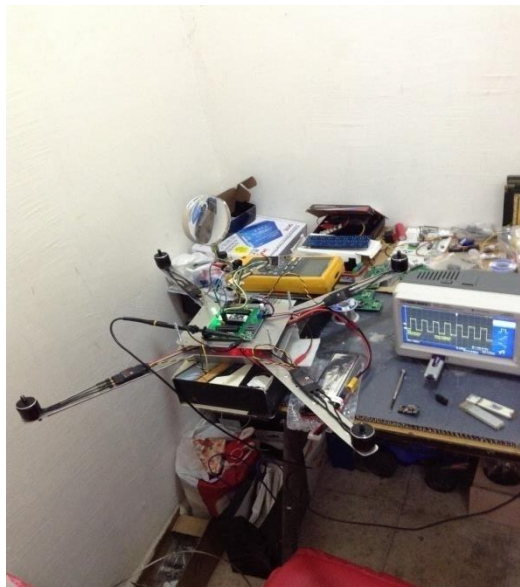
Ce module permet d'utiliser certaines broches du microcontrôleur en tant qu'entrées analogiques. Le signal analogique est converti par le module en un nombre binaire de 10 bits maximum. Ce module permettra d'utiliser un potentiomètre comme consigne d'entrée pour la régulation de la vitesse.

### 2.4.1.2 PWM

Ce module permet de faire varier la tension moyenne de sortie de la broche du microcontrôleur. En effet, la période du signal est fixée lors de l'initialisation et seule la largeur de l'impulsion est modifiée en fonction de la tension souhaitable en sortie, la figure 2.28 montre le principe de ce signal.

### 2.4.2 Résultats des signaux PWM de la télécommande

Nous avons récupéré les résultats des signaux depuis l'oscilloscope digital, modèle SIGLENT de référence SDS 1102DL, les signaux que nous avons récupérés sont transmis vers le NRF24L01+. La carte de pilotage récupère ces signaux et les utilise dans les pins connectés avec le variateur de vitesse ESC. Les figures suivantes présentent ces signaux.



**Figure 2.28** : Récupération des signaux depuis la carte de pilotage

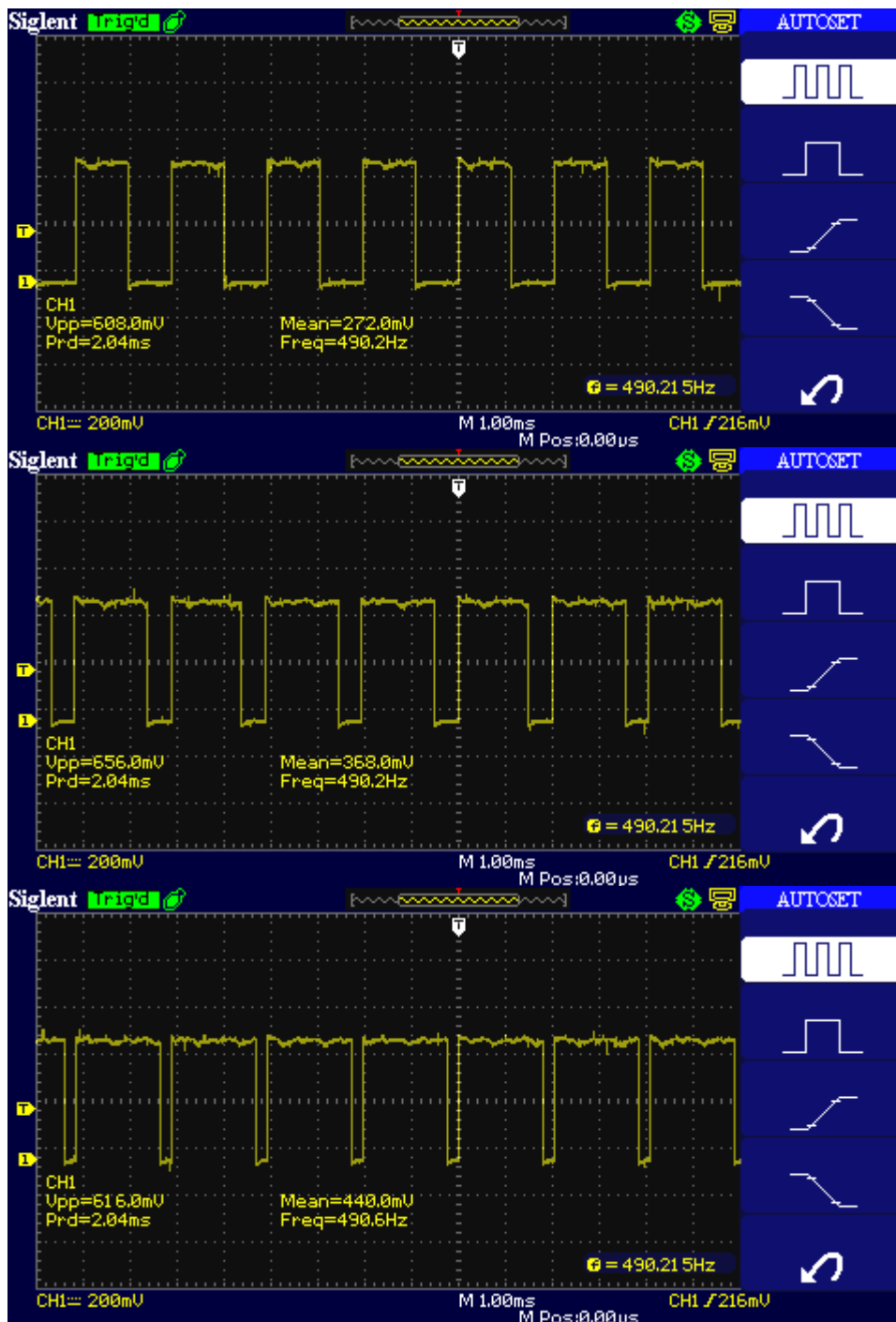


Figure 2.29 : Variation des signaux PWM du joystick vers la sortie d'ESC

### 2.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté le modèle de la transmission sans fil que nous avons utilisé dans notre télécommande, dans laquelle nous avons présenté le type de bus de données SPI, ainsi que le principe de contrôle et de variation de la vitesse des moteurs. L'objectif de notre travail est de construire une télécommande simple, pas chère et efficace pour contrôler notre drone. Le chapitre 4 illustre les étapes de développement de la télécommande et la conception de la carte de contrôle.

## **CHAPITRE 3**

### **Sécurité et cryptage des données**

### 3.1 Introduction

Ce chapitre présente des généralités sur les cartes à puce. Nous allons présenter les différents types de cryptage des données et les modèles que nous allons choisir, et le matériel avec lequel nous avons travaillé.

### 3.2 Historique

Le développement de la carte à puce, combiné à l'expansion des systèmes de traitement de données électroniques, a créé de toutes nouvelles possibilités pour concevoir de telles solutions. Les progrès considérables de la microélectronique dans les années 1970 ont permis d'intégrer la logique de stockage et de traitement des données sur une seule puce de silicium de quelques millimètres carrés. L'idée d'incorporer un tel circuit intégré dans une carte d'identification était contenue dans une demande de brevet déposée par les inventeurs allemands Jurgen Dethloff et Helmut Grotrupp dès 1968. Ceci a été suivi en 1970 par une demande de brevet similaire par Kunitaka Arimura au Japon. Cependant, le premier vrai progrès dans le développement des cartes à puce est venu quand Roland Moreno a enregistré ses brevets de carte à puce en France en 1974 [12].

### 3.3 Généralités sur les cartes à puce

Une carte à puce est une carte avec des circuits intégrés qui peuvent traiter des données. Cela implique qu'elle peut recevoir des données d'entrée qui sont traitées et livrées en tant que sortie. La carte à puce est en plastique, généralement en PVC, comme les anciennes cartes de crédit à bande magnétique et sa taille est similaire à celle des anciennes cartes de crédit [12].

#### 3.3.1 Architecture des cartes à puce

Il existe deux types de cartes à puce : les cartes en logique câblée (carte mémoire) et les cartes à microprocesseur. La carte en logique câblée (carte mémoire) en comporte généralement qu'une circuiterie logique destinée à réaliser des fonctions basiques. La carte à microprocesseur quant à elle comporte un ou plusieurs processeurs réalisant des fonctions complexes.

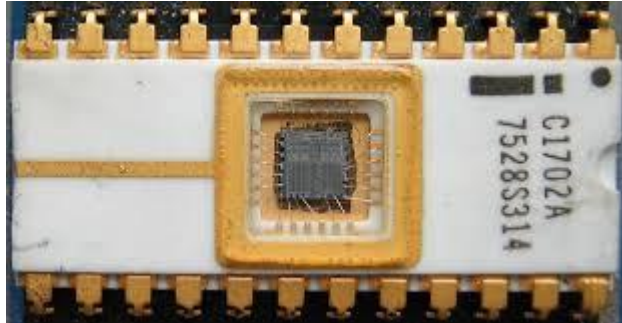
##### 3.3.1.1 Cartes en logique câblée

Les données nécessaires à l'application sont stockées dans la mémoire, qui est généralement l'EEPROM. L'accès à la mémoire est contrôlé par la logique de sécurité, qui dans le cas le plus simple consiste uniquement en une protection en écriture ou une protection contre l'effacement pour la mémoire ou certaines régions de mémoire. Cependant, il existe également des puces de mémoire avec une logique de sécurité plus complexe qui peut également effectuer un chiffrement simple. Les données sont transférées vers et depuis la carte via le port d'E / S. La partie 3 de la norme ISO 7816 définit un protocole de transfert synchrone spécial qui permet à

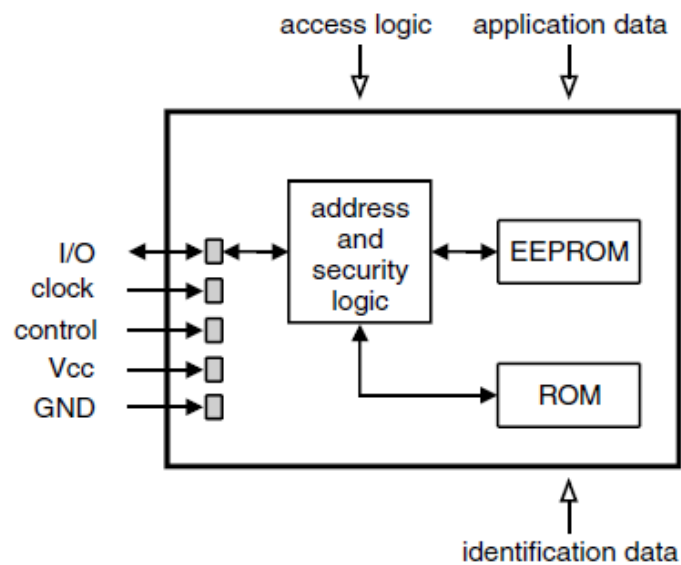
## CHAPITRE 3 Sécurité et cryptage des données

---

l'implémentation de la puce d'être particulièrement simple et peu coûteuse. Cependant, certaines cartes à puce utilisent le bus I2C, qui est couramment utilisé pour les mémoires d'accès en série[13].



**Figure 3.30** : Carte à logique câblée EPROM



**Figure 3.31** : Architecture typique d'une carte mémoire de type contact avec logique de sécurité [12].

### 3.3.1.2 Cartes à microprocesseur

Avec les cartes à microprocesseurs, on assiste à un véritable saut technologique et fonctionnel. Ce sont ces types de cartes qui permettent de réaliser des systèmes d'identification et d'authentification offrant un très grand niveau de sécurité.

## CHAPITRE 3 Sécurité et cryptage des données

Les cartes à microprocesseur sont très flexibles. Dans le cas le plus simple, ils contiennent un programme optimisé pour une application unique, ils ne peuvent donc être utilisés que pour cette application particulière.

La ROM contient uniquement les composants de base du système d'exploitation, la partie spécifique à l'application du système d'exploitation étant chargée dans l'EEPROM uniquement après la fabrication de la carte[13].



Figure 3.32 : Carte à microprocesseur edahabia

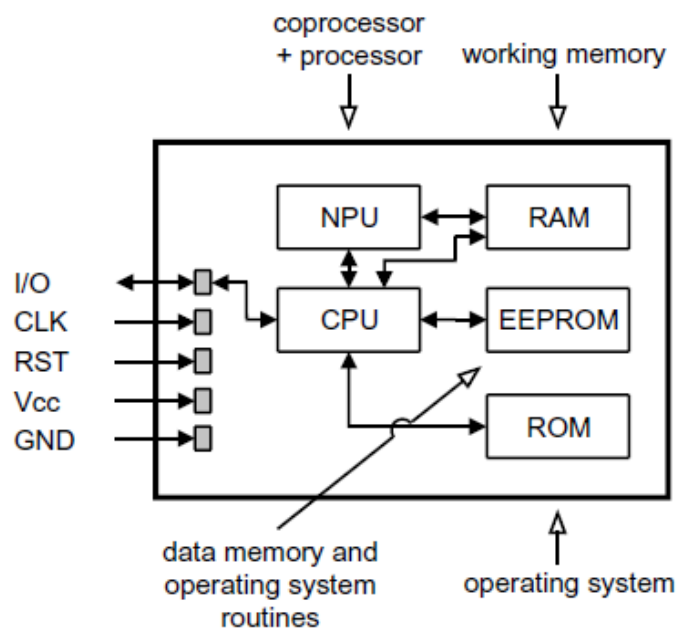


Figure 3.33 : Architecture typique d'une carte à microprocesseur de type contact avec un coprocesseur [12].



# CHAPITRE 3 Sécurité et cryptage des données

## 3.3.2 Cartes avec contacts

Pour pouvoir utiliser carte a puce avec contacte, il était nécessaire de lui fournir de l'énergie et delui donner la possibilité de communiquer avec l'extérieur [13].

L'image ci-après donne une idée du contenu d'un microcontrôleur pour carte à puce.

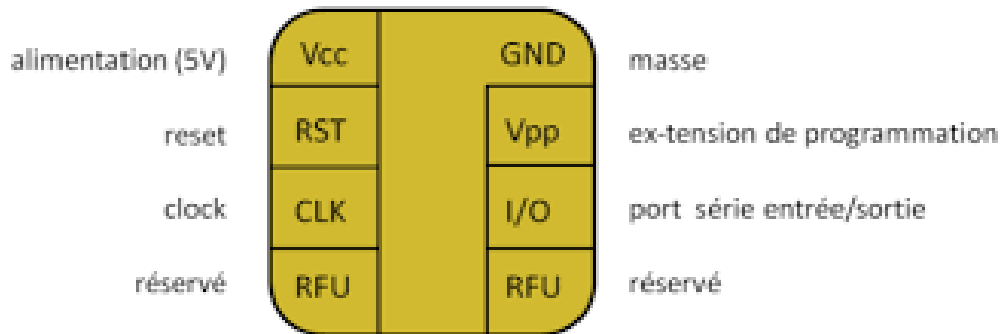


Figure 3.34 : Brochage d'une carte à puce

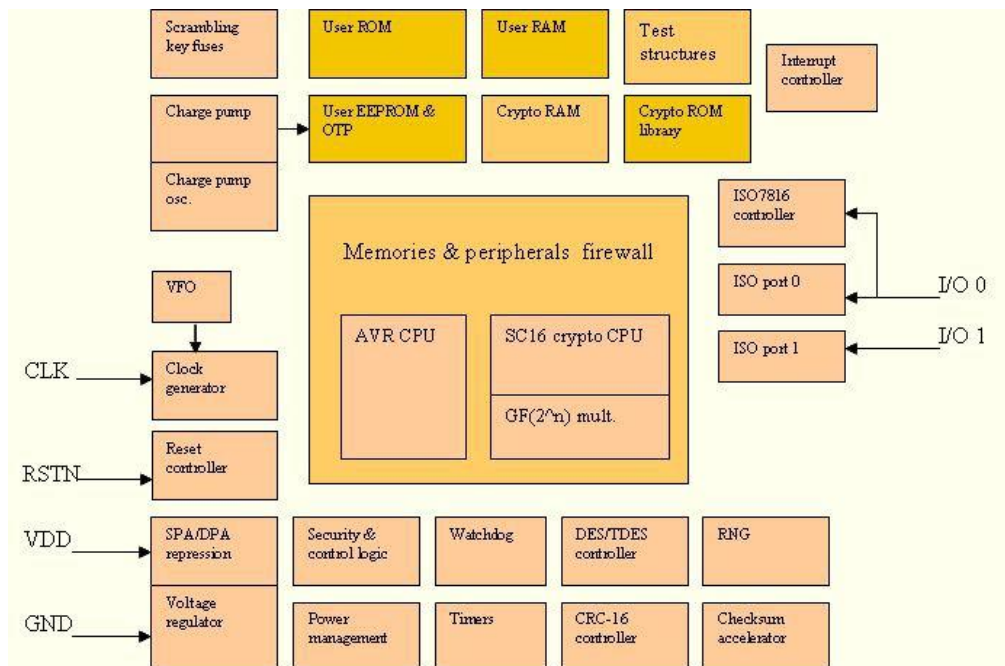


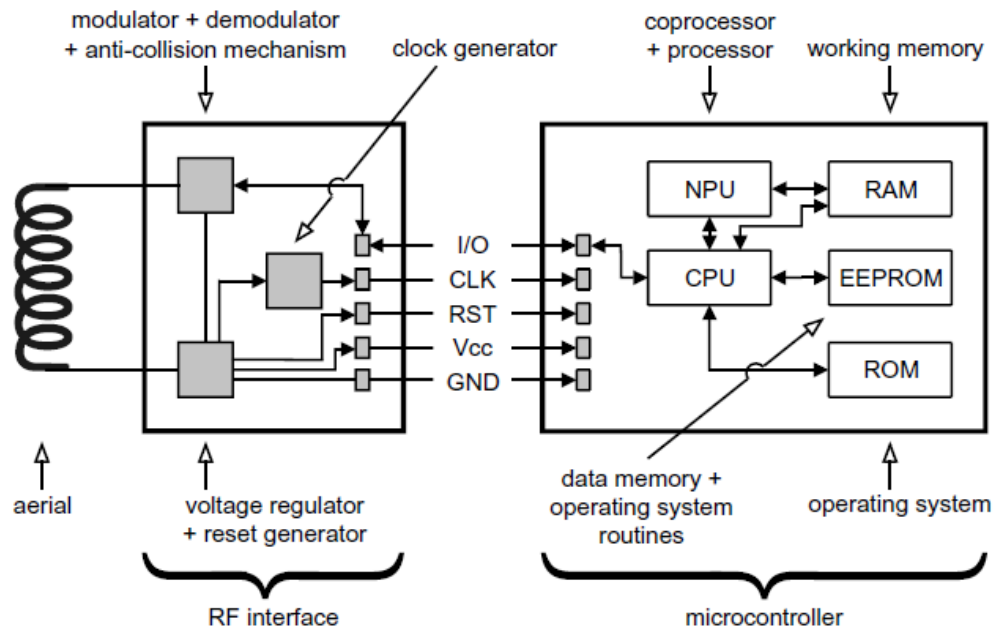
Figure 3.35 : Architecture interne d'un microcontrôleur de carte à puce

## 3.3.3 Cartes sans contacts

La technologie de la carte sans contact offre aux émetteurs de cartes et aux détenteurs de cartes une gamme d'applications potentielles nouvelles et attrayantes. Par exemple, les cartes sans

## CHAPITRE 3 Sécurité et cryptage des données

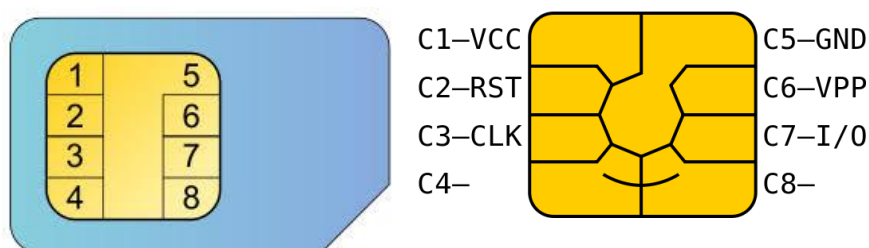
contact ne doivent pas nécessairement être insérées dans un lecteur de cartes, car il existe des systèmes qui fonctionnent à une portée allant jusqu'à un mètre [12].



**Figure 3.36 :** Architecture typique d'une carte à microprocesseur avec un coprocesseur et une interface sans contact [14].

### 3.3.4 Carte SIM

Elle a été conçue pour stocker des informations propres à un abonné d'un réseau GSM et dérivés (UMTS) et assurer l'identification et l'authentification de cet abonné sur le réseau. Ils agissent donc d'un élément de sécurité dans le téléphone ou l'équipement de communication qui l'utilise [14].



**Figure 3.37 :** Format et contact d'une carte SIM

Contact	Designation	Function
C1	Vcc	Supply voltage
C2	RST	Reset
C3	CLK	Clock
C4	AUX1	Auxiliary 1; D+ for USB
C5	GND	Ground
C6	SPU	Standard or proprietary use; SWP in the telecommunication sector (formerly programming voltage Vpp)
C7	I/O	Input/output for serial communication
C8	AUX2	Auxiliary 2; D- for USB

**Tableau 3.7** : Désignations de contact et fonctions spécifiées dans les parties 2, 3, 10 et 12 de l'ISO / CEI 7816 [12].

### 3.3.4.1 L'identifiant IMSI

L'identifiant de l'abonné est nommé IMSI pour International Mobile Subscriber Identity dont la spécification est donnée par la recommandation E.212 de l'UIT (Union Internationale des Télécommunications) [12].



**Figure 3.38** : L'identification Union Internationale des Télécommunications

### 3.3.5 Normes de la carte à microcircuit

La norme définissant la carte à microcircuit porte le numéro 7816. Cette norme comprend plusieurs parties :

- ISO7816-1 : caractéristiques physiques de la carte. Elle reprend la norme 7810 qui existait avant la carte à puce.
- ISO7816-2 : position des contacts sur la carte, taille des contacts, rôle des contacts.

## CHAPITRE 3 Sécurité et cryptage des données

---

- ISO7816-3 : description des signaux électriques, tensions et courants, protocoles de bas niveau, réponse à la RAZ.
- ISO7816-4: commandes intersectorielles pour les échanges
- ISO7816-5 : enregistrement des fournisseurs d'applications
- ISO7816-6 : éléments de données intersectoriels pour les échanges
- ISO7816-7 : commandes pour un langage de requêtes
- ISO7816-8 : commandes intersectorielles pour une boîte à outils crypto
- ISO7816-9 : commandes intersectorielles pour la gestion de la carte et des fichiers
- ISO7816-10 : remise à zéro et réponse à la RAZ pour les cartes en logiques câblées (Cartes synchrones)
- ISO7816-11 : vérifications personnelles via des méthodes biométriques
- ISO7816-12 : interface électrique USB et procédures opératoires
- ISO7816-15 : Cryptographic information application

Dans les années 80, les principaux membres Participants étaient l'Allemagne la France, le Japon, les Etats-Unis et le Royaume-uni. On y trouvait également l'Afrique du Sud, la Belgique, le Canada, l'Italie, la Norvège, la Hollande, la Suède et la Suisse. Au début de la normalisation, les membres de liaisons les plus actifs furent INTAMIC (International Association for Microcircuit Card), MASTERCARD International, VISA International, l'IATA (International Air Transport Association) et EUROCHEQUE [13].

### 3.4 Sécurité des données

Les systèmes de cartes à puce permettent un réseau de transaction distribué, sans connexions physiques entre les terminaux du réseau. La carte à puce est l'outil de distribution de données qui fournit les informations utilisées dans les transactions. Le terminal ou le dispositif accepteur de carte (CAD) le traite. Informations fournies par la carte à puce basées sur les procédures commerciales pour son application. Un système de carte à puce est le plus rentable lorsque le CAD peut vérifier l'approbation de la transaction sans interroger les bases de données de cartes valides d'un ordinateur hôte. Pour assurer l'intégrité des données à l'échelle du système, le terminal "doit disposer d'un moyen de validation des données.

La cryptographie est un moyen efficace pour prouver l'appartenance au système sans révéler les caractéristiques d'identification des cartes au monde extérieur. Mais les méthodes cryptographiques nécessitent une distribution des clés, ce qui augmente la complexité du système, ajoute une administration système supplémentaire et réduit la flexibilité.

## CHAPITRE 3 Sécurité et cryptage des données

Chaque méthode d'authentification a des compromis entre les coûts, l'efficacité opérationnelle et les avantages. Les méthodes d'authentification sont jugées par plusieurs facteurs: facilité de mise en œuvre, sophistication requise du microprocesseur de carte à puce, effort de gestion du système (par exemple, distribution de clés secrètes), vulnérabilité du système à compromettre et temps pour terminer l'authentification. Les trois premiers sont axés sur les coûts, le quatrième sur l'intégrité des données et le dernier sur la satisfaction des clients. La sélection d'une méthode d'authentification satisfaisante est basée sur les exigences de chaque application, qui sont identifiées par un processus d'analyse du système. L'analyse du système est la clé pour sélectionner la bonne méthode d'authentification et, finalement, un système de carte à puce rentable [14].

### 3.4.1 Authentification par clé symétrique

L'algorithme Digital Encryptions Standard (DES) est une méthode de cryptographie à clé symétrique couramment utilisée pour les systèmes de cartes à puce. Cette méthode utilise une clé cryptographique secrète stockée et l'algorithme DES public dans chaque carte à puce et dispositif accepteur de carte (cardacceptordevice « CAD »). Les étapes de l'authentification par clé symétrique sont répertoriées ci-dessous[14].

- 1) La carte à puce envoie le numéro de série du microprocesseur (I) au CAD, qui combine le numéro avec la clé principale ( $M_k$ ) pour former la carte à puce diversifiée clé (K). L'émetteur charge une clé diversifiée dans chaque carte à puce pendant l'initialisation de la carte.
- 2) Le CAD génère un nombre aléatoire (R), puis crypte R pour former la valeur Y, qui est transmise comme défi à la carte à puce.
- 3) La carte à puce déchiffre Y, formant la réponse (X) et renvoie X au CAD.
- 4) Le CAD compare R et X, acceptant la carte si les deux valeurs correspondent.

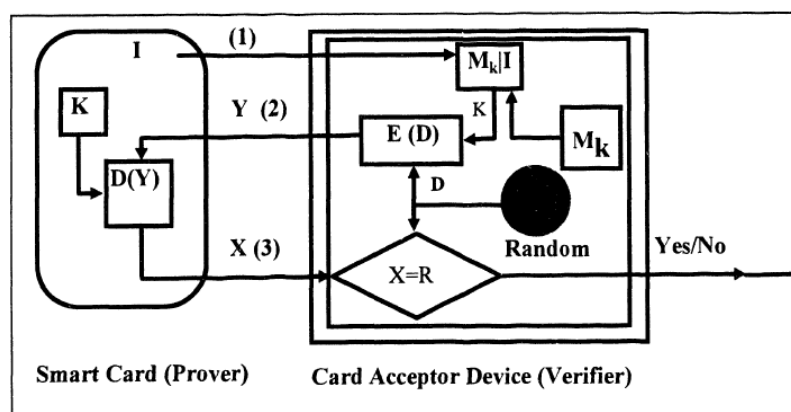


Figure 3.39 : Authentification à l'aide de la cryptographie à clé symétrique.

### 3.4.2 Authentification par clé asymétrique

L'authentification par clé asymétrique est une technique cryptographique qui utilise une clé de vérification différente dans le CAD que la clé de vérification utilisée par la carte à puce. Cette méthode est généralement implémentée en utilisant des fonctions unidirectionnelles à trappe, dans lesquelles une carte à puce génère une signature électronique avec sa clé secrète et le CAD utilise une clé publique pour authentifier la signature[14].

Le système cryptographique à clé publique Rivest-Shamir-Adelman (RSA) est la méthode d'authentification par clé asymétrique la plus répandue. Il place la sécurité de l'algorithme dans la difficulté de factoriser de grands nombres premiers. Les mathématiques sous-jacentes à cette méthode, basées sur la fonction totalisante d'Euler, sont expliquées dans les références [17] et [18].

L'authentification à l'aide de la clé asymétrique avec une fonction de trappe est décrite dans les étapes suivantes[14].

- 1) Le CAD transmet un nombre aléatoire ( $X$ ) à la carte à puce.
- 2) La carte à puce transmet son mot d'identification ( $I$ ) et le nombre aléatoire crypté ( $Y$ ) avec la clé secrète ( $k$ ) dans la carte à puce. Il fournit également sa clé publique ( $n$ ) en tant que certificat formé avec  $n$  et  $I$ . Le certificat permet au DAO de vérifier la validité de la clé publique.
- 3) Le CAD vérifie la réponse des cartes en déchiffrant  $Y$  ( $X'$ ) et en le comparant au nombre aléatoire original.

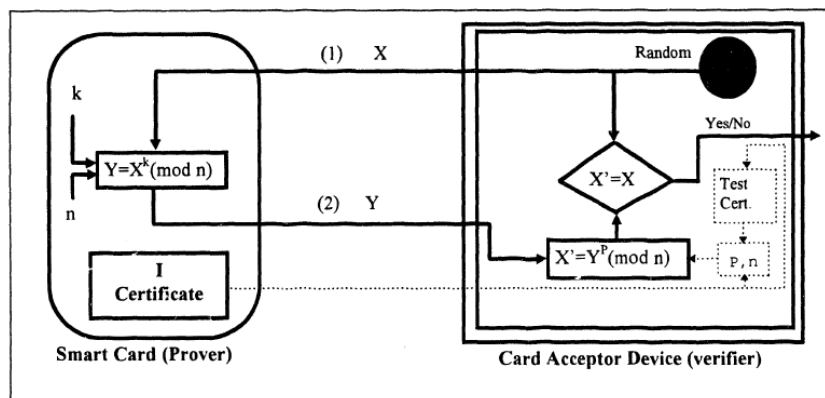
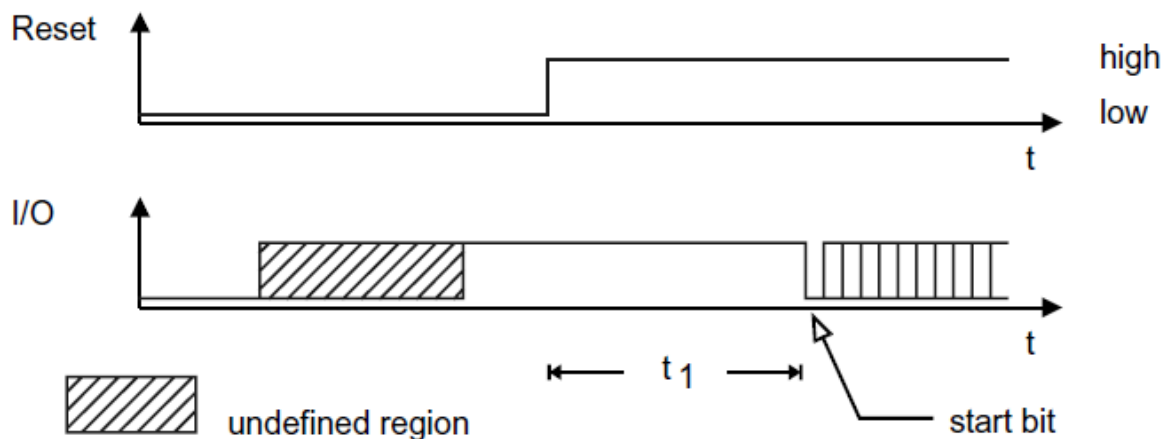


Figure 3.40 : Authentification par clé publique à l'aide du crypto système Rivest Shamir Adelman

### 3.5 Réponse à reset (ANSWER TO RESET ATR)

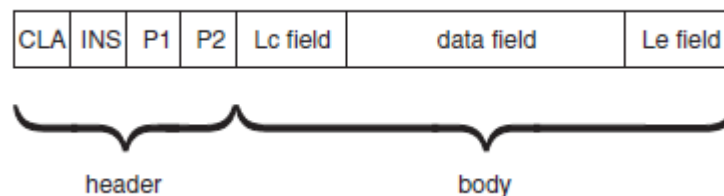
Après que la tension d'alimentation, le signal d'horloge, et le signal de réinitialisation ont été appliqués, la carte à puce envoie une réponse à la réinitialisation (ATR) via le fil d'E / S. Cette chaîne de données, qui contient au maximum 33 octets, est toujours envoyée avec une valeur de diviseur (facteur de conversion de fréquence d'horloge) de 372 conformément à la norme ISO / IEC 7816-3. Il contient divers paramètres liés au protocole de transmission et à la carte. Cette valeur de diviseur doit être utilisée même si le protocole de transmission utilisé après l'ATR utilise une valeur de diviseur différente (par exemple 64). Cela garantit qu'un ATR de n'importe quelle carte peut toujours être reçu, quels que soient les paramètres du protocole de transmission finalement utilisé [12].



**Figure 3.41** : Diagramme temporel du signal de remise à zéro et du démarrage de l'ATR, conformément à l'ISO / CEI 7816-3 ( $400 \text{ cycles d'horloge} \leq t_1 \leq 40\,000 \text{ cycles d'horloge}$ )

### 3.6 Commande APDU

Les unités de données de protocole d'applications (APDU) sont utilisées pour échanger toutes les données qui transitent entre la carte à puce et le terminal. En termes simples, une APDU est une sorte de conteneur qui contient une commande complète à la carte ou une réponse complète de la carte. Les APDU sont transmises par le protocole de transmission de manière transparente, ce qui signifie sans modification ou interprétation [12].



**Figure 3.42** : Structure APDU de commande, composée d'un en-tête (header) et d'un corps (body)

### 3.6.1 Structure de la réponse APDU

L'APDU de réponse, qui est envoyée par la carte en réponse à une commande APDU, est constituée d'un corps facultatif et d'une bande-annonce obligatoire, comme indiqué à la figure 3.42. Le corps est constitué du champ de données, dont la longueur est spécifiée par l'octet Le de la commande précédente APDU. Indépendamment de la valeur spécifiée dans l'octet Le, la longueur du champ de données peut être nulle si la carte à puce termine le traitement de la commande en raison d'une erreur ou de paramètres incorrects. Ceci est indiqué dans les deux mots d'état à un octet SW1 et SW2 dans la bande-annonce [12].

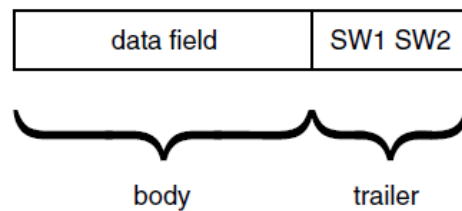


Figure 3.43 : Structure de la réponse APDU



Figure 3.44 : Les deux types d'APDU de réponse

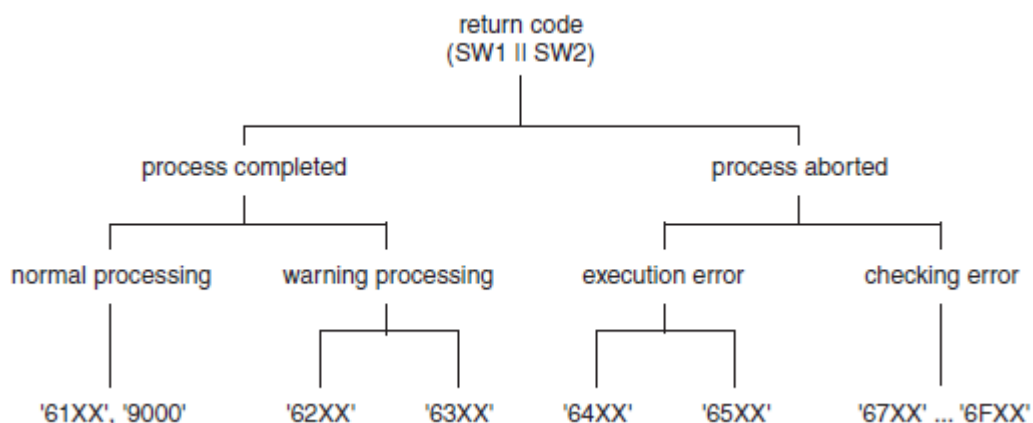


Figure 3.45 : Système de classification du code de retour défini par l'ISO / CEI 7816-4.

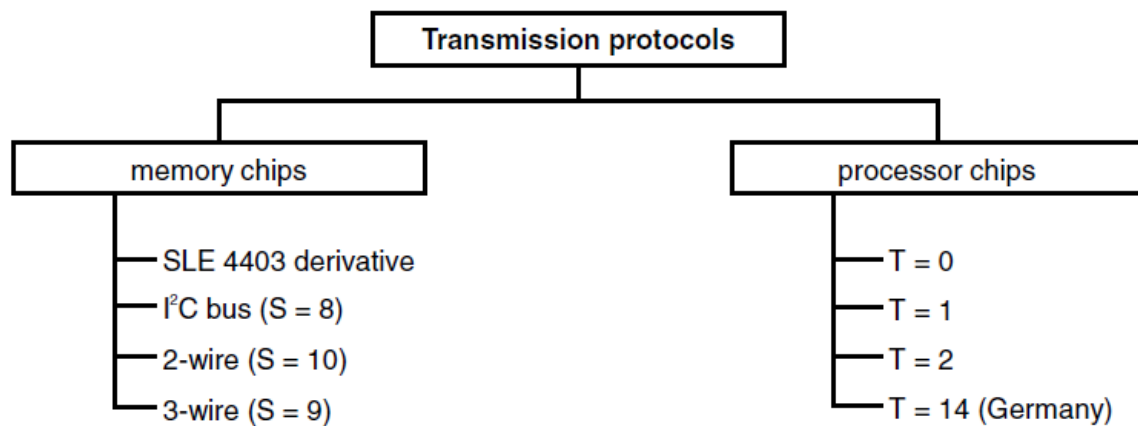
La carte doit toujours envoyer une bande-annonce en réponse à une commande. Les deux octets SW1 et SW2, qui sont également appelés le code retour, contiennent la réponse à la commande. Système de classification du code de retour défini par l'ISO / CEI 7816-4. Par



exemple, le code de retour "9000" signifie que la commande a été exécutée complètement et avec succès. Les codes de retour '63xx' et '65xx' indiquent que les données dans la mémoire non volatile (mémoire EEPROM ou mémoire flash) ont été modifiées, tandis que les codes '6X' restants ne l'indiquent pas. Il y a plus de 50 codes différents [12].

### 3.6.2 Protocole de transmission

Par conséquent, le contenu et le format d'une unité APDU ne doivent pas changer lorsqu'un protocole de transmission différent est utilisé. Ceci s'applique surtout aux deux protocoles standards, T = 0 et T = 1. Cette demande d'indépendance de protocole affecte la structure des APDU, car il doit être possible de les transmettre de manière transparente en utilisant à la fois le protocole T = 0 orienté octet et le protocole T = 1 orienté bloc [12].



**Figure 3.46** : Classification des protocoles de transmission utilisés avec les cartes à puce de type contact

#### 3.6.2.1 Protocole de transmission T = 1

Le protocole de transmission T = 1 est un protocole semi-duplex asynchrone pour les cartes à puce. Il est basé sur la norme internationale ISO / IEC 7816-3. Les spécifications TS 102.221 et EMV sont également pertinentes pour ce protocole. Le protocole T = 1 est un protocole orienté bloc, ce qui signifie qu'un bloc est la plus petite unité de données pouvant être transmise entre la carte et le terminal [12].

Command	User data	Protocol data	Data transmission time
READ BINARY	C: 5 bytes R: 2 + 8 bytes	C: 4 bytes R: 4 bytes	28.75 ms
UPDATE BINARY	C: 5 + 8 bytes R: 2 bytes	C: 4 bytes R: 4 bytes	23.00 ms
ENCRYPT	C: 5 + 8 bytes R: 2 + 8 bytes	C: 4 bytes R: 4 bytes	38.75 ms

**Figure 3.47** : Temps de transmission des données pour certaines commandes typiques avec le protocole T = 1 2 bits d'arrêt et 8 octets de données par commande (C = commande, R = réponse)

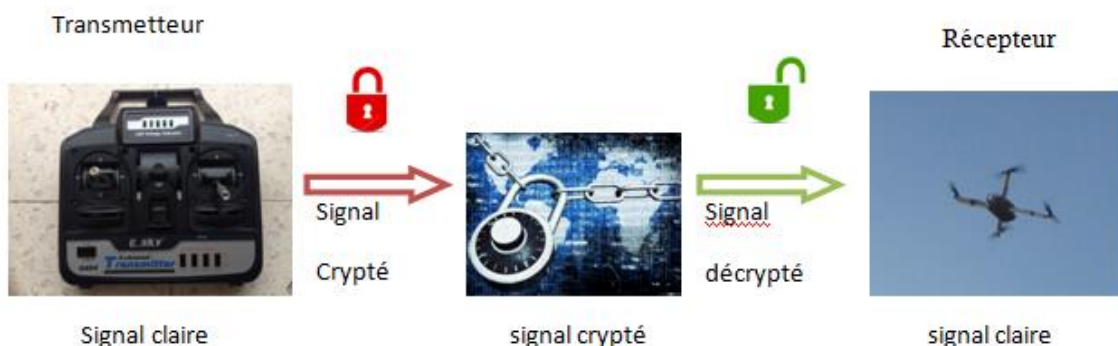
### 3.7 Méthode de travail

Le data encryptions standard (DES) est un algorithme de chiffrement symétrique utilisant des clés de 56 bits. Son emploi n'est plus recommandé aujourd'hui, du fait de sa lenteur à l'exécution et de son espace de clés trop petit permettant une attaque symétrique en un temps raisonnable. Quand il est encore utilisé c'est généralement été utilisé dans le système de mots de passe Unix.

Dans notre projet nous avons une carte à puce avec contact, de modèle carte SIM pour réaliser la partie sécurité (cryptage) des données de communication entre la télécommande et le drone, avec Authentification par clé symétrique et utilisation de l'algorithme Digital Encryptions Standard (DES). Nous utilisons le protocole de transmission T = 1 orienté bloc. Pour récupérer le code de retour de la carte SIM nous utilisons l'interface « Moniteur Série », présenté dans la figure 3.48.

### 3.8 Principe de la sécurité des données entre la télécommande et le drone

La figure 3.48 présente le principe de fonctionnement de la sécurité et cryptage des données entre la télécommande et le drone.



**Figure 3.48** : Principe de la sécurité des données entre la télécommande et le drone



# **Chapitre 4 :**

## **Réalisations**

### 3.10 Introduction :

Ce chapitre porte sur les différentes étapes de la réalisation de notre drone. Nous allons présenter toutes les pièces électroniques avec lesquelles nous avons travaillé, leur conception et les schémas électroniques, sans oublier les problèmes que nous avons rencontrés.

## 3.11 Présentation des pièces du drone

### 3.11.1 Microcontrôleur

L'Atmel® picoPower® ATmega328 / P est un CMOS 8 bits de faible puissance microcontrôleur basé sur l'architecture RISC améliorée AVR®. Il est capable d'exécuter des instructions puissantes dans un seul cycle d'horloge, l'ATmega328 / P atteint des débits proches de 1MIPS/MHz. Cela permet au système concepteur d'optimiser l'appareil pour la consommation d'énergie par rapport à la vitesse de traitement [15].

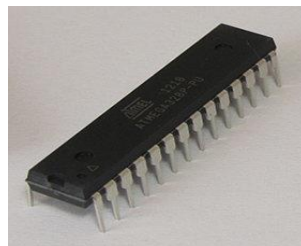


Figure 4.51 : Microcontrôleur

#### 3.11.1.1 Caractéristiques

Le tableau 4.8 illustre les caractéristiques du microcontrôleur que nous allons utiliser.

Caractéristiques	ATmega328/p
Flash (Bytes)	32K
SRAM (Bytes)	2K
EEPROM (Bytes)	1K
General Purpose I/O Lines	23
SPI	2
TWI (I2C)	1
USART	1
ADC	10-bit 15kSPS
ADC Channels	8
8-bit Timer/Counters	2
16-bit Timer/Counters	1
Pin Count	28/32
Write/Erase Cycles	10,000 Flash/100,000 EEPROM
Data Retention:	20 years at 85°C/100 years at 25°C
MIPS	Up to 20 MIPS Throughput at 20MHz

Tableau 4.8 : Présentation des caractéristiques du microcontrôleur ATmega328/p

3.11.1.2 Architecture de l'ATmega328/p

La figure 4.52 présente le bloc diagramme du microcontrôle que nous allons utiliser dans notre projet.

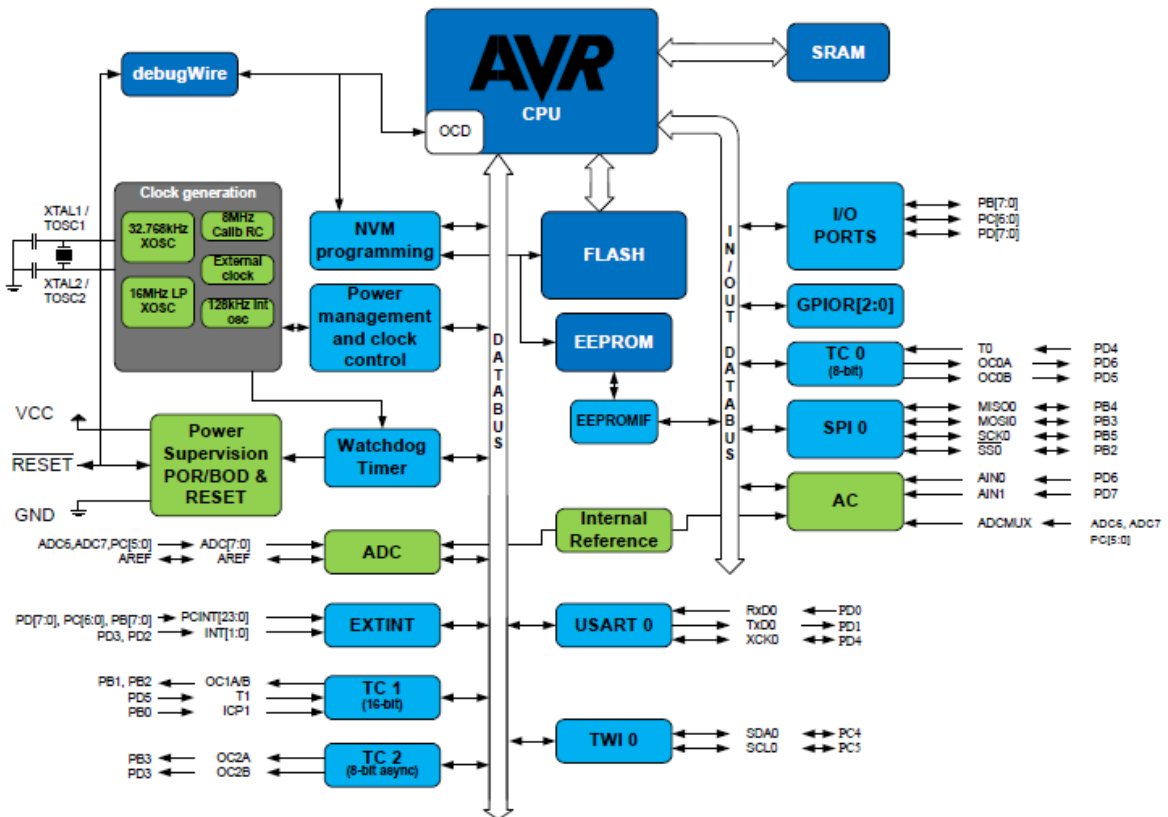


Figure 4.52 : Bloc diagramme de l'ATmega328/p

3.11.1.3 Exécutions d'instructions

3.11.1.3.1 L'instruction parallèle

La figure 4.53 présente l'exécution des instructions parallèles du microcontrôle.

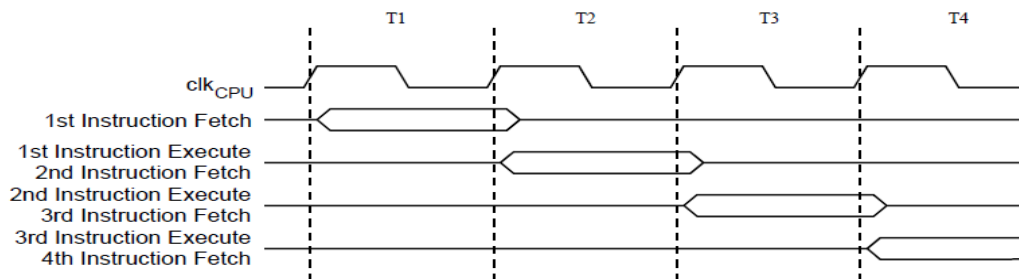


Figure 4.53 : L'instruction parallèle est récupérée et exécutée

3.11.1.3.2 L'instruction ALU à cycle unique

La figure 4.54 présente l'exécution de l'instruction à cycle unique du microcontrôle.

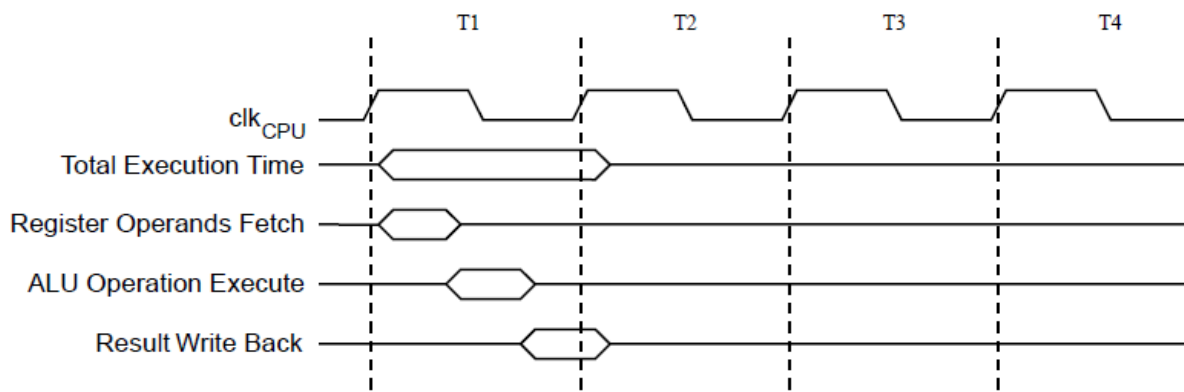


Figure 4.54 : Opération ALU à cycle unique

### 3.11.2 Hélice

En mécanique, l'hélice est un dispositif formé de plusieurs pales disposées régulièrement autour d'un axe. Lorsque son axe entre en rotation, ce système décrit des hélices dans un fluide en avançant perpendiculairement au plan de rotation, grâce aux pales orientées suivant un certain angle de calage qui prennent appui sur le fluide. Une hélice peut donc être motrice (transfert d'énergie vers le fluide : avion) ou réceptrice (récupération d'énergie depuis le fluide : turbine)



Figure 4.55 : Les hélices



Figure 4.56 : Hélice cw et ccw

### 3.11.3 Moteurs BLDC

Ce moteur est essentiellement un aimant permanent tournant autour d'un ensemble de conducteurs qui transportent du courant continu pendant un angle de rotation fixe, typiquement 60 degrés " électriques ". Il est équivalent à un moteur à collecteur continu inversé, en ce sens que l'aimant tourne pendant que les conducteurs restent immobiles. Dans les deux cas, le courant doit inverser la polarité (sur la direction) chaque fois qu'un pôle magnétique passe, pour s'assurer que le couple est unidirectionnel[16].

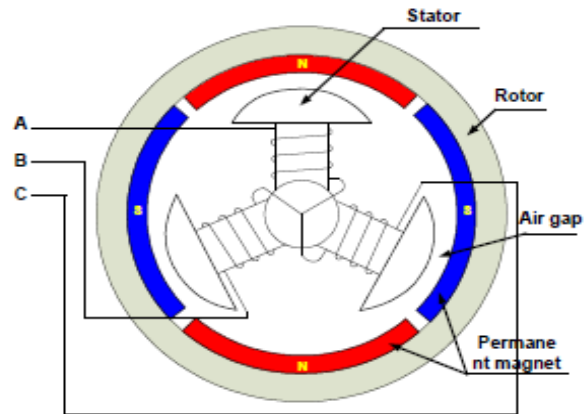


Figure 4.57 : Diagramme du moteur BLDC [16]

La figure 4.58 présente le moteur BLDC que nous avons utilisé dans notre projet.



Figure 4.58 : Moteur BLDC

### 3.11.3.1 Caractéristiques du moteur BLDC

- Référence AIR2213
- Curent 20 A
- Tension 11.1 V – 14.8 V
- Fréquence 600 Mhz
- KV 920 rpm/V
- Poids 54 g



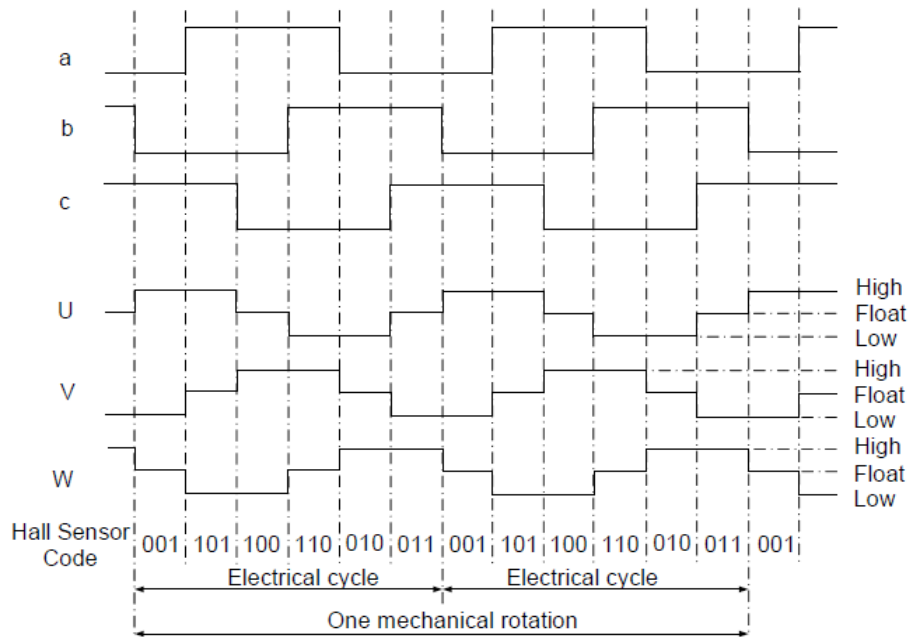


Figure 4.59 : Capteur du moteur BLDC triphasé en fonction du temps d'entraînement

Specifications:

KV.....920

Configuration.....9N12P

Stator Diameter.....22mm

Stator Length.....13mm

Shaft Diameter.....4mm

Motor Dimensions(Dia.\*Len)..... $\Phi 27.5 \times 30$ mm

Weight (g).....54g

Idle current(10)@10v(A).....0.5A

No. of Cells(Lipo).....3-4S

Max Continuous current(A)180S.....18A

Max Continuous Power(W)180S.....230W

Max. efficiency current.....(3-10A)>83%

internal resistance.....132m $\Omega$

Item No.	Volts (V)	Prop	Throttle	Amps (A)	Watts (W)	Thrust (g)	RPM	Efficiency (g/W)
AIR 2213 KV920	11.1	T 9545	50%	2	22.2	240	4400	10.81
			65%	3.8	42.18	386	5900	9.15
			75%	5.5	61.05	490	6900	8.03
			85%	7.2	79.92	594	7800	7.43
			100%	9.8	108.78	722	8300	6.64
	12		50%	2.3	27.6	278	4800	10.07
			65%	4.4	52.8	445	6300	8.43
			75%	6.2	74.4	568	2200	7.63
			85%	8.1	97.2	679	8100	6.99
			100%	10.9	130.8	813	8900	6.22
	14.8		50%	3.3	48.84	403	5700	8.25
			65%	6.2	91.76	636	7600	6.93
			75%	8.4	124.32	786	8600	6.32
			85%	10.7	158.36	907	9500	5.73
			100%	14.3	211.64	1084	10200	5.12

Figure 4.60 : Caractéristiques et spécifications du moteur BLDC air 2213 920 KV

### 3.11.4 ESC (electronic speed control) régulateur de vitesse électronique

L'ESC "electronic speed control" est un circuit électronique utilisé pour varier la vitesse d'un moteur électrique. Il est utilisé aussi pour les moteurs sans balais fournissant essentiellement une source d'énergie électrique basse tension.



Figure 4.61 : ESC Contrôle de vitesse électronique

### 3.11.5 Distributeur de puissance

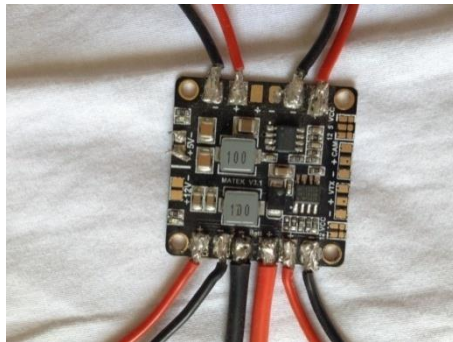


Figure 4.62 : Distributeur de puissance

C'est une carte d'alimentation pour les moteurs électriques et la commande.

### 3.11.6 Batterie LiPo

Les batteries au lithium-polymère (appelées ci-après batteries «LiPo») sont des batteries les plus utilisées actuellement dans de nombreux appareils électroniques grand public.

Ils ont gagné en popularité dans l'industrie de la radiocommande au cours des dernières années, et sont maintenant devenues très recherchées pour leur durée de vie et de leur puissance élevée.

### 3.11.6.1 Caractéristiques de la batterie LiPo

- Nombre de cellules est 4 (LiPo S4)
- Tension 14.8 V
- Capacité 3700 mAh
- Taux de décharge 45C



**Figure 4.63** : Batterie LiPo S4

### 3.11.7 Châssis

C'est un support qui porte tous les éléments du drone. Les matériaux utilisés doivent être solides et légers comme la fibre de carbone, l'aluminium...etc. La forme du support du drone doit être symétrique par rapport au centre de gravité, pour garder les performances aérodynamiques du drone pendant le vol.



**Figure 4.64** : Châssis du drone

### 3.11.8 Chargeur batterie LiPo

Cet appareil est spécial pour charger, décharger et équilibrer entre les cellules de ce type de batterie.



**Figure 4.65** : Chargeur batterie LiPo

### 3.11.9 Radio fréquence

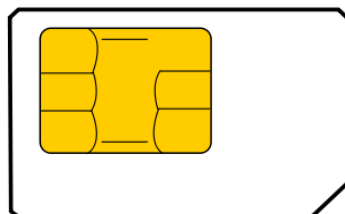
Le composant RF24101 c'est un composant électronique émetteur-récepteur à puce unique 2,4GHz de la technologie mems. Il est adapté aux applications sans fil à très faible consommation d'énergie. Dans notre cas nous avons travaillé avec le model NRF24L01, présentédans la figure 4.66.



**Figure 4.66** : Radio fréquence NRF24L01+

### 3.11.10 Carte à puce

Une carte à puce est un jeton de sécurité doté d'une puce intégrée. Elle se connecte à un lecteur par contact physique direct.



**Figure 4.67** : Carte à puce SIM

### 3.11.11 Capteur IMU

L'IMU (Inertial Measurement Unit) est une centrale inertielle permettant de calculer, grâce à un accéléromètre 3 axes et un gyroscope 3 axes, les déplacements d'un mobile par rapport à une référence, qui est le point d'origine de la centrale inertielle. Notre capteur IMU type GY87 contient un gyroscope accéléromètre MPU-6050, BMP180 et un magnétomètre HMC5883L.



Figure 4.68 : Capteur IMU baromètre

### 3.11.12 Moniteurs basse tension avec alarme pour batteries LiPo 1-8S

C'est un système d'alarme pour les batteries LiPo. Le déclenchement de l'alarme est activé lorsque la tension est inférieure à la valeur de seuil.



Figure 4.69 : Moniteur de voltage

## 3.12 Présentation des pièces de la télécommande

### 3.12.1 Joystick

Le joystick (figure 4.70) est un levier qui pivote horizontalement de gauche à droite suivant l'axe des X et verticalement de bas en haut suivant l'axe des Y. Chaque axe est relié à un potentiomètre qui transmet les coordonnées des déplacements.



Figure 4.70 : Joystick

### 3.12.2 Boutons poussoir



Figure 4.71 : Bouton poussoir

### 3.12.3 LED Indicateur de tension

C'est une carte électronique permettant de contrôler la tension de la batterie à travers les LEDs.

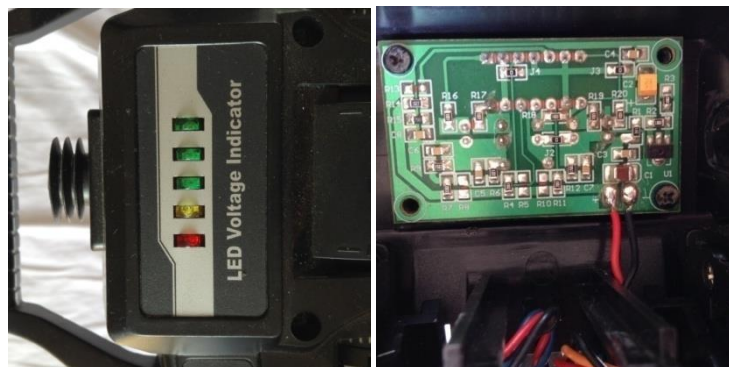


Figure 4.72 : LEDindicateur de tension

## 3.13 Schéma électronique

### 3.13.1 Schéma du drone

Les figures suivantes présentent les schémas électroniques du notre projet.

#### 3.13.1.1 Interconnexions des pièces électronique du drone

Nous présentons ci-après le schéma d'interconnexions de tous les éléments du drone.

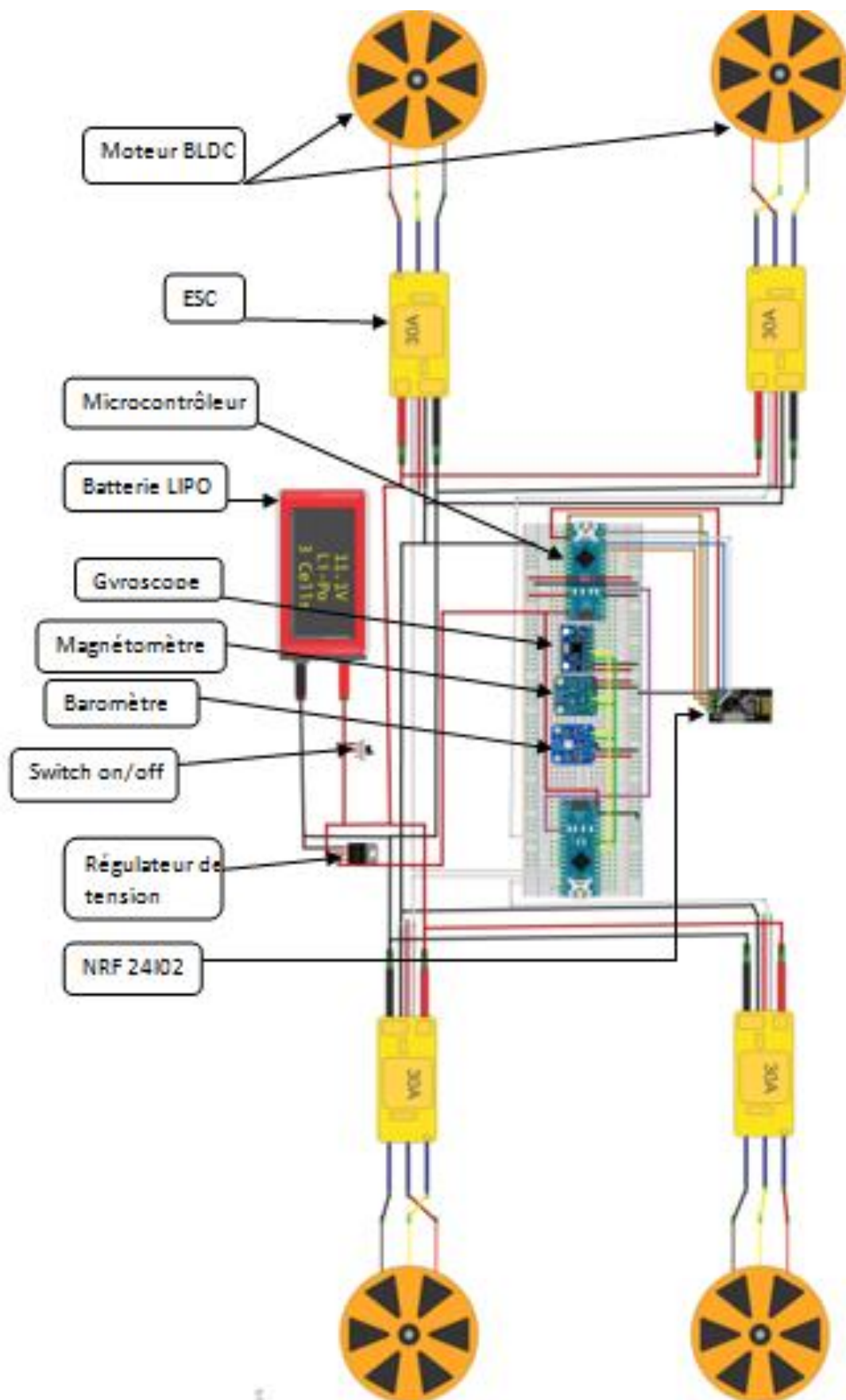
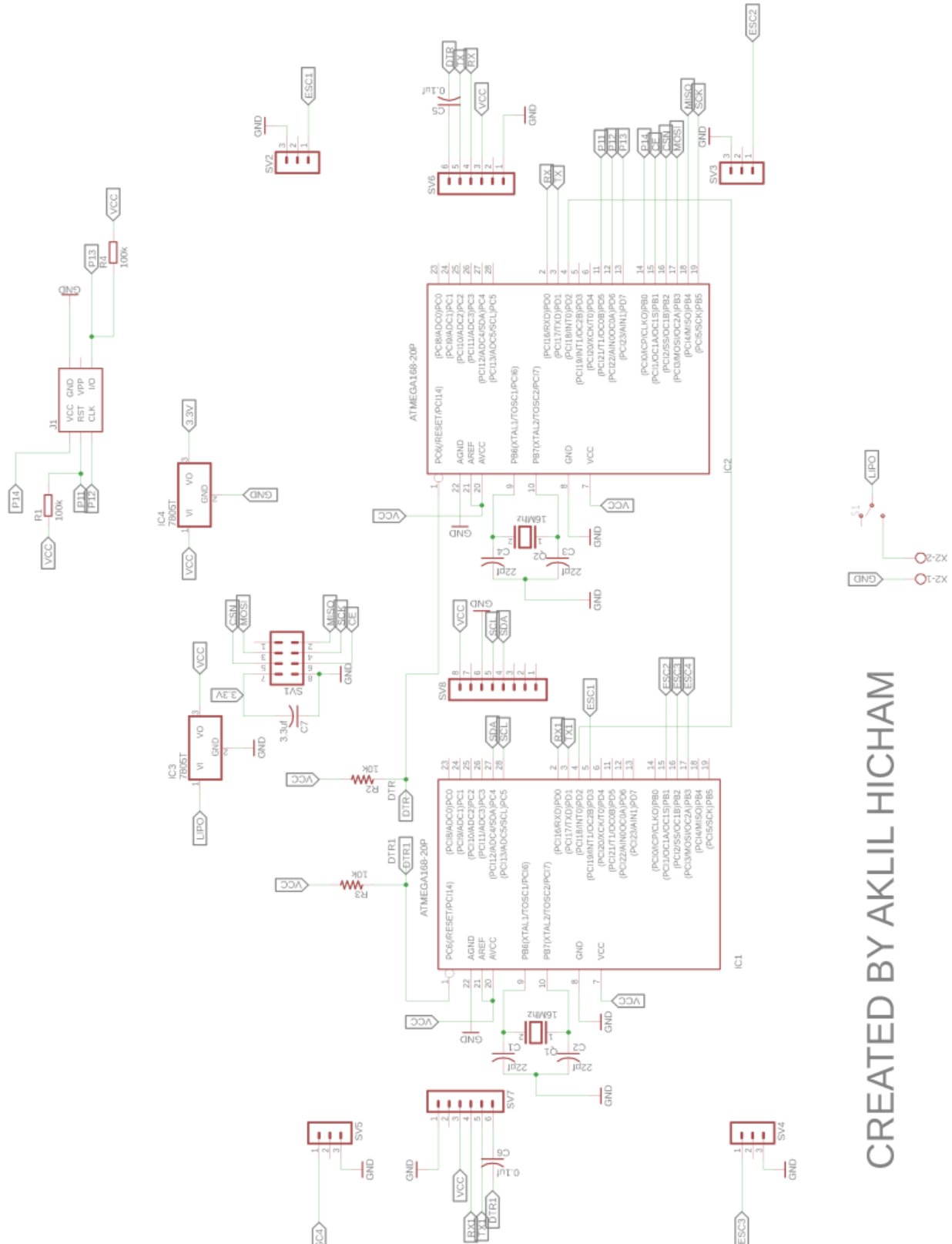


Figure 4.73 : schéma d'interconnexions des éléments du drone

3.13.1.2 Conception de la carte mère du drone

La figure 4.74 illustre le schéma électronique de la conception de la carte mère (carte de pilotage) de notre drone.



CREATED BY AKLIL HICHAM

Figure 4.74 : Schéma électronique de la carte de pilotage



3.13.1.3 Carte mère du drone

La figure 4.75 présente la conception de la carte mère de notre drone.

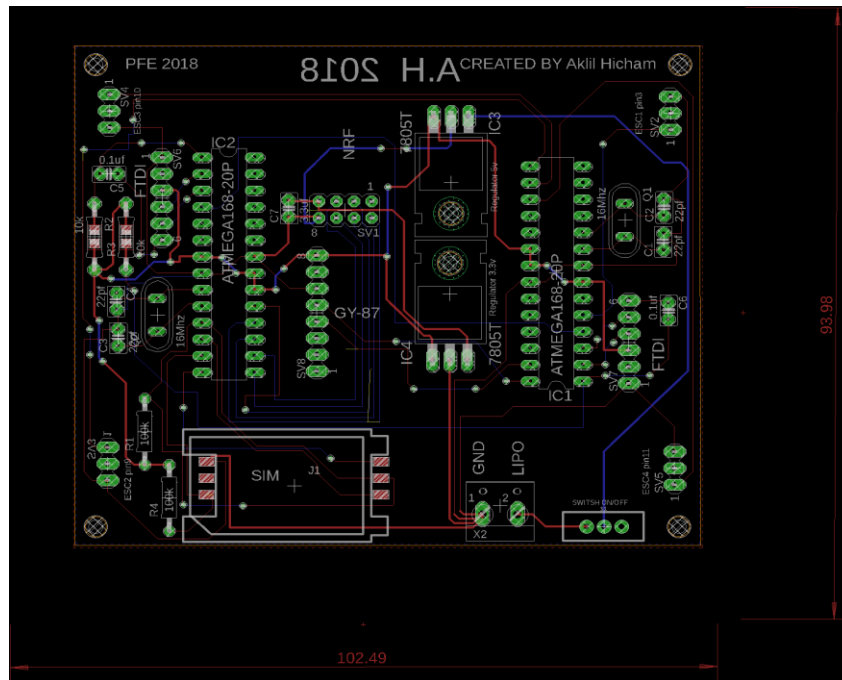


Figure 4.75 : Conception de la carte de pilotage

3.13.2 Schéma de la télécommande

3.13.2.1 Interconnexions des pièces électronique de la télécommande

La figure 4.76 présente l'interconnexion des composants électronique de la télécommande.

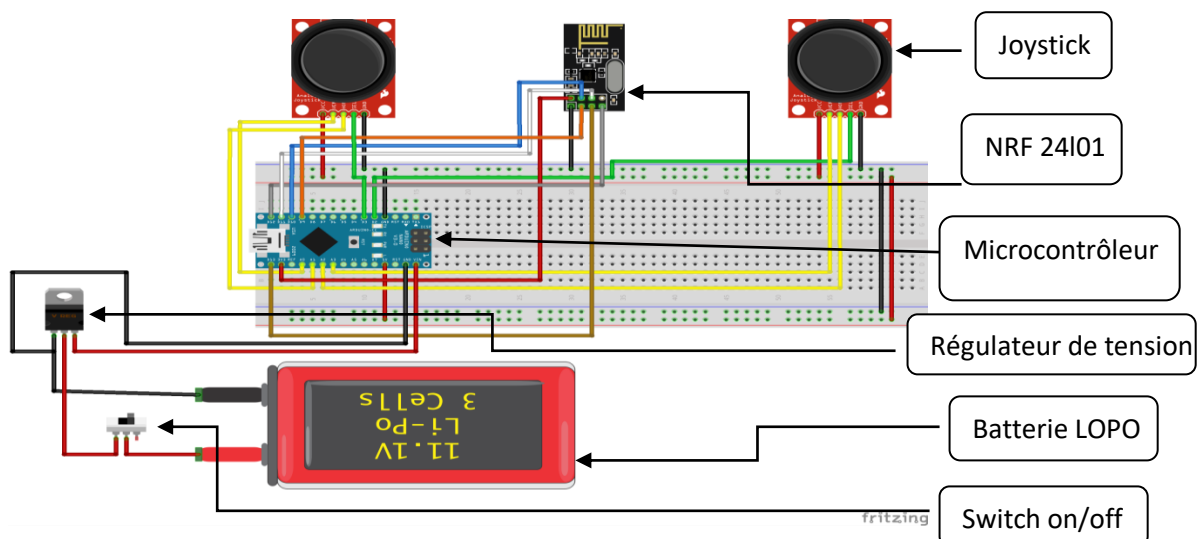


Figure 4.76 : Schéma d'interconnexions des éléments de la télécommande

3.13.2.2 Conception de la carte mère de latélécommande

La figure 4.77 illustre la conception de la carte mère de la télécommande.

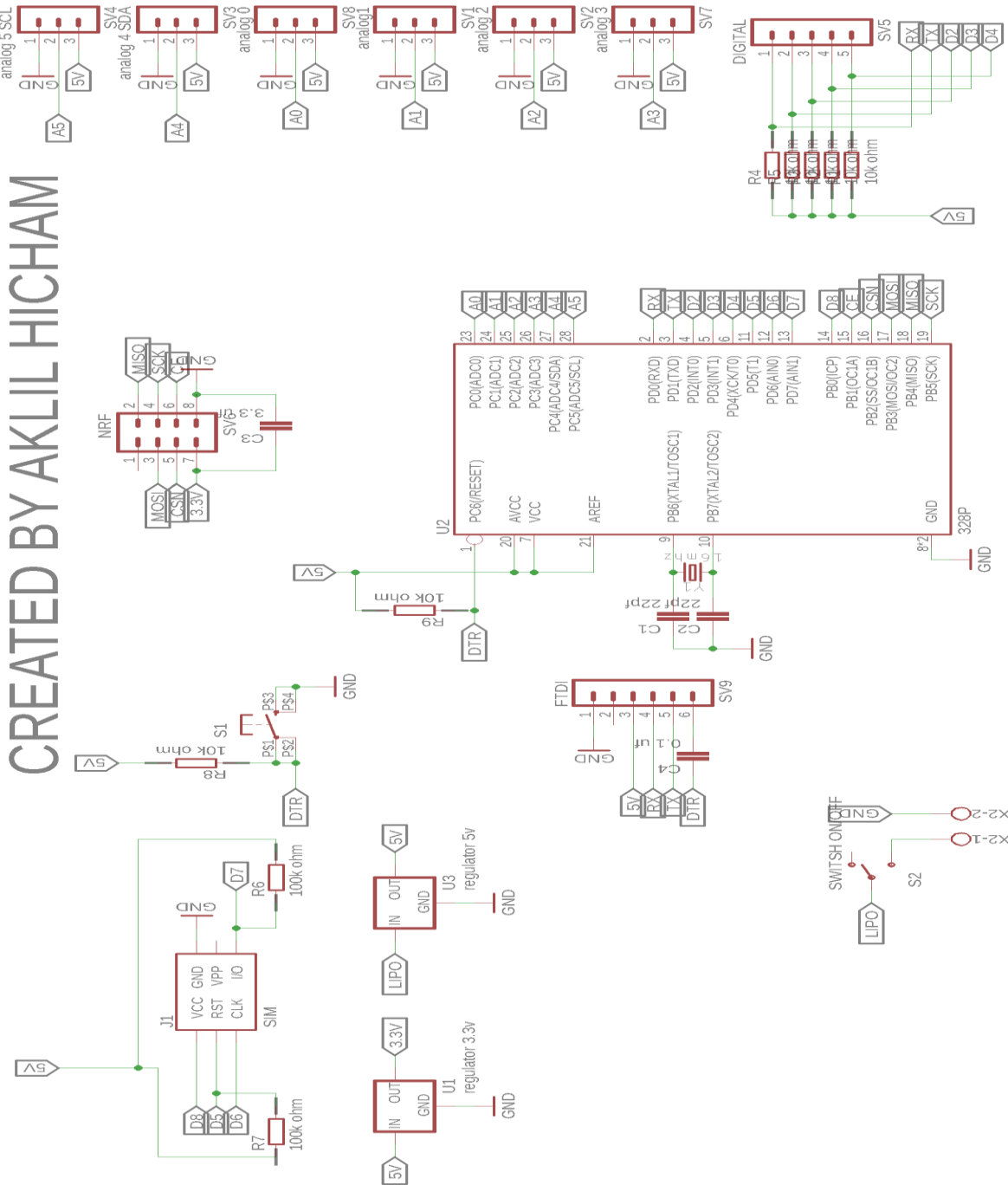


Figure 4.77 : Schéma électronique de la carte de télécommande

3.13.2.3 Carte mère de la télécommande

La figure 4.78 montre la conception de la carte mère de la télécommande.

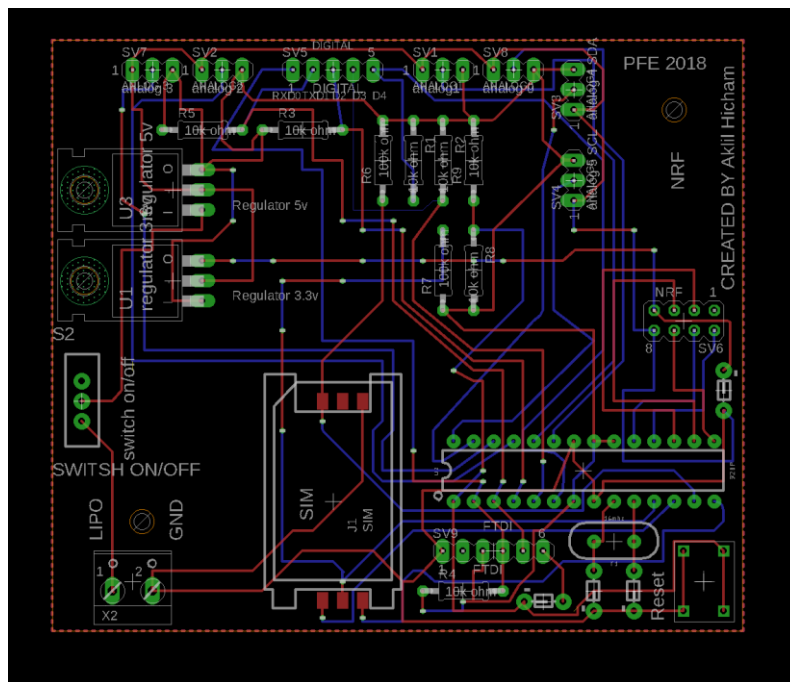


Figure 4.78 : Conception de la carte mère de la télécommande

3.13.3 Schéma du système de suivi en temps réel

La figure 4.79 illustre le schéma d'interconnexions des éléments du système de suivi en temps réel.

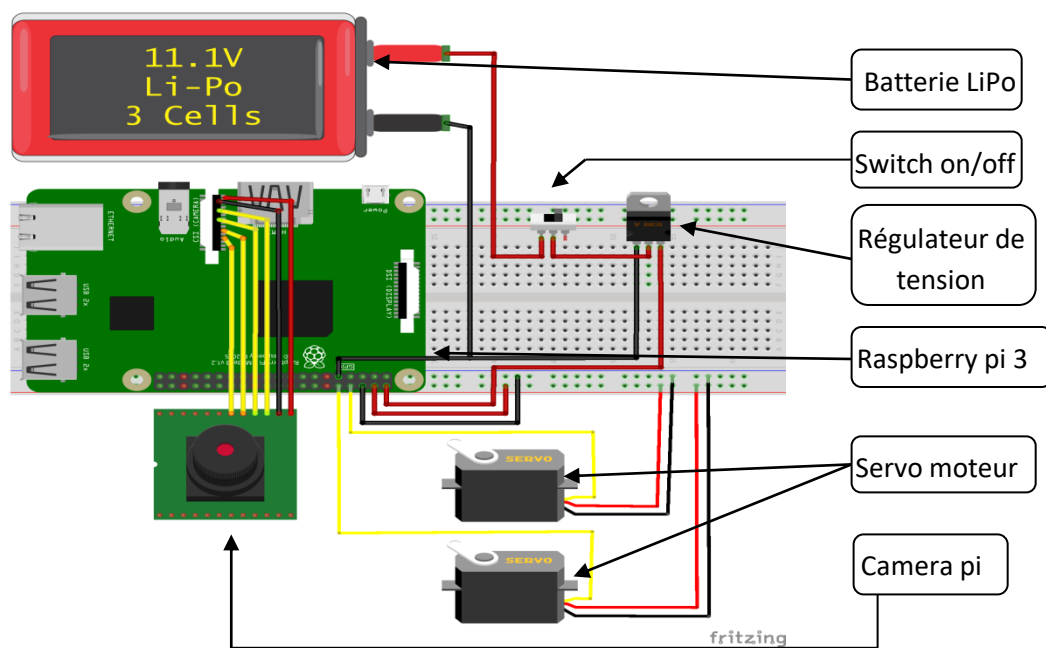


Figure 4.79 : Schéma d'interconnexions les éléments du système de suivi en temps réel

### 3.14 Calcul de la durée de vol

Pour calculer la durée de vol de notre drone il faut effectuer ces étapes:

#### 3.14.1 Calculer le poids de drone

C'est la somme des poids de chaque élément du drone. Le poids de notre drone est d'environ 1600 g.

#### 3.14.2 Caractéristiques des moteurs

En effet, c'est eux qui vont produire la poussée nécessaire pour soulever du sol notre drone. Les caractéristiques qui vont nous intéresser dépendent donc du type d'hélice, il s'agit de la poussée fournie en grammes (g) et de l'intensité du courant consommé en Ampères (A). D'après les caractéristiques du constructeur, notre moteur va fournir 1084 g de poussée pour 14,3 A à 100% de puissance. Donc les 4 moteurs fourniront **4336 grammes** de poussée. Pour 50% de puissance, le moteur va fournir 403 g de poussée pour 3,3 A. Les 4 moteurs fourniront **1612 grammes** de poussée.

#### 3.14.3 Rapport Poids/Poussée (Weight to Lift Ratio)

Il s'agit du rapport entre le poids de l'engin et de la poussée que fournissent ses moteurs. Plus celui-ci est bas, proche de 0, et plus le rendement est meilleur. Dans l'idéal il est toujours inférieur à 0,5 (2 fois plus de poussée que le poids de l'engin afin de pouvoir monter).

\_ Pour 50% d'énergie :  $WTL = 1600/1612 = 0,99$

\_ Pour 100% d'énergie :  $WTL = 1600/4336 = 0,369$

#### 3.14.4 Consommation

Nous supposons que la consommation soit linéaire pour faciliter les calculs. On multiplie donc ces 3,3A pour 50% de consommation et 14,3A pour 100% de consommation par le rapport WTL calculé précédemment.

Pour 50% : Consommation =  $3,3 \times 0,99 = 2,267$  A (et donc 13,068 A pour nos 4 moteurs).

Pour 100% : Consommation =  $14,3 \times 0,369 = 5,267$  A (et donc 21,106 A pour nos 4 moteurs).

#### 3.14.5 Durée de vol

Pour finir le calcul, nous avons besoin des caractéristiques de la batterie. Nous avons une batterie 3700 mAh (3,7 Ah). En pratique on ne décharge pas une LiPo en dessous de 25%. Nous avons donc une réserve d'énergie utilisable de  $3700 \text{ mAh} \times 0,75 = 2775 \text{ mAh}$

Pour 50% : Temps de vol =  $2,775 \text{ Ah} / 13,068 \text{ A} = 0,212 \text{ h} = \mathbf{13 \text{ minutes}}$

Pour 100% : Temps de vol =  $2,775 \text{ Ah} / 21,106 \text{ A} = 0,131 \text{ h} = \mathbf{8 \text{ minutes}}$

### 3.15 Étapes de fabrication du drone

#### 3.15.1 Première étape

Dans cette étape, nous avons commandé notre drone avec une télécommande et un récepteur infra rouge. Pour la variation de la vitesse des moteurs ainsi que la direction du drone. Nous avons travaillé avec la carte de développement arduino pour la commande.

Dans le 1<sup>er</sup> prototype nous avons fabriqué le châssis du drone avec le bois car il est léger et un peu solide. La figure 4.80 présente notre 1<sup>er</sup> prototype.



Figure 4.80 : 1er prototype de drone

#### 3.15.1.1 Problèmes de Première étapes

Les problèmes que nous avons rencontrés dans cette étape, sont liés à la structure du drone et à la télécommande.

##### 3.15.1.1.1 Concernant la télécommande :

- La portée de la télécommande ne dépasse pas 6 mètre maximum.
- Le temps de réception est très long et cela ne mène à aucun contrôle du drone.
- Interférences dans les rayons infra rouges externes qui affectent le contrôle du drone.

##### 3.15.1.1.2 Concernant la structure du drone :

La structure du drone en bois n'est pas dure et se déforme à chaque atterrissage. Sur cette base, nous avons développé la deuxième version que nous présenterons dans la prochaine étape.

#### 3.15.2 Deuxième étape

Dans cette étape nous avons commandé notre drone avec une télécommande modifiée de manette d'une PlayStation avec émetteur récepteur radio fréquence NRF24L01. Pour la variation de la vitesse des moteurs ainsi que la direction du drone, nous avons travaillé avec la carte de

développement arduino pour la commande. Afin de garantir la stabilité nous allons utiliser le capteur gyroscope gy521.

Dans le deuxième prototype, nous avons fabriqué le châssis du drone avec de l'aluminium. La figure 4.81 présente notre deuxième prototype.



**Figure 4.81** : Deuxième prototype de drone

### 3.15.2.1 Problèmes de la deuxième étape

Les problèmes que nous avons rencontrés dans cette étape sont liés au joystick de la télécommande et de l'interférence des signaux du capteur gyroscope.

#### 3.15.2.1.1 Concernant le joystick de la télécommande :

Cette pièce électronique n'est pas pratique pour augmenter la vitesse des moteurs car le levier qui pivote est centré sur l'axe.

#### 3.15.2.1.2 Concernant le capteur gyroscope :

Le champ électromagnétique au tour du capteur affecte le gyroscope lorsqu'il est en contact avec le métal et à son tour donne des résultats instables.

Il n'y a pas de stabilité du drone.

Sur cette base, nous avons développé la troisième version décrite ci-après.

### 3.15.3 Troisième étape

Dans cette étape nous avons récupéré une télécommande endommagée et nous avons utilisé sa structure et les joysticks. Nous avons gardé le même émetteur récepteur radio fréquence NRF24L01. Nous avons construit une carte PCB pour relier les composants électroniques et le microcontrôleur ATmega328/p.

Afin de garantir la stabilité du drone, nous avons utilisé le capteur gyroscope gy87, dans lequel nous avons introduit un modèle de command PID dans le programme.

Dans le troisième prototype, nous avons apporté des modifications dans le châssis du drone. La figure 4.82 présente notre troisième prototype.



**Figure 4.82** : Troisième prototype de drone

### 3.16 Test de vol

Nous avons mené les tests de vol sur un espace ouvert pour changer à chaque fois les coefficients de la régulation PID  $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$  afin d'avoir une bonne stabilité du drone. La figure 4.83 illustre les premiers tests.



Figure 4.83 : 1er test de vol

### 3.17 Participation aux événements et aux compétitions

#### 3.17.1 Participation au regroupement national « Student's Camp » à SOUK AHRAS

Nous avons participé et présenté notre drone au regroupement national « student's camp » qui s'est tenu du 18 au 23 mars 2017 à l'Université Mohamed Cherif Messaadia SOUK AHRAS.

Ce regroupement national réunit tous les clubs scientifiques du pays dans le but de se rencontrer, d'échanger leurs idées et leur expertise, d'initier et de renforcer leur coopération sur des sujets, sous le slogan « Entrepreneurial et leadership ».

#### 3.17.2 Participation à la compétition scientifique « yawm el ailm » à l'université de boumerdes

Nous avons participé avec le drone et d'autres projets à l'exposition et la compétition du « yawm el ailm » qui s'est tenu du 14 au 26 avril 2017 à l'Université M'hamed Bougara Boumerdes.

Cette compétition réunit tous les clubs de l'université dans le but de se rencontrer, d'échanger leurs idées et leur expertise. Nous avons eu la 1<sup>ère</sup> place avec notre club scientifique ELECTRO.





Figure 4.84 : Participation et obtention de la 1<sup>ère</sup> place à la compétition « yawm el ailm »

### 3.17.3 Participation au salon national des recherches scientifique « SAFEX »

Nous avons participé avec le drone et d'autres projets au salon national des produits de la recherche à « SAFEX » qui s'est tenu du 18 au 21 mai 2017 au palais des expositions SAFEX.

Ce salon a réuni des chercheurs dans le but de se rencontrer, d'échanger leurs idées et leur expertise, d'initier et de renforcer leur coopération sur des sujets liés aux recherches scientifiques. Il se positionne comme une plate-forme pour les chercheurs et les praticiens à la fois du milieu universitaire et de l'industrie pour se rencontrer et partager la recherche de pointe et le développement dans différents domaines.



Figure 4.85 : Participation et obtention de la 1<sup>ère</sup> place à la compétition nationale « SAFEX »

### 3.17.4 Participation au carrefour national « des jeunes scientifiques et des jeunes inventeurs » à Tizi ouzou

Nous avons aussi participé avec le drone et d'autres projets au carrefour national des jeunes scientifiques et des jeunes inventeurs qui s'est tenu du 2 au 7 juillet 2017 à Tizi Ouzou.



**Figure 4.86 :**Participation au carrefour national à Tizi Ouzou

### 3.18 Conclusion

Ce chapitre a présenté tous les composants électroniques que nous avons utilisés dans notre projet. Nous avons présenté les différentes étapes de réalisation, ainsi que les problèmes rencontrés lors de la fabrication.

Dans ce chapitre plusieurs étapes pour fabriquer notre drone et atteindre un modèle presque stable ont été décrites. Les problèmes que nous avons rencontrés sont liés soit à la télécommande à la 1ère étape, ou bien à la structure du drone et du capteur gyroscope dans la seconde étape.

### CONCLUSION GENERALE

La diversité des quadri-rotor présents sur le marché montre effectivement un développement rapide de ce secteur. Que ce soit dans le développement des appareils ou de leur utilisation à des fins lucratives. Ce projet nous a permis de constater l'amélioration significative des divers composants d'un quadri-rotor au cours de ces dernières années, avec une touche particulière que nous avons apportée.

Ce projet a permis de mettre en évidence l'importance du choix des différents constituants d'un quadri-rotor. De par sa conception, un multi-copter est très facilement déstabilisé. Que ce soit par un déséquilibre des composants, une mauvaise gestion de la régulation ou des vibrations faussant la lecture des capteurs. La réalisation d'un tel modèle demande dès lors une bonne connaissance à la fois en mécanique mais également dans l'électronique et la régulation des capteurs.

L'objectif de notre travail était de proposer un modèle de drone pouvant être utilisé dans plusieurs domaines selon leurs caractéristiques, particulièrement sensible comme dans le domaine militaire. Nous avons donc établi une relation entre la sécurité des données et le contrôle du drone.

La plateforme a pu être testée et montre une stabilisation suffisante au développement d'applications supplémentaires. Sa poussée utile permet largement de supporter l'ajout d'autres capteurs. Notamment pour la reconnaissance de la position dans le plan ou pour l'évitement d'obstacles et surtout le traitement des informations récupérés par la caméra. Une caméra de quelques centaines de grammes pourrait également être ajoutée afin de permettre des missions d'observations. Malheureusement le temps et l'équipement ne nous a pas permis d'étendre notre objectif, et reste dans les perspectives de ce projet.

## Bibliographie

- [1] G. Charland-arcand. "Commande Non Linéaire Par Backstepping D'un Hélicoptère De Type Quadrotor Pour Des Applications Autonomes". M. Ing., Université Du Québec, Canada, 2014.
- [2] A. Drouot. "Stratégies de Commande pour la Navigation Autonome d'un Drone Projectile Miniature". Thèse, Université de Lorraine, France, 2013.
- [3] M. De Lellis. "Modélisation, Identification Et Contrôle D'un Avion Quadrirotor". Thèse, Université Technique Tchèque, Tchèque, 2011
- [4] T. Bresciani. "Modélisation, Identification Et Contrôle D'un Hélicoptère Quadrirotor". Thèse, Université de Lund, Suède, 2008
- [5] T. Jiřinec. "Stabilisation Et Contrôle De Quadcopter Sans Pilote". M. Thèse, Université Technique Tchèque, Tchèque. 2011
- [6] S. Bouabdallah, P. Murrieri, R. Siegwart, 2005. Towards Autonomous Indoor Micro VTOL. *Autonomous Robots*, 18(2), 171-183.
- [7] P. Castillo, R. Lozano, A. Dzul. Stabilization of A Mini Rotorcraft With Four Rotors. *Control Systems, IEEE*, 2005
- [8] T. Eisenbarth, Y. Teglia. Smart Card Research and Advanced Applications. Switzerland: Springer, 1973, pp.
- [9] A. Koehl. "Modélisation, Observation et Commande d'un Drone Miniature à Birotor Coaxial". Thèse, Université de Lorraine, France, 2012.
- [10] InvenSense Inc. (2013, septembre 19). MPU-6050 Product Specification. (3.4 édition). [On-line]. Available <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/> [May 21, 2015].
- [11] Nordic. (2008, septembre 9). Product Specification. (1.0 édition). [On-line]. Available <https://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24L01P> [Fev 17, 2016].

## Bibliographie

---

- [12] R.Wolfgang,E.Wolfgang. Smart Card Handbook. Munich Germany: John Wiley & Sons Ltd, 2003, pp.
- [13] P. Urien. (2007, octobre 7). Carte à puce. (1<sup>th</sup> edition). [On-line]. Available: [https://perso.telecom-paristech.fr/urien/cours\\_cartes\\_urien-2008.pdf](https://perso.telecom-paristech.fr/urien/cours_cartes_urien-2008.pdf)[avril 21, 2018].
- [14]R.A. Nelson. Authentication Techniques for Smart Cards. U.S: Westinghouse Hanford Company, 1994, pp.
- [15] datasheet ATmega328/p
- [16] J.Zhao,Y.Yu. “ Brushless DC Motor Fundamentals Application Note”.Internet: [www.MonolithicPower.com](http://www.MonolithicPower.com), Juil, 2011 [Avr. 6, 2018].
- [17]The Science of Information Integrity, Simmons, Ed.; pp. vii-xv; IEEE Press; New York, N.Y.; 1992
- [18] M.Ben."An Overview of Enhanced User Authentication".Proceedings of CardTech;Arlington, Va. April 1993, pg. 847.