



Université ABBES LAGHROUR Khenchela  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Industriel  
جامعة عباس لغرور خنشلة  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم الهندسة الصناعية



N° Série : .....

## Mémoire de fin d'étude

*présenté pour l'obtention du diplôme de Master*

**Filière : Automatique.**

**Spécialité : Automatique et informatique  
industrielle.**

### THEME

**Etude et simulation des différentes  
techniques de transmission sans fil  
utilisées dans le contrôle des drones.**

*Réalisées par : - Melle TALLOUS Dounia.  
- Melle MERZOUGUI Hizia.*

*Devant Le Jury :*

<i>Président:</i>	<i>Mme. FARIHA Souad.</i>
<i>Rapporteur:</i>	<i>Dr. CHERGUI Laid.</i>
<i>Examineur:</i>	<i>Mr. BOUMAARAF Abelali.</i>

*Promotion 2021/2022*



# Résumé



## المخلص:

يمكن التحكم في المركبات الجوية غير المأهولة (UAVs) ، المعروفة باسم الطائرات بدون طيار ، إما عن طريق التحكم عن بعد (باللغة الإنجليزية: remote control RC) بواسطة مشغل طيار ، أو بشكل مستقل عن طريق كمبيوتر التحكم. تعد قناة اتصال الطائرات بدون طيار عاملاً رئيسياً يمكن أن يؤثر على أداء ارتباط البيانات من حيث معدل البيانات المرتفع والنقل الموثوق للمعلومات.

في هذه الرسالة ، قدمنا الدراسة النظرية لتقنيات الإرسال المستخدمة في التحكم في الطائرات بدون طيار ، وهي: قفز التردد الطيف المنتشر (FHSS) ، طيف انتشار التسلسل المباشر (DSSS) وتعدد الإرسال بتقسيم التردد المتعامد (OFDM).

لقد طبقنا هذه التقنيات ودرسنا أدائها عن طريق المحاكاة تحت MATLAB. تم تقييم أداء هذه التقنيات من حيث معدل الخطأ في البايث (BER). تتمتع هذه التقنيات بأداء جيد من حيث حماية البيانات من التداخل.

**الكلمات المفتاحية:** طائرات بدون طيار ، OFDM ، FHSS ، DSSS ، تحكم ، اتصالات.

## Résumé:

Les véhicules aériens sans pilote (en anglais : unmanned aerial vehicles (UAVs)), communément appelés drones, peuvent être contrôlés soit sous contrôle à distance (en anglais : remote control RC) par un opérateur pilote, soit de manière autonome par des ordinateurs de bord. Un canal de communication UAV est un facteur clé qui peut affecter les performances de la liaison de données en termes de débit de données élevé et de transmission fiable des informations

Dans ce mémoire, nous avons présenté l'étude théorique des techniques de transmission utilisées dans le contrôles des drones à savoir: l'étalement de spectre à sauts de fréquence (en anglais : frequency hopping spread spectrum (FHSS)), l'étalement de spectre à séquence directe (en anglais : direct sequence spread spectrum (DSSS)) et le multiplexage par division fréquentielle et orthogonale (en anglais : orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)).

Nous avons implémenté ces techniques et étudié leurs performances par des simulations sous MATLAB. Les performances de ces techniques ont été évalués en termes du taux d'erreur binaire (En anglais: bit error rate (BER)). Ces techniques présente de bonne performances en termes de protection des données contre les interférences.

**Mots clés:** Drones, OFDM, FHSS, DSSS, contrôle, communication.

## Abstract:

Unmanned aerial vehicles (UAVs), commonly known as drones, can be controlled either under remote control (in English: remote control RC) by a pilot operator, or autonomously by control computer. A UAV communication channel is a key factor that can affect data link performance in terms of high data rate and reliable transmission of information

In this thesis, we presented the theoretical study of the transmission techniques used in the control of drones, namely: frequency hopping spread spectrum (FHSS), direct sequence spread spectrum (DSSS) and orthogonal frequency division multiplexing (OFDM).

We have implemented these techniques and studied their performance by simulations under MATLAB. The performances of these techniques have been evaluated in terms of the bit error rate (BER). These techniques have good performance in terms of protecting data against interference.

**Keywords:** Drones, OFDM, FHSS, DSSS, control, communication.



# Remerciement

Avant tout nous tenons à remercier **ALLAH** qui nous a donné la santé et la force, patience et le courage pour élaborer, préparer, et présenter ce modeste travail.

Nous tenons sincèrement à remercier les personnes qui grâce à eux, nous n'aurions pas pu être là, nos parents. Qui nous ont encouragés tout au long de ces cinq années, Ainsi que toute ma famille.

Nous tenons à exprimer notre encadreur monsieur **chergui laid**, pour l'attention qu'il a portée à la réalisation de ce mémoire, pour ses nombreuses remarques, et corrections, ainsi que pour ses encouragements.

Nous remercions également les membres de jury de ce mémoire, pour accepter d'y participer, d'y contribuer à améliorer cette réflexion et stimuler celle à venir.

Merci pour tous les enseignant qui grâce à eux nous avons ici ; les enseignants du Primaire, CEM, Lycée et de l'Université.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenu et encouragé, et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à tous et à toutes.





# Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Tout d'abord, je dédie mon diplôme à l'âme de mon père, que Dieu ait pitié de lui et le place dans ses havres.

A ma plus belle maman, qui m'a encouragé à passer à autre chose et m'a donné tout son amour reprendre mes études.

A Mes frères (kamel et adel) et mes sœurs (abla, nessma, linda et ahlam) et leurs époux Aux fils de mes sœur Abdo, Sifou, Siraj, Sirin, Aisha et Miro, et aux garçons de mon frère, Jawad et Dhiaa, que Dieu les protège et prenne soin d'eux.

A mes proches et mes amies qui ont encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

À notre encadreur chergui laid qui m'a encouragé et guidé à chaque instant Il nous a instruit et commenté notre travail.

A plus belle amies Karima et hizia qui ne donne le soutien que dieu te protège pour moi  
Merci à tous et toutes

Dounia





# *Dédicace*

Je dédie ce modeste travail à :

Mon cher père merzougui Ahmed et je demande à Dieu

d'avoir pitié de lui et d'habiter au paradis

Ma chère mère à qui je voue mon respect et tous mes vœux de

bonheur, prospérité et de bonne santé.

Mes chers frères : 3anter, Hamza, mouhamed et abdou

Mes chères sœurs et toute la famille

Mon binôme et ma meilleure amie tallous dounia et sa famille

Mes amis et à toute la promo 2021-2022.





# Sommaire



## Table des matières

Remerciement .....	
Dédicaces .....	
Table des matières .....	
Liste des figures .....	
Liste des tableaux .....	
Liste des acronymes .....	

## Introduction Générale

Introduction générale .....	01
-----------------------------	----

### Chapitre I : Introduction aux drones

I.1. Introduction .....	04
I.2. Définition d'un drone .....	04
I.3. Historique des drones .....	04
I.4. Classification des drones .....	06
I.4.1. Selon la taille .....	06
I.4.1.1. MALE (Moyenne Altitude Longue Endurance) .....	07
I.4.1.2. HALE (Haute Altitude Longue Endurance) .....	08
I.4.1.3. Mini drones MAV (Mini Air Véhicule) .....	09
I.4.1.4. Micro-drones .....	10
I.4.2. Selon la propulsion .....	11
I.4.2.1. Drones à voilures fixes .....	11
I.4.2.2. Drones à ailes battantes .....	11
I.4.2.3. Drones à voilures tournantes .....	12
I.4.3. Selon le nombre de rotors .....	12
I.4.3.1. Mono-rotors .....	12
I.4.3.2. Birotors .....	13
I.4.3.3. Multirotors .....	14
I.5. Les différents types de drones selon leur usage .....	15
I.6. Avantages et des inconvénients des drones .....	16
I.7. Description générale du drone .....	17

## Table des matières:

---

I.8. Sens de rotation des voilures tournantes .....	17
I.9. Mouvements possibles .....	18
I.9.1. Le Lacet .....	18
I.9.2. Le Tangage et le Roulis .....	20
I.10. Mode de vol .....	22
I.10.1. Vol vertical .....	22
I.10.2. Vol stationnaire .....	22
I.10.3. Vol de translation .....	22
I.11. Applications des drones .....	23
I.12. Les domaines d'utilisation .....	24
I.12.1. Utilisation militaire des drones .....	24
I.12.2. Utilisation civile des drones .....	24
I.13. Conclusion .....	25
 <b>Chapitre II : Etat de l'art des techniques de transmission sans fil et la mise en réseau des drones</b>	
II.1. Introduction .....	27
II.2. Système de communication de drone .....	27
II.2.1. Réseau de communication de drones .....	28
II.3. Techniques de transmissions utilisées .....	30
II.3.1. Principes de base des formes d'onde .....	31
II.3.2. Multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence .....	34
II.3.3. Etalement du spectre en séquence directe .....	37
II.3.4. Modulation de phase continu .....	39
II.4. Techniques de modulation numérique .....	41
II.4.1. Concepts de base de la modulation .....	41
II.4.1.1. Trois types de modulations .....	41
II.4.2. ASK .....	42
II.4.3. FSK .....	42
II.4.4. PSK .....	42
II.4.4.1. BPSK .....	44
II.4.4.2. QPSK .....	47

## Table des matières:

---

II.4.4.2.1. Code gris .....	48
II.4.4.2.2. Modulation QPSK .....	49
II.4.4.3. MPSK .....	51
II.4.5. QAM .....	52
II.4.5.1. MAQ rectangulaire .....	53
II.5. Conclusion .....	55

## **Chapitre III : Simulations et Discussions**

III.1. Introduction .....	57
III.2. Spectre étalé à séquence directe (DSSS) .....	57
III.3. Spectre à saut de fréquence (FHSS) .....	58
III.4. La différence entre le DSSS et le FHSS .....	58
III.5. Simulations .....	59
III.5.1. MATLAB .....	59
III.5.2. SIMULINK .....	59
III.5.3. Simulation d'un system FHSS .....	59
III.5.3.1. Emetteur .....	60
III.5.3.2. Récepteur .....	62
III.5.4. Simulation d'un system DSSS .....	63
III.5.4.1. Emetteur .....	63
III.5.4.2. Récepteur .....	65
III.5.5. Simulation d'un system OFDM .....	66
III.5.5.1. Emetteur .....	66
III.5.5.2. Récepteur .....	67
III.6. Conclusion .....	67
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>69</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>71</b>

## LISTE DES FIGURE

### Chapitre I :

Figure I.1. Classification des drones. ....	07
Figure I.2. Eagle 1 (EADS). ....	08
Figure I.3. Global Hawk. ....	08
Figure I.4. Sperwer (SAGEM). ....	09
Figure I.5. Hovereye [Pflimlin2007]. ....	10
Figure I.6. Micro drone. ....	10
Figure I.7. Drone à voilures fixes ....	11
Figure I.8. Drone à ailes battantes. ....	12
Figure I.9. Avion 3D. ....	13
Figure I.10. Hélicoptère classique (à gauche) Hélicoptère en tandem (à droite). ....	13
Figure I.11. Drone à deux hélices co-axiales. ....	14
Figure I.12. Drones multirotors. ....	15
Figure I.13. Structure générale d'un quadrotor. ....	17
Figure I.14. Sens de rotation des rotors du quadrotor. ....	18
Figure I.15. Illustration du mouvement de lacet. ....	19
Figure I.16. Mouvement de lacet. ....	19
Figure I.17. Forces aérodynamiques. ....	20
Figure I.18. Tangage et roulis. ....	20
Figure I.19. Illustration du mouvement de tangage. ....	21
Figure I.20. Illustration du mouvement de roulis. ....	21
Figure I.21. Illustration du mouvement vertical. ....	22
Figure I.22. Illustration du mouvement de translation. ....	23
Figure I.23. Utilisation des drones dans le secteur militaire. ....	24
Figure I.24. Quelques domaines d'utilisation civile des drones. ....	25

## Chapitre II :

Figure II.1. Le réseau d'intervention auxiliaire du drone après la communication est détruit.	29
Figure II.2. Séquence d'informations en bande de base – 0010110010.	42
Figure II.3. Signal binaire ASK (OOK).	42
Figure II.4. Signal FSK binaire.	43
Figure II.5. Porteuse PSK binaire (notez $180^\circ$ décalages de phase aux bords des bits).	44
Figure II.6. Diagramme de constellation pour BPSK.	45
Figure II.7. Illustration de la modulation d'un signal de message pour produire un signal BPSK.	46
Figure II.8. Spectre d'amplitude de BPSK.	46
Figure II.9. (a) signal de modulation binaire et (b) signal BPSK.	47
Figure II.10. Diagramme de constellation pour QPSK avec codage Gray.	48
Figure II.11. Modulateur QPSK.	49
Figure II.12. La représentation mathématique du processus du modulateur QPSK.	50
Figure II.13. Modulation QPSK : (a) séquence binaire et (b) signal QPSK.	50
Figure II.14. Diagramme de constellation pour M-aire PSK.	51
Figure II.15. Modulateur PSK maire.	52
Figure II.16. Diagramme de constellation pour 16-QAM rectangulaire.	54

## Chapitre III :

Figure III.1. Emetteur DSSS.	57
Figure III.2. Récepteur DSSS.	57
Figure III.3. Schéma Bloch d'un émetteur Emetteur FHSS.	58
Figure III.4. Schéma Bloch d'un récepteur FHSS.	58
Figure III.5. Séquence Binaire aléatoire d'entrée.	60
Figure III.6. Signal d'entrée modulé par le modulateur BPSK.	60
Figure III.7. Porteuse sinusoïdale.	60
Figure III.8. Signal modulé.	60
Figure III.9. Les six porteuses.	61
Figure III.10. Code d'étalement avec 06 fréquences.	61
Figure III.11. Signal à spectre étalé à saut de fréquences (FHSS) émis.	62
Figure III.12. Signal à spectre étalé à saut de fréquences (FHSS) reçu.	62

## Table des matières:

---

Figure III.13. Signal à spectre étalé à saut de fréquences (FHSS) reçu. ....	62
Figure III.14. Signal à spectre étalé à saut de fréquences (FHSS) reçu. ....	63
Figure III.15. Code pseudo aléatoire utilisé dans le codage de la séquence d'entrée. ....	63
Figure III.16. séquence binaire codée par le code PN. ....	64
Figure III.17. séquence binaire codée par le code PN et modulé par le modulateur BPSK. ....	64
Figure III.18. Signal porteuse. ....	64
Figure III.19. Portion du signal DSSS de sortie. ....	64
Figure III.20. Signal DSSS multiplié par la porteuse. ....	65
Figure III.21. Signal DSSS converti en binaire. ....	65
Figure III.22. Séquence binaire reçu. ....	65
Figure III.23. Schéma block d'un émetteur récepteur OFDM. ....	65
Figure III.24. Signal d'entrée modulé en utilisant un modulateur BPSK. ....	66
Figure III.25. Signal OFDM de sortie. ....	66
Figure III.26. Signal OFDM de sortie. ....	67

## Liste des tableaux

### Chapitre I :

Tableau I.1 : Avantages/Inconvénients des différentes familles de drones. ....	16
--	----

### Chapitre II :

Tableau II.1 : Quatre définitions de mappage de symboles pour QPS. ....	48
---	----

## Liste de acronymes

UAV	Unmanned Aerial Vehicles
RF	Radio Fréquence
FPV	First Person View (vue subjective)
MIMO	Multiple Input Multiple Output
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
ISI	Ingénierie des Systèmes Informatique
LTE	Long Term Evolution
LDACS	L-band digital aeronautical communication system
FFT	Fast Fourier Transformation
IFFT	Invers Fast Fourier Transformation
DFT	Density Fonctional Theory
PAPR	Powered Air-Purifying Respirator
GPS	Global Positioning System
DSSS	Direct-Sequence Spread Spectrum
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
CDMA	Code Division Multiple Access
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GSM	Global System for Mobile communications
LDACS	L-band Digital Aeronautical Communication System
MSK	Minimum-Shift Keying
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
QPSK	Quaternary Phase-Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
PCM	Pulse-Code Modulation
NRZ	Non Return to Zero
RPV	Réseau Privé Virtuel
L'USAF	United States Air Force
UCAV	Unmanned Combat Air Vehicles
GCS	Groupement de Coopération Sanitaire

## Table des matières:

---

EADS	European Aeronautic Defence and Space Company
DDL	degré de liberté
HMI	Interface Homme-Machine
SAGEM	Société d'Applications Générales de l'Electricité et de la mécanique



# Introduction Générale



Les véhicules aériens sans pilote (en anglais : unmanned aerial vehicles (UAVs)), communément appelés drones, sont facilement disponibles et faciles à utiliser. Les drones ne sont plus seulement liés aux applications militaires mais aussi à des services qui peuvent offrir un énorme potentiel pour développer des applications civiles innovantes dans une grande variété de secteurs, notamment le tournage et le divertissement, le transport, la cartographie, la collecte et l'analyse de données, la surveillance de l'environnement et de la vie sauvage. Ces véhicules peuvent être contrôlés soit sous contrôle à distance (en anglais : remote control RC) par un opérateur pilote, soit de manière autonome par des ordinateurs de bord. Un canal de communication UAV est un facteur clé qui peut affecter les performances de la liaison de données en termes de débit de données élevé et de transmission fiable des informations. En d'autres termes, assurer l'efficacité d'une liaison de communication UAV représente l'un des grands défis des travaux en cours concernant un système de communication UAV.

Étant donné que la transmission des commandes de contrôle et des données recueillies, qui peuvent être enregistrées en vidéo et en photos, est réalisée via le canal de communication entre l'UAV et la station de contrôle au sol (en anglais : ground control station GCS), une liaison de données d'UAV nécessite la plus haute fiabilité dans la transmission de données ainsi qu'un taux de transfert de données élevé. Parmi les méthodes de transmission utilisées, on cite l'étalement de spectre à sauts de fréquence (en anglais : frequency hopping spread spectrum (FHSS)), un étalement de spectre à séquence directe (en anglais : direct sequence spread spectrum (DSSS)) et Le multiplexage par division fréquentielle et orthogonale (en anglais : orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)).

Dans ce projet, nous proposons une étude des différentes techniques de transmission sans fil utilisées dans le contrôle des drones ainsi qu'une étude comparative de ces techniques par des simulations sous MATLAB.

Ce mémoire est structuré comme suit :

Le premier chapitre présente une Introduction aux drones. Le deuxième chapitre, donne l'état de l'art des techniques de transmission sans fil et la mise en

## Introduction générale:

---

réseau des drones. Enfin, le troisième chapitre, présenté les différentes simulations ainsi que les discussions.

Finally, we finish this work with a general conclusion.



# **Chapitre I :**

## Introduction aux drones



### **I.1. Introduction [1]**

Les engins avioniques ont profondément pénétré le monde de l'industrie. Conçus principalement pour remplacer l'être humain dans des missions difficiles et dangereuses, ils sont devenus indispensables dans les domaines civils et militaires. Le monde des drones est vaste et regroupe plusieurs disciplines telles que l'électronique, l'informatique, la mécanique, l'aérodynamique (Melkou, 2018) ...etc.

Dans ce premier chapitre, nous allons définir et donner des généralités sur les drones, qui incluent dans le premier temps la définition et l'historique d'évolution des drones au fil du temps et des guerres. Dans un deuxième temps, nous allons énumérer les différentes classifications des drones et leurs avantages et inconvénients et Description générale du drone . Dans un dernier temps, nous mentionnerons les différents domaines d'utilisation et les applications des drones.

### **I.2. Définition d'un drone [2]**

Les drones sont des aéronefs sans pilote c'est-à-dire c'est un avion qui ne porte pas d'opérateur humain à bord. Le terme « drone » est issu de la langue anglaise et signifie « faux bourdon». Il désigne un système pilotable à distance, capable d'emporter une charge utile. Les drones utilisent des forces aérodynamiques pour fournir un ascenseur de véhicule, ils peuvent voler de façon autonome et être piloté à distance, ils peuvent être récupérables grâce à un système de navigation programmable et effectuer des vols dans des différents environnements, ils sont capables aussi de porter un camera de liaison de données, permettant la transmission direct des vidéos.

Le vol des drones peut se fonctionner avec de différents degrés d'autonomie : soit sous contrôle à distance par un opérateur humain, soit par ordinateur embarqué de manière autonome.

### **I.3. Historique des drones [3]**

Les études réalisées sur le sujet semblent indiquer que le concept des UAV ou des drones remonte au milieu des années 1800, lorsque l'Autriche a envoyé un ballon rempli de bombes sans pilote comme moyen tactique pour attaquer Venise (Italie).

Les drones que l'on voit aujourd'hui sont des innovations du début des années 1900. Ces drones étaient à l'origine déployés pour l'entraînement au tir afin de former le personnel

militaire. Par conséquent, ils ont continué à être conçus et développés pendant la Première Guerre mondiale, lorsque la Dayton-Wright Air plane compagnie a inventé une torpille aérienne sans pilote qui tomberait et exploserait à un moment précis.

Des articles publiés révèlent que la première tentative de démonstration du concept d'UAV a été faite en 1943. Depuis lors, la technologie UAV ou drone a été développée pour diverses applications commerciales et militaires. Dès 1915, Nikola Tesla décrit la flotte de drones. Le premier RPV a été développé en 1935 et démontré par un film. D'autres drones ont été développés pendant la Seconde Guerre mondiale pour entraîner les artilleurs de l'armée et effectuer des missions d'attaque.

L'Allemagne nazie a produit et déployé diverses versions de drones pendant la Seconde Guerre mondiale pour détruire les chasseurs et bombardiers alliés.

Les technologies de maturation et de miniaturisation disponibles au cours des périodes 1980 et 1990 ont démontré le plus grand intérêt pour les plates-formes UAV par les États-Unis.

Pour illustrer l'importance stratégique des UCAV, le résumé des performances et la capacité de la plate-forme General Atomics Prédateur MQ-9 sont fournis au profit des lecteurs. Cet avion UCAV particulier offre des capacités de surveillance et de reconnaissance considérablement améliorées ainsi que les meilleures armes offensives disponibles telles que les missiles air-sol Hilaire. Les capacités de performance du véhicule MQ-9 étaient si impressionnantes qu'environ 50 pays ou plus déploient cette plate-forme particulière à compter de 2013.

Depuis 2008, l'USAF a déployé 5331 missions UAV, soit le double du nombre de véhicules aériens pilotés. De l'avis des experts de la défense, les Prédateurs équipés de missiles Hilaire sont les drones les plus rentables car ils sont considérés comme les plus efficaces en assumant des rôles de combat sans risque pour le pilote ou l'aéronef. De plus, les missions UCAV peuvent être interrompues sans délai si les autorités militaires le souhaitent. Les experts militaires estiment que les Prédateurs sont les mieux adaptés pour orchestrer des attaques en pointant avec précision faisceaux laser sur les cibles. Le faisceau laser est capable de mettre un robot en position de déclencher une attaque sur la cible d'intérêt sans dommage collatéral. De plus, les Prédateurs peuvent être exploités via des satellites par les pilotes au sol assis dans le GCS situés à des distances supérieures à 7500 milles environ du lieu de l'action militaire. L'UCAV Global Hawk de l'armée américaine désigné sous le nom de RQ-4 fonctionne de manière pratiquement autonome à l'aide d'ordinateurs à grande vitesse et de logiciels sophistiqués. Un tel système est considéré comme un pilote ou un opérateur télécommandé.

L'absence de pilote humain dans la plate-forme UCAV est l'avantage le plus remarquable du contrôle autonome de l'UCAV. Il semble que la future génération d'autorités militaires suivra cette tendance particulière dans les conflits militaires. Il suffit à l'utilisateur d'appuyer sur le bouton approprié "pour décoller et atterrir", tandis que l'UCAV obtient ses directions via un GPS et rend compte via un flux en direct sécurisé. Selon des experts militaires, un Global Hawk a la capacité opérationnelle de voler depuis la côte ouest des États-Unis et de cartographier tout l'État du Maine situé sur la côte est avant de devoir retourner à sa station de départ. Certaines entreprises aérospatiales sont engagées dans la conception et le développement de drones miniaturisés, qui peuvent être lancés de la main du soldat et manœuvrés dans les rues à basse altitude. Une entreprise aérospatiale de Californie a développé de tels véhicules aériens miniaturisés.

Le véhicule micro air ravin est considéré comme le drone miniaturisé le plus polyvalent et est le mieux adapté aux applications urbaines. Le corbeau peut jouer des rôles critiques, en particulier dans des terres hostiles inconnues et surpeuplées. Les études antiterroristes réalisées par l'auteur semblent indiquer que les corbeaux sont les mieux adaptés pour entreprendre des missions de reconnaissance et de surveillance dans des environnements urbains surpeuplés afin de trouver des insurgés, des embuscades potentielles et des immigrants illégaux. Les études indiquent en outre que les drones miniaturisés sont les plus pratiques pour les missions de surveillance et de suivi de cibles car ils peuvent voler à basse et moyenne altitude pendant des jours à un temps. Notez que les insurgés ou les immigrants illégaux détestent rester à découvert plus de quelques minutes de peur que les drones ne les repèrent. La classification des drones miniaturisés est basée sur des applications dans un domaine spécifique.

### **I.4. Classification des drones [4, 5]**

#### **I.4.1. Selon la taille**

Il n'est pas facile de classer les systèmes aériens, car il existe plusieurs catégories de drones aériens partant du nano-drone de quelques grammes jusqu'au drone lourd capable d'effectuer des missions de plus de 24 heures à plusieurs milliers de kilomètres de sa base.



**Figure I.1.** Classification des drones.

La figure. I.1. illustre les différents types de drones selon les principaux critères : la taille et les performances (autonomie en vol, portée ou altitude d'opération).

Trois grandes familles de drones se détachent alors en fonction du type de mission :

- Les drones de Moyenne Altitude et Longue Endurance (MALE).
- Les drones de Haute Altitude et Longues Endurances (HALE).
- Les drones tactiques.

### **I.4.1.1. MALE (Moyenne Altitude Longue Endurance)**

Caractérisés par leurs longues durées de vol à moyenne altitude opérationnelle, ayant une grande autonomie. Tels que le égale 1 (EADS), les drones MALE peuvent voler à des altitudes comprises entre 5 km et 12 km pour un rayon d'action allant jusqu'à 1000 km.



**Figure I.2.** Égale 1 (EADS).

### **I.4.1.2. HALE (Haute Altitude Longue Endurance)**

Ce sont des drones à grande taille, le plus souvent à voilure fixe. Caractérisés par leur très longue durée en vol et collecte des informations sur de très longues périodes (12 à 48 heures) à haute altitude. Tels que le Global Hawk (Northrop Gumma), de la taille d'un avion de ligne et volants à des altitudes pouvant atteindre 20 km pour un rayon d'action de plusieurs milliers de kilomètres.



**Figure I.3.** Global Hawk.

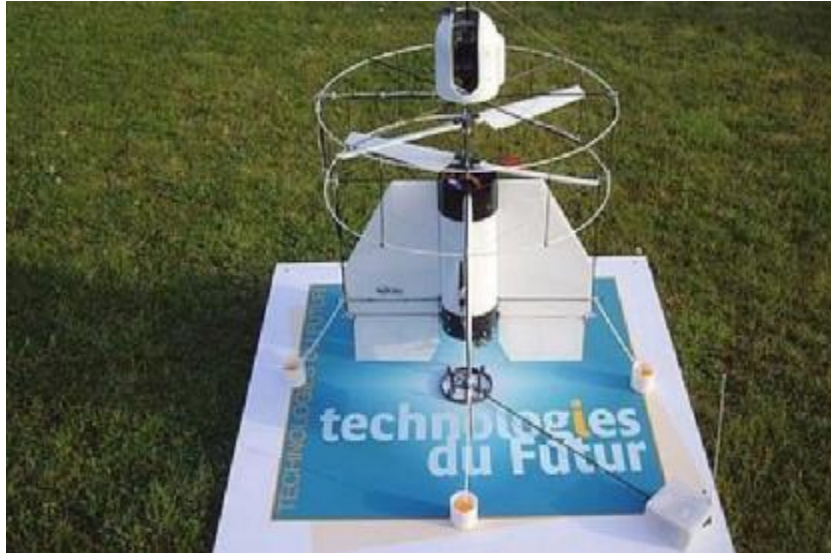
Les drones tactiques, tels que le sperwer (SAGEM) ou l'Aérostat (Aéronautique Défense Systèmes), utilisés pour des missions de reconnaissance ou de supervision du champ de bataille et volant à une altitude comprise entre 200 m et 5 km, pour un rayon d'action de 30 à 500 km.



**Figure I.4.** Sperwer (SAGEM).

### **I.4.1.3. Mini drones MAV (Mini Air Véhicule)**

Avec un temps de vol de quelques heures et des dimensions de l'ordre du mètre, les mini drones peuvent voler jusqu'à une altitude de 300 mètres, avec un diamètre d'environ 30 centimètres en emportant une charge utile très légère. Ce type d'appareil est en général propulsé électriquement. La figure I.5 présente le mini drone Hovereye [Pflimlin2007], développé par Bertin Technologies.



**Figure I.5.** Hovereye [Pflimlin2007].

### I.4.1.4. Micro-drones

Un MAV (Micro Air Véhicule) est un drone de taille réduite qui représentent la 3<sup>ème</sup> génération de drones. De plus, ces petits véhicules aériens peuvent accomplir des tâches dont des engins plus gros sont incapables.



**Figure I.6.** Micro drone.

### I.4.2. Selon la propulsion

Le type de propulsion fournit une autre catégorie de classification, dont on peut distinguer trois familles.

#### I.4.2.1. Drones à voilures fixes

Ce type de véhicules utilise des ailes fixes pour leur déplacement, donc ils ont besoin d'une piste de décollage et atterrissage. Ils peuvent être :

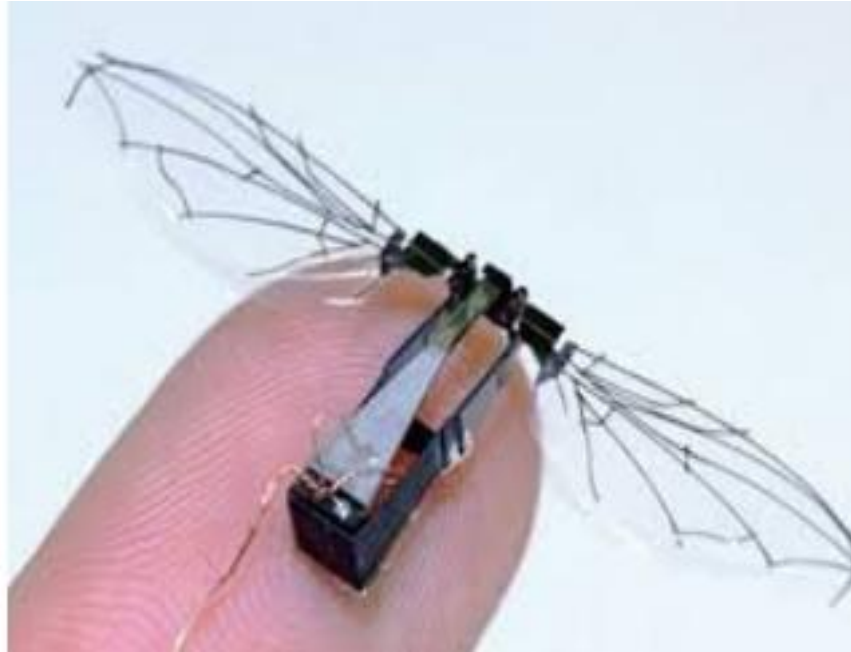
- Plus lourds que l'air : type avion.
- Plus légers que l'air : type dirigeable qui utilisent de l'hélium pour générer une poussée verticale et des rotors pour générer des couples.



**Figure I.7.** Drone à voilures fixes.

#### I.4.2.2. Drones à ailes battantes

Inspirés par les insectes, la construction de cette famille de drones consiste aux battements des ailes qui permettent de faire des vols stationnaires et d'imiter les trajectoires des insectes.



**Figure I.8.** Drone à ailes battantes.

### **I.4.2.3. Drones à voilures tournantes**

Les drones à voilures tournantes sont caractérisés par leurs décollage et atterrissage verticaux (ADAV, en anglais Vertical Take-off and Landing aircraft ou VTOL), donc ils n'ont pas besoin de piste pour décoller ou atterrir.

Ils sont utilisés dans plusieurs applications telles que la surveillance et la récolte de données grâce à leur vol stationnaire à basse vitesse et à faible altitude. Ce type de drone, aussi diffère selon le nombre de ses propulsions.

### **I.4.3. Selon le nombre de rotors**

Les types de drones les plus courants dans cette catégorie sont :

#### **I.4.3.1. Mono-rotors**

L'exemple le plus commun dans cette configuration est l'avion appelés 3D, qui a un seul moteur comme actionneur principal, et qui doit être suffisamment puissant pour décoller verticalement, et des ailerons d'une grande surface qui assurent des couples de commande suffisamment grands afin de piloter l'appareil facilement.



**Figure I.9.** Avion 3D.

#### **I.4.3.2. Birotors**

Ce type de configuration inclue deux type de drones, ceux avec un ou deux plateaux cycliques comme l'hélicoptère classique et ceux avec des pales à pas fixe.

Le cas de l'hélicoptère nous avons un rotor principal et un rotor de queue.

Il existe aussi l'hélicoptère en tandem qui possède deux rotors qui tournent en contre sens mais dans des axes différents.



**Figure I.10.** Hélicoptère classique (à gauche) Hélicoptère en tandem (à droite).

Nous pouvons aussi distinguer la configuration à deux rotors, coaxiales, qui participent les deux à la poussée. En tournant dans des sens opposés les effets de couple générés par la rotation des rotors, sont annulés.



**Figure I.11.** Drone à deux hélices co-axiales.

### I.4.3.3. Multi rotors

Ce type de véhicules aériens se compose de plusieurs rotors avec un sens de rotation inversé deux à deux pour compenser le couple de réaction, le changement des vitesses des moteurs convenablement assure les déplacements du véhicule



**Figure I.12.** Drones multiroteurs.

### **I.5. Les différents types de drones selon leur usage [6]**

Les drones peuvent être catégorisés suivant leurs fonctions et leurs rôles. Ainsi donc, on distingue :

- **Le drone militaire** : À usage exclusivement militaire, le drone militaire est souvent utilisé au cours des missions de reconnaissance et d'espionnage d'une zone à risque. Ils permettent d'explorer des zones occupées par un clan ennemi et de repérer des soldats en mission sur ces terres.
- **Le drone civil** : Ceux pouvant être utilisés pour de la surveillance ou encore prendre des photos et des vidéos aériennes.
- **Le drone ambulancier** : drone à grande vitesse qui distribue des défibrillateurs automatiques (DEA) en cas d'arrêt cardiaque. Le drone suit les appels mobiles d'urgence et utilise le GPS pour se rendre sur le lieu de l'urgence. À l'aide d'une webcam en direct, l'instructeur du drone peut donner des instructions sur l'utilisation des DEA et sur la manière d'apporter une aide d'urgence.

## I.6. Avantages et des inconvénients des drones [1]

**Le tableau 01** : résume les avantages et les inconvénients de chaque famille de drones.

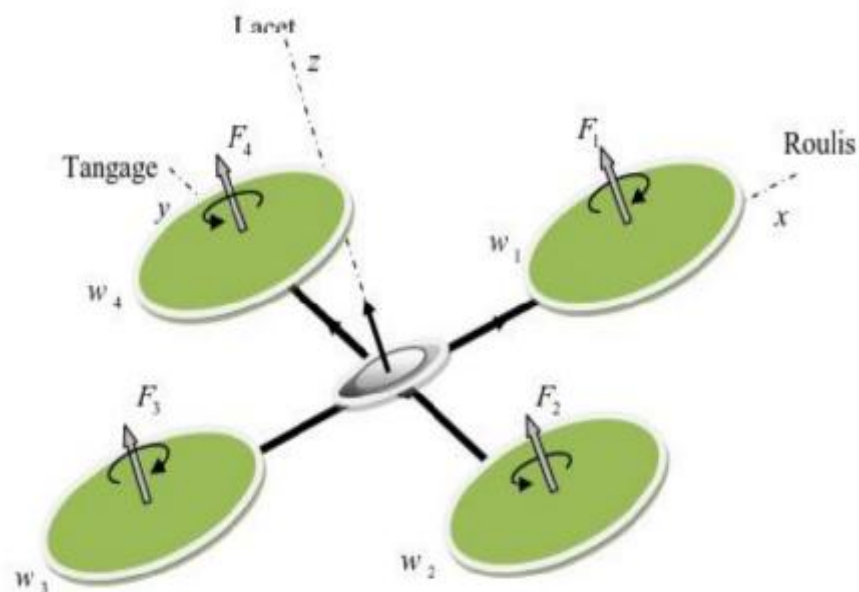
<b>Famille</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>Drones à voilures fixes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ü Capacité à porter plus de poids.</li> <li>ü Capacité de voler avec plus d'autonomie et d'altitudes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ü Pas de vol stationnaire.</li> <li>ü Pas de vol à basse vitesse et à basse altitude.</li> <li>ü Besoin de piste de décollage et d'atterrissage.</li> </ul>
<b>Drones à voilures tournantes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ü Permet le vol à écolage et à atterrissage verticale.</li> <li>ü Permet le vol stationnaire.</li> <li>ü Permet le vol à basse</li> <li>ü vitesse et à basse altitude.</li> <li>ü Permet le manœuvre en air.</li> <li>ü Plus de stabilité et facile à contrôler.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ü Complexité en maintenance et réparation.</li> <li>ü Moins d'autonomie, de vitesse et d'altitude en vol.</li> </ul>
<b>Drones à ailes battantes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ü Permet le vol stationnaire à basse vitesse.</li> <li>ü Permet de faire des missions dans des espaces réduits.</li> <li>ü permet le manœuvre agile en air.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ü Complexité de réalisation.</li> <li>ü Mémoire trop limitée.</li> <li>ü Ressources d'énergie limitées.</li> </ul>

**Tableau I.1** : Avantages/Inconvénients des différentes familles de drones.

### I.7. Description générale du drone [7, 8, 9]

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

Le fonctionnement d'un quadrotor est assez particulier. En faisant varier astucieusement la puissance des moteurs, il est possible de le faire monter/descendre, de l'incliner à gauche/droite (roulis) ou en avant/arrière (tangage) ou encore de le faire pivoter sur lui-même (lacet). Le quadrotor a six degrés de liberté, trois mouvements de rotation et trois mouvements de translation, ces six degrés doivent être commandés à l'aide de quatre déclencheurs seulement; Donc c'est un système sous actionné (le nombre des entrées inférieure au nombre des sorties).

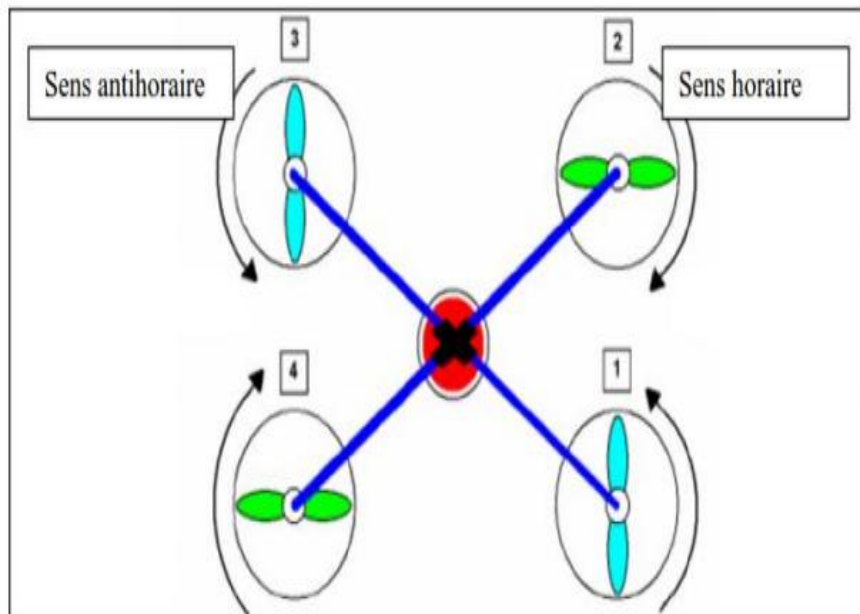


**Figure I.13.** Structure générale d'un quadrotor.

### I.8. Sens de rotation des voilures tournantes

Afin d'éviter un mouvement de lacet (l'appareil tourne sur lui-même), il est nécessaire que deux rotors tournent dans un sens et que les deux autres tournent dans l'autre sens. En plus, pour diriger l'appareil, les rotors tournant dans le même sens doivent être placés

l'un en face de l'autre (voir la figure I.14). De plus, pour faciliter la gestion des commandes et les calculs, le rotor numéro 1 est choisi comme l'avant du micro hélicoptère.



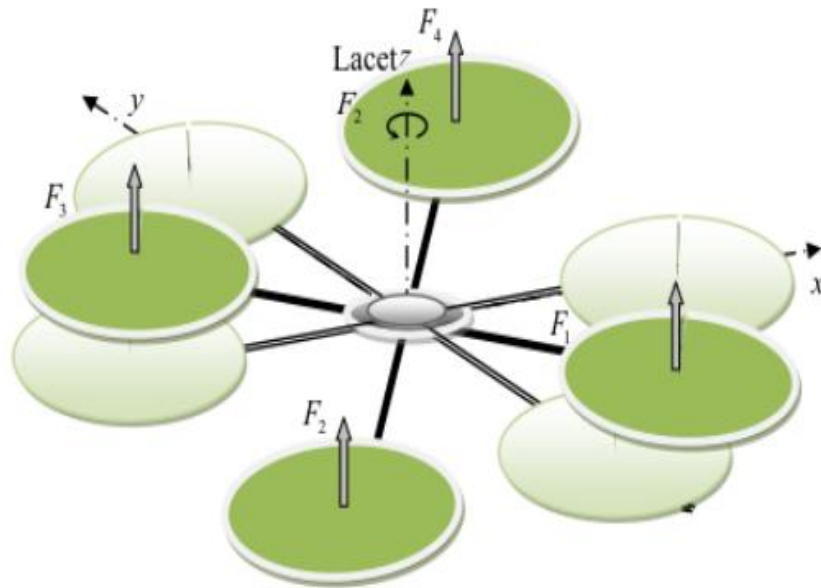
**Figure I.14.** Sens de rotation des rotors du quadrotor.

### I.9. Mouvements possibles

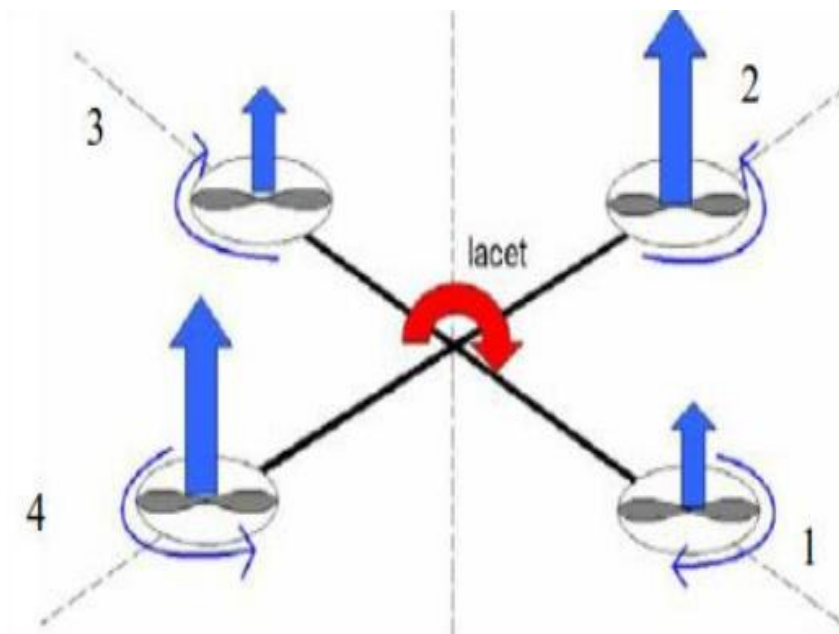
Il existe quatre mouvements possibles pour un quadrotor : la poussée, le lacet, le tangage et le roulis. Le mouvement de correspond à la montée ou à la descente de l'appareil. Pour faire s'élever le quadrotor, il suffit d'augmenter la vitesse des quatre moteurs et pour le faire redescendre, il faut réduire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

#### I.9.1. Le Lacet

La rotation autour de l'axe z est appelée lacet en aéronautique. Lorsque les moteurs tournent à vitesse égale le couple d'anti-rotation est nul et l'hélicoptère ne tourne pas. Pour modifier l'angle de lacet, il faut faire varier la vitesse de rotation sur le couple d'hélices un et trois ou deux et quatre en fonction de l'angle désiré sur le lacet (voir la Figure I.15 et I.16).

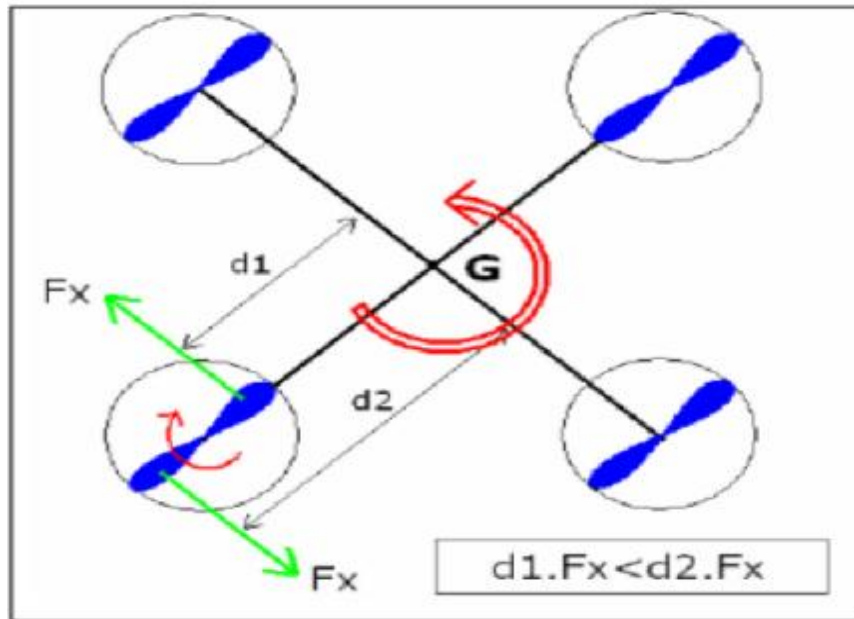


**Figure I.15.** Illustration du mouvement de lacet.



**Figure I.16.** Mouvement de lacet.

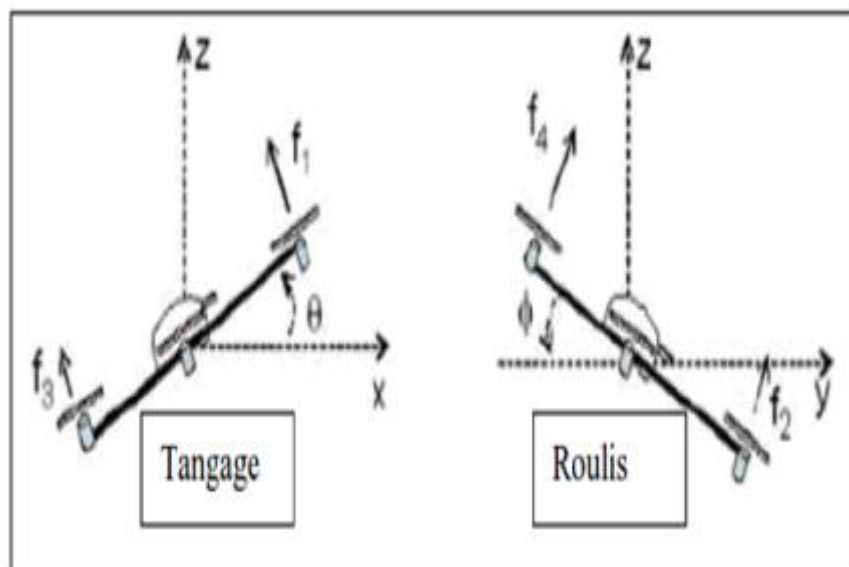
En effet, lorsque l'on projette les forces aérodynamiques exercées par l'air sur la pale, on s'aperçoit qu'un rotor a toujours tendance à faire tourner le micro hélicoptère dans le sens inverse de sa rotation (voir la Figure I.17).



**Figure I.17.** Forces aérodynamiques.

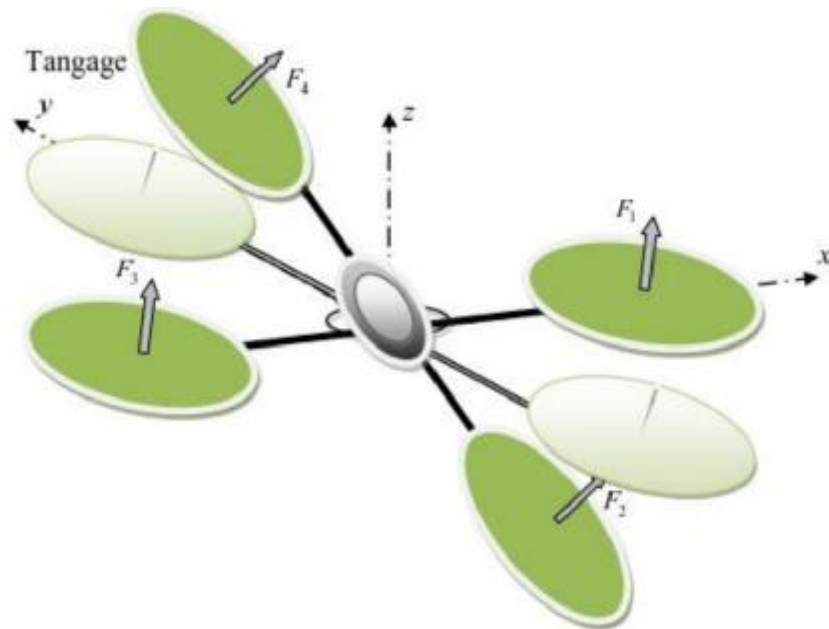
### I.9.2. Le Tangage et le Roulis

Le roulis et le tangage sont des mouvements qui provoquent l'inclinaison du quadricoptère selon les axes horizontaux (Figure I.18). Ces mouvements peuvent être assurés par le drone, en agissant sur la vitesse de l'un des quatre moteurs, est par conséquent sur la force des rotors.



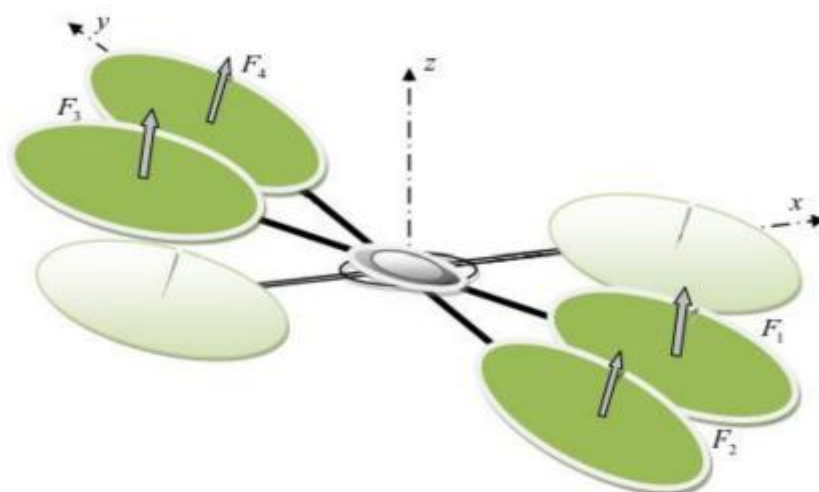
**Figure I.18.** Tangage et roulis.

La rotation autour de l'axe  $y$  est appelée tangage en aéronautique. Une variation de l'angle de tangage est obtenue grâce à une différence de vitesse entre le moteur un, et trois (voir la Figure I.19).



**Figure I.19.** Illustration du mouvement de tangage.

En aéronautique, la rotation autour de l'axe  $X$  est appelée roulis. Une variation de l'angle de roulis est obtenue grâce à une différence de vitesse entre le moteur deux, et quatre (voir la Figure I.20).



**Figure I.20.** Illustration du mouvement de roulis.

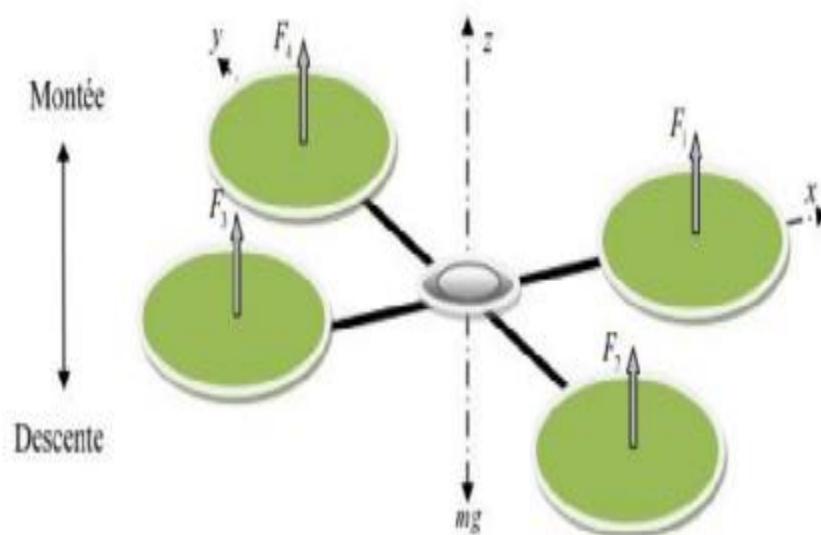
### I.10. Mode de vol [10]

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

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

#### I.10.1. Vol vertical

Sont deux forces ayant la même direction mais de sens opposés. L'hélicoptère peut monter ou descendre, suivant l'effet aérodynamique soit supérieur ou inférieur au poids de l'appareil. (Voir la Figure I.21).



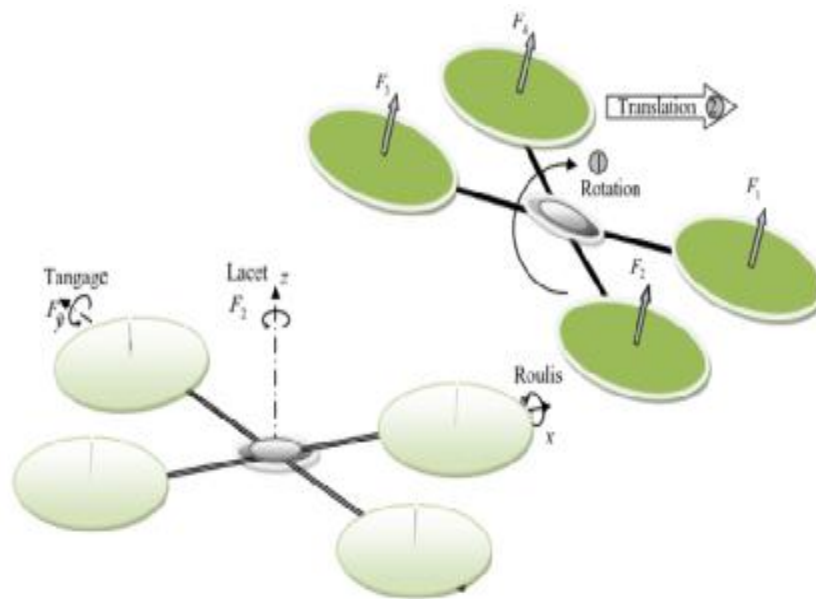
**Figure I.21.** Illustration du mouvement vertical.

#### I.10.2. Vol stationnaire

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

#### I.10.3. Vol de translation

Le vol de translation correspond à la navigation de l'hélicoptère sur un plan horizontal. Il est assuré en se basant sur les mouvements d'inclinaison tangage, et roulis (voir la Figure I.22).



**Figure I.22.** Illustration du mouvement de translation.

## I.11. Applications des drones

The U.S. military authorities have provided the following miniature UAV classifications based on specific application:

- Remote sensing
- Domestic surveillance
- Oil, gas, and mineral exploitation
- Commercial aerial surveillance
- Policing activities by law enforcement agencies
- Forest fire detection
- Disaster relief during heavy rain, blizzards, snow, and flood conditions to reduce civilian casualties
- Armed attacks by terrorists or drug gangsters
- Precision search and rescue missions
- Maritime patrol
- Rescue operations in dangerous and difficult circumstances.

### I.12. Les domaines d'utilisation [1]

On retrouve le drone aujourd'hui dans de nombreux domaines d'activité car son utilisation ne cesse de se rallonger. On distingue principalement deux types d'utilisations utilisation militaire et utilisation civile (Sallah & Babou, 2018).

#### I.12.1. Utilisation militaire des drones

Les drones sont utilisés dans l'armée depuis seconde guerre mondiale et ça afin de faire l'observation, le renseignement, la reconnaissance du terrain pour les troupes terrestres et aériennes et comme une arme de combat. Le pilotage d'un drone peut s'effectuer à partir de sites distants de plusieurs milliers de kilomètres de l'avion.

La figure 23 illustre ce dire :



**Figure I.23.** Utilisation des drones dans le secteur militaire.

#### I.12.2. Utilisation civile des drones

Le transfert des drones vers le secteur civil a permis d'imaginer un nombre important d'applications civiles comme présenté sur la figure 24, ce qui ouvre une croissance potentielle et considérable dans des secteurs variés et innovants tels que :

- Étude de l'atmosphère, des sols (géologie) et des océans.
- Incendie de forêts, avalanches.
- Surveillance des cultures et épandage agricole.
- Recherche et sauvetage (mer, montagnes, désert...).

- Largage de vivres et d'équipements de sauvetage en zone hostiles.
- Surveillance du trafic routier et du transport de matières dangereuses.



**Figure I.24.** Quelques domaines d'utilisation civile des drones.

### I.13. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné des généralités sur les drones. Nous avons présenté les différents types et les classifications des drones et découvert que Les drones est un domaine très vaste se base sur la discipline de la robotique, s'évolue rapidement et les différentes catégories des drones existants prouve cette énorme évolution. La réalisation de ce genre de projet nécessite principalement une modélisation de sa dynamique pour étudier les différents mouvements avant d'entamer à la phase de l'implémentation.

Dans le chapitre suivant nous présenté une étude des différentes techniques de transmission sans fil utilisées dans le contrôle des drones et la mise en réseau des drones.



## **Chapitre II :**

Etat de l'art des techniques de  
transmission sans fil et la mise  
en réseau des drones



### II.1. Introduction

La communication entre les drones et l'utilisateur où la station de contrôle terrestre est faite via une liaison radiofréquence, permettant d'une part l'émission des signaux de contrôle du drone et la réception des signaux des données envoyés par ce dernier. Diverses techniques de transmission numérique ont été utilisées pour contrôler et communiquer les données avec les drones.

Dans ce chapitre nous présentons les techniques de transmission numérique utilisées dans les drones, ainsi que leurs principe de fonctionnement et leurs différentes caractéristiques.

### II.2. Système de communication de drone [11]

Les systèmes de communication UAV permettent un contrôle à portée étendue et la diffusion en continu de données et de vidéos. Les drones sont composés d'une variété de composants essentiels. Bien que tous les composants remplissent harmonieusement un objectif spécifique qui contribue au vol opérationnel, le composant le plus important est le système de communication. Les systèmes de communication UAV aident les drones et leurs opérateurs à atteindre les résultats souhaités. Sans ces systèmes, non seulement les vols sans pilote seraient considérés comme impossibles à obtenir, mais ils rendraient également impossible la collecte et la transmission de données aériennes et de données de communication.

Alors que les UAV continuent de se positionner comme la plate-forme prééminente de collecte de données aériennes dans une grande variété d'industries, leurs systèmes de communication gagnent proportionnellement en importance. Sans systèmes de communication hautement adaptables et fiables, les opérateurs sont fortement désavantagés pour obtenir des images et des données aériennes. Dans l'état actuel des choses, les communications RF sont la solution la plus optimisée pour des systèmes de communication de drones fiables. La combinaison de leur petite taille, de leur poids, de leur consommation d'énergie réduite et de leur liaison de communication robuste en fait la solution la plus appropriée pour la plupart des drones civils.

Les systèmes de communication des drones civils fonctionnent généralement sur des fréquences de 2,4 GHz et 5,8 GHz. Les systèmes de communication UAV fonctionnent en utilisant une fréquence pour contrôler le véhicule aérien depuis le sol via un pilote à distance tandis que l'autre fréquence est utilisée pour transmettre des données ou relayer une vidéo vue à la première personne (FPV). En utilisant des liaisons de communication fiables et de haute

qualité, les UAV civils sont capables de relayer facilement des images et des données aériennes à ceux qui sont au sol, tout en restant en vol.

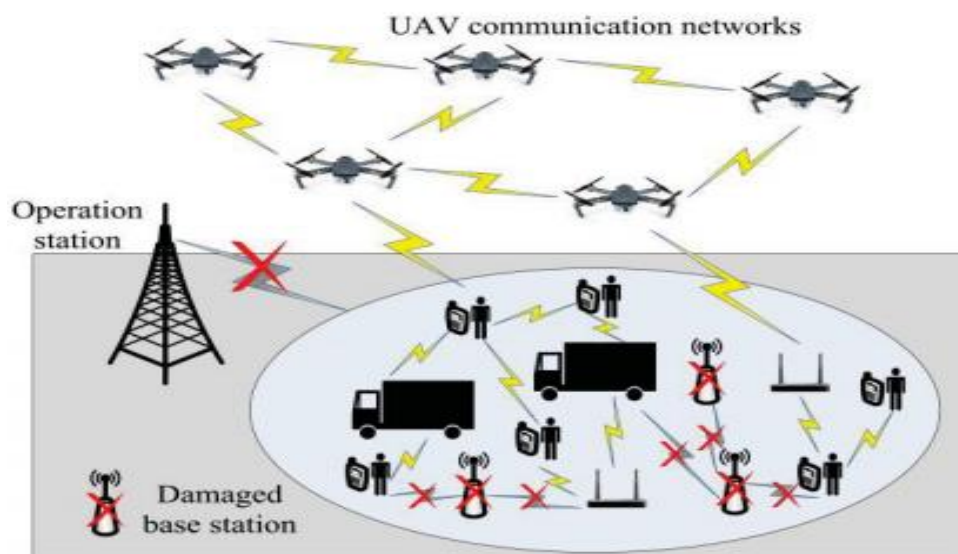
Cependant, dans les applications de défense, différents types de drones sont mis en œuvre. Les drones de défense diffèrent considérablement des UAV civils, car leurs missions sont souvent de plus longue durée ou nécessitent des capacités de frappe en plus de fournir des visuels aériens du champ de bataille ci-dessous. L'un des problèmes liés à l'utilisation de drones dans des applications de défense est l'apparition de brouillage du signal. Lorsque le brouillage du signal est utilisé, cela coupe le pilote à distance et la base des opérations des visuels de ce que le drone voit. Bien que cela semble être un scénario désastreux, la plupart des drones de défense sont conçus pour retourner à la base après une perte de communication. Les opérateurs de la défense ont trouvé une autre solution au brouillage potentiel du signal : des systèmes de navigation embarqués redondants qui ne reposent pas sur le GPS. En éliminant les données GPS disponibles, le brouillage devient un événement peu fréquent, permettant aux drones de défense de terminer leurs missions et de retourner à la base en toute sécurité.

### II.2.1. Réseau de communication de drones [12 13]

Avec le développement rapide des drones, les drones réseau de communication composé de plusieurs drones est devenu un haut lieu de la recherche dans le domaine des drones. Multi Le réseau d'auto-organisation coopérative des UAV peut accomplir tâches de manière plus fiable, efficace et économique qu'un seul grand UAV. La figure II.1. montre la réponse auxiliaire du drone réseau après la destruction de la communication. On peut le voir de la figure que lorsque la communication traditionnelle est détruite, le drone peut rapidement construire une réponse auxiliaire réseau pour rétablir la communication. A l'heure actuelle, le la structure du réseau de communication UAV adopte généralement Réseau auto-organisé mobile, qui est une sorte de réseau sans fil réseau de communication avec une structure spéciale. Son la communication est en réponse à la coopération mutuelle entre les nœuds, et se complète à la manière du multi sans fil saut. Chaque nœud du réseau possède un émetteur-récepteur, qui adopte un contrôle distribué. De plus, le nœud a les fonctions d'un hôte et d'un routeur et peut être rapidement déployé sans dépendre d'une infrastructure réseau préexistante.

Le réseau d'auto-organisation mobile d'UAV a une forte capacité anti-destruction. Il peut former rapidement et automatiquement un réseau à tout moment et en tout lieu sans avoir besoin d'aucun d'autres installations réseau prédéfinies. Il peut changer dynamiquement la structure du réseau, et même si le drone d'un nœud est attaqué, il peut reconstruire automatiquement le

réseau topologie sans affecter les autres nœuds. Le réseau mobile d'auto-organisation des drones dispose d'un protocole de routage efficace Algorithme, qui peut détecter les changements de réseau dans le temps, configurer ou reconstruire automatiquement le réseau, assurer la connectivité en temps réel de la liaison de données, et a un haut degré d'autonomie et d'adaptabilité. De plus, le mobile le réseau auto-organisé d'UAV peut réaliser des informations partager, traiter les informations reçues, prendre des décisions indépendamment et réaliser une tâche intelligente.



**Figure II.1.** Le réseau d'intervention auxiliaire du drone après la communication est détruit.

À l'heure actuelle, le réseau mobile auto-organisé d'UAV utilise principalement une seule antenne pour la communication. Selon à la théorie de la capacité du canal, la capacité du sans-fil canal détermine le taux de transmission maximal. La limite supérieure du système traditionnel à entrer unique et sortie unique limite le taux de transmission maximal. En tant qu'intelligence collecteur et exécuter de tâches, le drone doit envoyer et recevoir un beaucoup d'informations. De plus, les UAV effectuent souvent des tâches dans la ville ou la zone avec des bâtiments denses. En raison de l'effet de blocage et de blindage des obstacles, il est très important d'assurer la communication normale de l'UAV dans Mauvaises conditions. La technologie d'antenne MIMO est essentiellement une combinaison de multiplexage spatial et de diversité spatiale. Le multiplexage peut améliorer le débit de transmission, tandis que la diversité peut assurer la fiabilité de la transmission.

La technologie de multiplexage spatial atteint plus débits de transmission en disposant plusieurs antennes aux extrémités de transmission et de réception et transmission différentes flux de données en même temps. La diversité spatiale peut réduire efficacement la complexité des équipements de réception en installer plusieurs antennes dans l'émetteur. Quand MIMO la technologie est appliquée à la liaison de données UAV, elle peut tirer pleinement parti de la capacité de canal du système sans affecter la puissance et bande passante, et résoudre efficacement le problème de capacité de communication insuffisante et de faible transmission taux de drones. De plus, il peut aussi transformer l'instable canal d'évanouissement variant dans le temps sans fil dans le canal stable sans évanouissement significatif de la tendance baissière, et efficacement améliorer la fiabilité de la transmission des informations lorsque l'environnement de vol du drone est mauvais.

La technologie MIMO peut résister à l'évanouissement par trajets multiples vers certaine mesure, mais il ne peut pas résoudre le problème de fréquence sélective décoloration. La technologie OFDM peut utiliser efficacement le spectre ressources et résister à l'évanouissement sélectif en fréquence. En tant que méthode de modulation efficace, la technologie OFDM a les avantages de l'utilisation de la bande haute fréquence, de fortes capacités d'atténuation du bruit et d'atténuation des trajets multiples. En raison d'orthogonalité entre les différentes sous-porteuses, l'OFDM permet au spectre des sous-canaux de se chevaucher, au lieu de séparer traditionnellement les sous-canaux de la bande de garde. Par conséquent, l'OFDM peut maximiser l'utilisation de ressources en fréquence, ce qui est très important pour atteindre communication UAV rapide et efficace. OFDM Le système peut convertir la transmission série à grande vitesse en numérique signaux en plusieurs signaux parallèles à faible vitesse. Par conséquent, à la même vitesse, la période symbole transmise sur chaque sous-porteuse est plusieurs fois plus longue que celle transmise sur un système à transporteur unique. Ainsi, le système OFDM a une capacité plus forte pour résister au bruit impulsionnel et à la distorsion de retard par trajets multiples.

### **II.3. Techniques de transmissions utilisées [14 15 16]**

Conception de forme d'onde une forme d'onde est la forme et la forme d'un appropriée est essentielle pour un système de communication sans fil compatible UAV, comme dans tout autre réseau sans fil. Dans cette section, nous commençons par passer en revue les bases de la forme d'onde, telles que la densité spectrale de puissance (PSD), qui est un concept clé pour la

gestion du spectre. En raison des diverses applications UAV décrites au chapitre 2, il est peu probable qu'un seul choix de forme d'onde convienne à tous les systèmes de communication sans fil UAV. Nous avons choisi quelques exemples de choix de formes d'onde populaires, notamment l'OFDM, le spectre étalé et le CPM, pour discuter des principales considérations de conception pour les communications et les réseaux sans fil UAV. Tous ces choix de forme d'onde ont été utilisés pour les communications sans fil dans les systèmes d'aéronefs sans pilote. Pour des traitements plus généraux et complets de la conception de formes d'onde dans les systèmes de communications numériques, nous nous référons aux manuels.

### II.3.1. Principes de base des formes d'onde [17 18]

Nous commençons par la représentation équivalente en bande de base complexe canonique pour la passe b et le signal s. A passe b et signal  $s_p(t)$  peut-être écrit comme

$$s_p(t) = \sqrt{2}s_I(t) \cos(2\pi f_c t) - \sqrt{2}s_Q(t) \sin(2\pi f_c t) \quad (3.70)$$

Où  $s_I(t)$  et  $s_Q(t)$  sont des signaux à valeurs réelles. Les formes d'ondes  $s_I(t)$  et  $s_Q(t)$  sont appelées les composantes en phase et en quadrature de la passe b et du signal  $s_p(t)$ , respectivement. La représentation équivalente en bande de base complexe  $s_b(t)$  de la passe b et du signal  $s_p(t)$  est définie comme

$$s_b(t) = s_I(t) + js_Q(t) \quad (3.71)$$

C'est facile à voir.  $s_p(t) = \Re(\sqrt{2}s_b(t)e^{j2\pi f_c t})$

L'information transportée par une passe b et un signal réside dans son enveloppe complexe, c'est-à-dire les variations d'amplitude et de phase capturées dans la représentation équivalente en bande de base. La variation de phase rapide prévisible due à la fréquence porteuse fixe  $f_c$  ne transporte pas d'information et est soustraite dans la représentation équivalente en bande de base. Le choix de c dans un système de communication UAV est principalement déterminé par le spectre disponible alloué au système.

En raison de la rareté du spectre radio et des interférences potentielles des formes d'onde dans les bandes de fréquences voisines, la coexistence harmonieuse de différents systèmes dans la même bande ou dans des bandes adjacentes est essentielle. Par exemple, les agences fédérales et l'armée aux États-Unis utilisent la bande 1755–1850 MHz pour les systèmes aériens sans pilote, entre autres. La portion 1755–1780 MHz de la bande a été mise aux enchères pour les services sans fil commerciaux en 2015. Certains systèmes fédéraux resteront indéfiniment dans la partie 1755–1780 MHz, tandis que d'autres comprimeront les opérations dans la partie 1780–1850 MHz de la bande ou se déplaceront vers une autre bande.

Pour faciliter la coexistence, il est essentiel de déterminer l'occupation spectrale d'une forme d'onde. À cette fin, nous définissons la DSP pour un signal de puissance finie  $s(t)$  comme suit :

$$S_s(f) = \lim_{T_W \rightarrow \infty} \frac{|S_{T_W}(f)|^2}{T_W} \quad (3.72)$$

Où  $S_{T_W}(f)$  est la transformée de Fourier de  $s_{T_W}(t) = s(t)I_{\left[-\frac{T_W}{2}, \frac{T_W}{2}\right]}(t)$

Ici  $\frac{T}{w}$  est la longueur d'une fenêtre d'observation et  $I_A(x)$  est la fonction indicatrice d'un ensemble A :  $I_A(x) = 1$  si  $x \in A$  et  $I_A(x)=0$  autrement.

La modulation traite de la façon de convertir les bits en une forme d'onde qui peut être envoyée sur un canal à bande limitée. La modulation linéaire est une technique fondamentale dont la bande de base

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b[n]g_{tx}(t - nT) \quad (3.73)$$

Où  $\{b[n]\}$  sont les symboles de données prenant des valeurs d'une constellation fixe, est  $g_{tx}(t)$  une forme d'onde en bande de base fixe, et T est la durée du symbole. En admettant que  $\{b[n]\}$  sont de moyenne nulle et non corrélés, la PSD du signal modulé linéairement  $u(t)$  est donnée par

$$S_u(f) = \frac{|G_{tx}(f)|^2}{T} \mathbb{E}[|b[n]|^2] \quad (3.74)$$

Où  $G_{TX}(f)$  est la transformée de Fourier de  $g_{tx}(t)$ . Nous pouvons voir que pour les symboles non corrélés, la PSD d'un signal modulé linéairement est déterminée par le spectre de la forme d'onde modulante. La forme de la PSD doit être conçue de telle sorte que la forme d'onde soit conforme aux exigences réglementaires concernant, par exemple, la PSD dans la bande et les rayonnements non essentiels hors bande.

Au-delà de passer par le filtre de transmission  $g_{tx}(t)$ , les symboles transmis doivent également passer par un canal  $g_{ch}(t)$  et un filtre de réception  $g_{rx}(t)$ . La forme d'onde sans bruit à la sortie du filtre de réception est donnée par

$$r(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b[n] g(t - nT) \quad (3.75)$$

Où  $g(t) = (g_{tx} * g_{ch} * g_{rx})(t)$  est le filtre composite caractérisant la réponse globale du système. Si nous échantillons la forme d'onde de réception  $r(t)$  au taux  $\frac{1}{T}$ , on obtient  $r(nT)$ . Une question naturelle se pose : quand est-ce  $r(nT) = b[n]$ ,  $\forall n$  ? La réponse est le critère de Nyquist : l'interférence inter-symbole (ISI) peut être évitée si  $g(nT) = 1$  pour  $n=0$  et  $g(nT) = 0$  autrement.

Il est bien connu que la forme d'onde de Nyquist à bande passante minimale est  $g(t) = \text{sinc}\left(\frac{t}{T}\right)$ , où  $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$ . L'impulsion  $\text{sinc}$  décroît avec  $\frac{1}{t}$ , qui est lente et peut conduire à de fortes fluctuations du signal  $r(t)$ . Un exemple de forme d'onde de Nyquist avec une décroissance temporelle rapide de  $\frac{1}{t^2}$  est l'impulsion en cosinus surélevé  $g(t) = \text{sinc}\left(\frac{t}{T}\right) \frac{\cos\left(\frac{\pi a t}{T}\right)}{1 - \left(\frac{2at}{T}\right)^2}$ , où  $a$  est la bande passante excédentaire fractionnaire due à la décroissance temporelle plus rapide. En pratique, le canal n'étant pas sous contrôle, les filtres d'émission et de réception sont conçus de telle sorte que la cascade  $(g_{tx} * g_{rx})(t)$  satisfasse au critère de Nyquist. Un choix typique consiste à régler les filtres d'émission et de réception sur les racines carrées (dans le domaine fréquentiel) d'une impulsion de Nyquist.

### II.3.2. Multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence [14 19 20 21 22]

L'OFDM est un type de technique de modulation multi porteuse qui divise le flux de données en plusieurs sous-flux transmis sur différentes sous-porteuses orthogonales. OFDM est un schéma populaire pour les communications sans fil et a été adopté dans les systèmes sans fil tels que 4G LTE, 5G New Radio (NR) et les spécifications IEEE 802.11 pour le wifi. De nombreux drones sont déjà équipés de puces Wifi et LTE, faisant de l'OFDM une partie intégrante des systèmes de communication sans fil des drones. L'OFDM est utilisé dans le système multi porteuse aéronautique à large bande (B-AMC), qui est un système de communication de données aéronautiques destiné à être exploité dans la bande L. La première option du système de communication aéronautique numérique en bande L (LDACS) utilise également des techniques de modulation OFDM. De nombreux travaux de recherche sur les communications et les réseaux sans fil UAV ont également supposé l'utilisation de l'OFDM.

La forme d'onde OFDM transmise dans la période de temps  $[0, T]$  peut être écrite comme suit :

$$u(t) = \sum_{K=0}^{N-1} B[K] e^{j2\pi \frac{K}{T} t} I_{[0,T]}(t) \quad (3.76)$$

Où  $k$  est l'indice de sous-porteuse,  $B[k]$  est le symbole transmis en utilisant la sous-porteuse  $k$  à la fréquence  $\frac{k}{T}$ . La transformée de Fourier de la forme d'onde  $g_{tx,k}(t) = e^{j2\pi \frac{k}{T} t} I_{[0,T]}(t)$  portant  $B[k]$  équivaut à  $G_{tx,k}(f) = T \text{sinc}(Tf - k) e^{-\frac{\pi}{T}}$ .

Si  $T$  est assez grand pour que  $\frac{1}{T}$  est petite par rapport à la bande passante de cohérence de canal  $B_C$ , le gain de canal vu par la  $k$ -ième sous-porteuse est approximativement constant  $G_{ch}(f) \approx G_{ch}\left(\frac{k}{T}\right)$ . Puis la forme d'onde  $g_{tx,k}(t)$  est une fonction propre approximative du canal, c'est-à-dire,

$$(g_{tx,k} * g_{ch})(t) \approx G_{ch}\left(\frac{k}{T}\right) g_{tx,k}(t). \quad (3.77)$$

L'approximation devient exacte lorsque  $T \rightarrow \infty$ .

Démoduler  $B[\ell]$ , le récepteur multiplie la forme d'onde de réception avec  $e^{-j2\pi \frac{\ell}{T} t}$  et intègre sur la période  $[0, T]$ , ce qui donne que

$$\frac{1}{T} \int_0^{\infty} ((u * g_{ch})(t)) e^{-j2\pi \frac{\ell}{T} t} dt \approx \frac{1}{T} \sum_{k=0}^{N-1} G_{ch} \left( \frac{k}{T} \right) B[k] \int_0^T e^{j2\pi \frac{k-\ell}{T} t} dt \quad (3.78)$$

$$= \sum_{k=0}^{N-1} G_{CH} \left( \frac{k}{T} \right) B[k] \frac{e^{j2\pi(k-\ell)} - 1}{j2\pi(k-\ell)} \quad (3.79)$$

$$= G_{ch} \left( \frac{\ell}{T} \right) B[\ell], \quad (3.80)$$

où la première ligne découle de (3.77). La dernière égalité montre que les différentes sous-porteuses sont orthogonales sur un intervalle de longueur T si les fréquences sont séparées par un multiple entier de  $\frac{1}{T}$ .

L'utilisation généralisée de l'OFDM est en partie due à la mise en œuvre discrète rentable de l'OFDM utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT) et la FFT inverse (IFFT). La forme d'onde u(t) peut être représentée par les échantillons de temps {b[n]} au taux d'échantillonnage  $\frac{1}{T_s} = \frac{N}{T}$ .

$$b[n] = u(n T_s) = \sum_{k=0}^{N-1} B[k] e^{j2\pi \frac{n}{N} k}, \quad (3.81)$$

qui est la transformée de Fourier discrète inverse (DFT) de la séquence de symboles {B[k]}. Le récepteur peut effectuer l'opération inverse - DFT - sur les échantillons de temps reçus {b[n]} pour récupérer la séquence de données d'origine {B[k]}. La plupart des ISI peuvent être supprimés en choisissant N suffisamment large pour que  $\frac{1}{T} \ll B_c$ . Une approche populaire pour supprimer tous les ISI consiste à ajouter un préfixe cyclique de longueur N<sub>cp</sub> (pas plus court que l'étalement du retard de canal) après l'IFFT au niveau de l'émetteur. Le préfixe cyclique est supprimé au niveau du récepteur avant la FFT. Ces opérations créent effectivement une convolution circulaire du signal de transmission discret et de la réponse impulsionnelle du canal (qui, par nature, est une convolution linéaire). Ainsi, la sortie sans bruit de la FFT au niveau du récepteur est Y[k]=H[k]B[k], où H[k] est la FFT de la réponse impulsionnelle du canal de longueur L {h[n]}<sub>L-1,n=0</sub>. Le symbole de données B[k] peut être récupéré par un égaliseur de fréquence à une prise, c'est-à-dire que H\*[k]Y[k] supprime l'effet de canal. Cela rend

l'égalisation de canal dans OFDM facile à mettre en œuvre pour les canaux large bande à trajets multiples.

L'ajout du préfixe cyclique entraîne des pertes d'une fraction  $\frac{N_{cp}}{N_{cp}+N}$  du temps et une fraction  $\frac{N_{cp}}{N_{cp}+N}$  de la puissance moyenne non utilisée pour la communication de données. La durée  $N_{cp}$  du préfixe cyclique est choisi pour couvrir l'étalement de retard de canal typique rencontré dans un système de communication. D'une part, la longueur de bloc OFDM  $N$  doit être choisie aussi grande que possible pour minimiser la surcharge de préfixe cyclique. D'autre part, la longueur de bloc OFDM  $N$  doit être suffisamment petite pour que le canal soit approximativement constant sur la longueur de bloc  $N$  afin d'éviter les interférences entre porteuses. Pour la conception des systèmes de communication UAV, les décalages Doppler et l'étalement Doppler doivent être pris en compte. Les effets Doppler dépendent principalement de la fréquence, de la vitesse de l'avion et de la géométrie. Un décalage Doppler important causé par le mouvement de l'avion peut être estimé et compensé de manière appropriée au niveau de l'émetteur-récepteur. L'étalement Doppler introduit une incertitude sur la fréquence du signal reçu. Un espacement des sous-porteuses suffisamment grand peut être utilisé pour que l'effet d'étalement Doppler soit négligeable. Cela revient à contraindre  $N$  de sorte que le canal soit approximativement constant sur une longueur de bloc OFDM.

La forme d'onde OFDM  $u(t)$  peut être considérée comme un compactage serré de Modulation linéaire signaux à bande étroite. D'après (3.74), la PSD de la forme d'onde OFDM  $u(t)$  sera :

$$S_U(f) = T \sum_{K=0}^{N-1} \in [|B[k]|^2] (\text{sinc}(Tf - k))^2, \quad (3.82)$$

où nous avons supposé que les symboles de données transmis sur différentes sous-porteuses ne sont pas corrélés. Le taux de symboles est  $\frac{N}{T}$ , et la majorité de la puissance du signal est contenue dans la gamme de fréquences  $[-\frac{N}{2T}, \frac{N}{2T}]$ . Le taux de signalisation proche de Nyquist rend l'OFDM hautement efficace sur le plan spectral.

Le principal inconvénient de l'OFDM est que le rapport de puissance crête à moyenne (PAPR) du signal de transmission peut être élevé. Un PAPR élevé peut nécessiter le retour des amplificateurs de puissance dans un régime linéaire qui conduit à une efficacité énergétique inférieure. De nombreuses solutions ont été proposées dans la littérature pour atténuer le

problème du PAPR dans l'OFDM, comme le découpage et la suppression de certaines séquences transmises qui entraînent un PAPR élevé .

### II.3.3. Etalement du spectre en séquence directe [14 23 24 25]

L'étalement du spectre est une technique de modulation qui augmente la bande passante du signal de transmission pour atténuer les ISI et les interférences à bande étroite. La propriété inhérente de "cacher" le signal sous le bruit de fond et la résistance au brouillage à bande étroite rendent le spectre étalé particulièrement souhaitable pour les systèmes de communication militaires. Le **DSSS** et le spectre étalé à saut de fréquence (FHSS) sont deux techniques courantes de spectre étalé. Dans DSSS, le signal de données est multiplié par un pseudo-aléatoire séquence connue sous le nom de code d'étalement. Le DSSS est le bloc de construction fondamental des systèmes mobiles 3G basés sur l'accès multiple par répartition en code (CDMA). Le CDMA, associé à l'OFDM, a également été utilisé dans le vaste projet à très haute fréquence (B-VHF), qui est le premier système de communications aéronautiques utilisant la technologie multiporteuse. Certains travaux de recherche sur les communications et les réseaux sans fil UAV ont également envisagé l'utilisation de CDMA avec DSSS . En **FHSS**, la fréquence centrale de la forme d'onde est sautée sur différentes fréquences, déterminées par une séquence pseudo-aléatoire. Les travaux ont combiné DSSS et FHSS pour réduire les interférences dans les communications et le contrôle des UAV.

Ensuite, nous nous concentrerons sur DSSS car il est plus couramment utilisé. Pour envoyer un symbole DSSS, un vecteur  $\mathbf{b} (c[0], \dots, c[k - 1])^T$  est envoyé, où  $(c[0], \dots, c[k - 1])^T$  est un code d'étalement et  $K$  est la longueur du code d'étalement. En d'autres termes,  $K$  "Chips" sont utilisés pour transmettre un seul symbole. La forme d'onde d'étalement peut être écrite comme

$$c(t) = \sum_{k=0}^{K-1} c[k] \psi(t - kT_c), \quad (3.83)$$

Où  $T_c$  est la durée de la puce et  $\psi(t)$  est la forme d'onde de la puce de modulation. Nous supposons que la même forme d'onde d'étalement est utilisée pour tous les symboles  $\{b[n]\}$ . Puis la transmission signal peut être écrite comme

$$u(t) = \sum_n b[n]c(t - nT) = \sum_n \sum_{k=0}^{K-1} c[k]b[n] \psi(t - kT_c - nT), \quad (3.84)$$

Où  $T$  est la durée du symbole et  $T = KT_c$ . Le débit de données  $\frac{1}{T}$  est généralement beaucoup plus petit que le taux de jétons  $\frac{1}{T_c}$  qui détermine la bande passante de transmission. Le rapport  $K = \frac{T}{T_c}$  est souvent appelé le gain de traitement du système. Considérez le canal multivoie  $h(t) = \sum_{\ell=0}^{L-1} a_\ell \delta(t - \tau_\ell)$ , où  $a_\ell$  et  $\tau_\ell$  sont le gain et retard complexes du  $\ell$ -ième chemin, respectivement. Le signal de réception sans bruit sera alors être :

$$r(t) = (u * h)(t) = \sum_n b[n] \sum_{k=0}^{K-1} c[k] \sum_{\ell=0}^{L-1} a_\ell \psi(t - \tau_\ell - kT_c - nT). \quad (3.85)$$

L'égalisation au niveau du récepteur n'est pas nécessaire pour la démodulation. Cela est dû au fait que l'ISI est négligeable étant donné que la durée de symbole  $T$  est généralement grande par rapport à l'étalement du retard de canal dans un système à spectre étalé. Le récepteur Rake est une structure de récepteur de démodulation DSSS commune qui ignore l'ISI. Le récepteur Rake consiste à corrélér le signal de réception  $r(t)$  avec  $L$  "doigts", dont chacun est une version décalée de la forme d'onde d'étalement. Considérons maintenant une opération générique pour la corrélation de  $r(t)$  et  $c(t - \tau)$  où  $\tau$  est le retard. La sortie de la corrélation donne la statistique d'estimation  $Z(\tau)$  :

$$Z(\tau) = \int r(t)c^*(t - \tau)dt \quad (3.86)$$

$$= \sum_{k=0}^{K-1} c^*[k] \int r(t) \psi^*(t - \tau - kT_c)dt \quad (3.87)$$

$$= \sum_{k=0}^{K-1} c^*[k](r * \psi_{mf})(kT_c + \tau), \quad (3.88)$$

Où  $\psi_{mf}(t) = \psi^*(-t)$  est le filtre adapté de la forme d'onde chip  $\psi(t)$ . Nous pouvons voir que le processus de désétalement implique un discret corrélation du code d'étalement  $\{c[k]\}$  et de la sortie du filtre adapté aux puces  $\psi_{mf}(t)$  échantillonné au moment des instances  $\{kT_c + \tau\}$ .

Dans le récepteur Rake, pour démoduler le symbole  $b[n]$ , le signal reçu  $r(t)$  est corrélé avec  $L$  "doigts" :  $a_\ell c(t - \tau_\ell), \ell = 0, \dots, L - 1$  et les  $L$ 'outputs sont combinés de manière cohérente, c'est-à-dire,

$$z[n] = \sum_{\ell=0}^{L-1} a_\ell^* Z(nT + \tau_\ell), \quad (3.89)$$

Où  $Z[n]$  représente la statistique d'estimation pour décider de  $b[n]$ . Le récepteur Rake est essentiellement une forme de combinaison de diversité temporelle des signaux provenant des branches  $L$ .

### II.3.4. Modulation de phase continue [14 26 27]

Dans CPM, la représentation en bande de base se présente sous la forme de  $e^{j\theta(t)}$ , où  $\theta(t)$  est une fonction continue de time  $t$  qui encode les données. Le signal d'émission a une enveloppe constante et n'est pas sensible à la distorsion d'amplitude. Par conséquent, l'amplificateur de puissance peut fonctionner dans un régime non linéaire pour atteindre un rendement énergétique élevé. Un exemple important de CPM est la modulation par décalage minimum gaussien (GMSK) utilisée dans le système mondial 2G pour les communications mobiles (GSM). La modulation GMSK est également utilisée dans le système de communication aéronautique multicanal polyvalent (AMACS) proposé en 2007 et dans la deuxième option du LDACS. Certains travaux de recherche récents ont également envisagé d'utiliser GMSK pour les systèmes de communication sans fil UAV. La fonction de phase continue  $\theta(t)$  peut être liée à la fonction de fréquence instantanée  $u(t)$  comme suit :

$$\theta(t) = 2\pi \int_{-\infty}^t u(\tau) d\tau, \quad (3.90)$$

Où la fréquence instantanée est modulée linéairement

$$u(t) = \sum_n b[n]g(t - nT), \quad (3.91)$$

Où  $\{b[n]\}$  sont les symboles de données et  $g(t)$  est l'impulsion de fréquence.

Nous pouvons spécifier un système CPM en spécifiant l'impulsion de fréquence. Un exemple est minimum shift keying (MSK) avec des symboles  $\{b[n]\}$  prenant des valeurs binaires  $\{+1, -1\}$ .

L'impulsion de fréquence est une impulsion rectangulaire donnée par

$$g(t) = \frac{1}{4T} I_{[0,T]}(t). \quad (3.92)$$

Pour ce système MSK, il existe deux décalages de fréquence possibles de  $\pm \frac{1}{4T}$ . L'écart de fréquence est  $\frac{1}{2T}$ , qui est l'espacement minimum nécessaire pour préserver l'orthogonalité dans la modulation par déplacement de fréquence cohérente (FSK). Pour améliorer l'efficacité spectrale, nous pouvons utiliser des impulsions plus douces. Un choix courant est la forme d'impulsion gaussienne qui a une fonction de transfert de la forme :

$$G(f) = e^{-\beta^2 f^2}, \quad (3.93)$$

Où  $\beta$  est un paramètre lié à la bande passante de 3 dB  $B_{3dB}$  de  $G(f)$  comme  $\beta = \frac{(\frac{1}{2} \log_e 2)^{\frac{1}{2}}}{B_{3dB}}$ . La forme d'impulsion gaussienne dans le domaine temporel est donnée par :

$$g(t) = \frac{\sqrt{\pi}}{\beta} e^{-\frac{\pi^2}{\beta^2} t^2} \quad (3.94)$$

MSK avec une forme d'impulsion gaussienne est connu sous le nom de GMSK.

CPM est une technique de modulation avec mémoire. Une approche par maximum de vraisemblance peut être utilisée pour la démodulation en exploitant la structure en treillis de CPM et en utilisant l'algorithme de Viterbe. L'approche du maximum de vraisemblance peut devenir assez lourde pour un canal sélectif en fréquence, puisque le nombre d'états du treillis étendu croît de manière exponentielle avec l'étalement du retard du canal. Pour réduire la complexité, une approche populaire consiste à utiliser la représentation de Laurent des signaux CPM qui décompose un signal CPM en une somme de signaux parallèles modulés linéairement. L'impulsion modulante dans la représentation de Laurent n'est cependant pas l'impulsion de Nyquist ou la racine carrée de l'impulsion de Nyquist. L'ISI est donc intégré au modèle, ce qui n'est pas surprenant compte tenu de la mémoire du CPM. Le canal dispersif induit davantage

d'ISI. L'avantage de la représentation de Laurent est que nous pourrions utiliser les techniques d'égalisation développées pour la modulation linéaire pour démoduler le signal CPM reçu.

### II.4. Techniques de modulation numériques [28]

#### II.4.1. Concepts de base de la modulation

##### II.4.1.1. Trois types de modulations

La modulation est le processus qui facilite le transfert d'informations sur un support. La transmission du son dans l'air a une portée limitée pour la quantité de puissance que vos poumons peuvent générer. Pour étendre la portée que votre voix peut atteindre, nous devons la transmettre via un support autre que l'air. , comme une ligne téléphonique ou une radio. Le processus de conversion des informations (voix dans ce cas) afin qu'elles puissent être envoyées avec succès via un support (fil ou ondes radio) est appelé modulation.

Il existe trois types de base de techniques de modulation numérique. Ceux-ci sont

- Manipulation par décalage d'amplitude (ASK)
- Manipulation par déplacement de fréquence (FSK)
- Manipulation par décalage de phase (PSK)

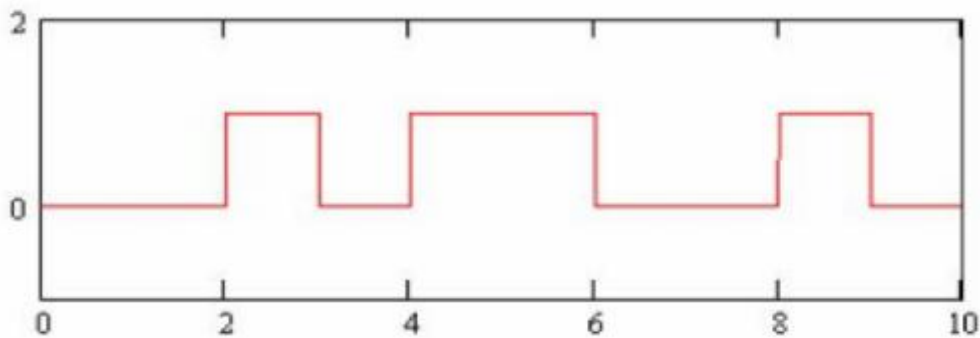
Toutes ces techniques font varier un paramètre d'une sinusoïde pour représenter l'information que nous souhaitons envoyer. Une onde porteuse générale peut s'écrire :

$$C(t) = A \sin(2\pi f t + \phi) \quad (1)$$

Une sinusoïde a trois paramètres différents qui peuvent être modifiés. Ce sont son amplitude, sa phase et sa fréquence. La modulation est un processus de cartographie tel qu'il prend votre voix (comme exemple de signal) la convertit en un aspect d'une onde sinusoïdale, puis transmet l'onde sinusoïdale, laissant la voix réelle derrière. L'onde sinusoïdale de l'autre côté est remparée vers une copie proche de votre son. Le milieu est la chose à travers laquelle l'onde sinusoïdale se déplace. Donc le fil est un médium ainsi que l'air, l'eau et l'espace. L'onde sinusoïdale s'appelle la porteuse. L'information à envoyer, qui peut être de la voix ou des données, est appelée le signal d'information. Une fois la porteuse cartographiée avec l'information à transmettre, ce n'est plus une sinusoïde et on l'appelle le signal.

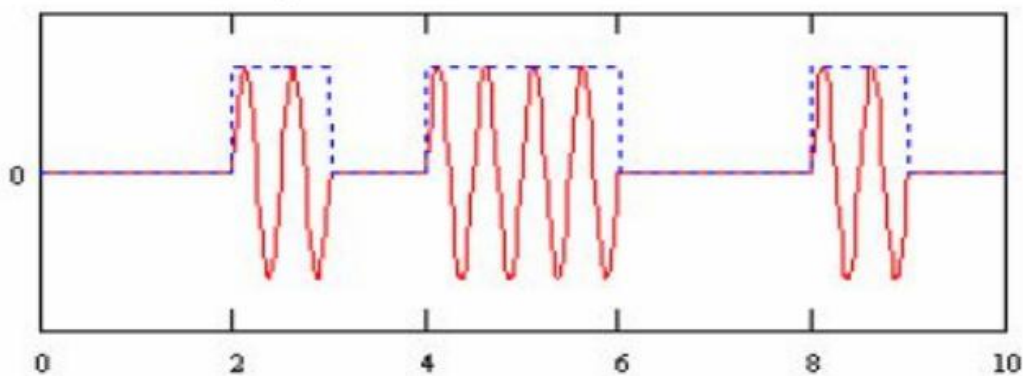
## II.4.2. ASK

Dans ASK, l'amplitude de la porteuse est modifiée en réponse aux informations et tout le reste est maintenu fixe. En binaire ASK, le bit 1 est transmis par une porteuse d'une amplitude particulière. Pour transmettre 0, on change l'amplitude en gardant la fréquence constante. On-Off Keeling (OOK) est une forme spéciale de ASK, où l'une des amplitudes est nulle, comme le montrent les fig.II.2 et fig. II.3.



**Figure II.2.** Séquence d'informations en bande de base – 0010110010.

Binaire ASK(t) = s(t)sin(2πft)

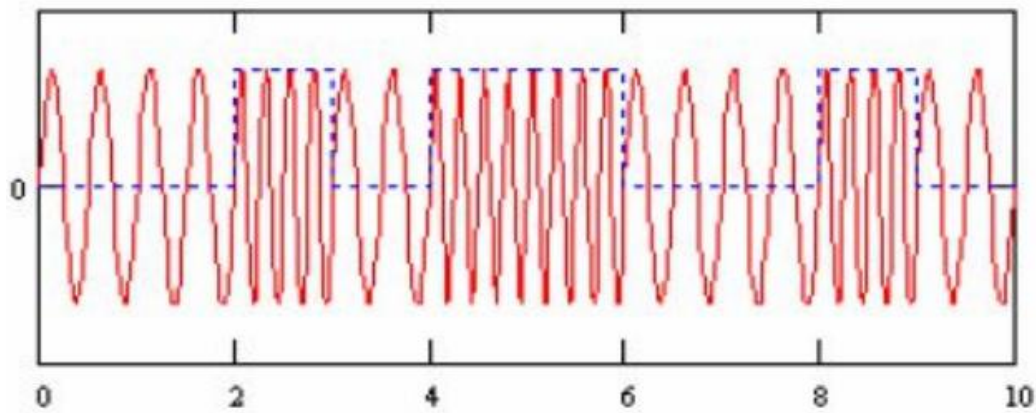


**Figure II.3.** Signal binaire ASK (OOK).

## II.4.3. FSK

En FSK, nous modifions la fréquence en réponse aux informations. En binaire FSK, une fréquence particulière pour un 1 et une autre fréquence pour un 0 est utilisée comme indiqué sur la figure II.4. pour la même séquence de bits que ci-dessus. Dans l'exemple ci-dessous, la fréquence f1 pour le bit 1 est supérieure à f2 utilisée pour le bit 0.

$$\text{Binaire FSK}(t) = \begin{cases} \sin(2\pi f_1 t) & \text{for bit 1} \\ \sin(2\pi f_2 t) & \text{for bit 0} \end{cases}$$



**Figure II.4.** Signal FSK binaire.

#### II.4.4. PSK

En PSK, nous changeons la phase de la porteuse sinusoïdale pour indiquer des informations. La phase dans ce contexte est l'angle de départ auquel la sinusoïde commence. Le signal transmis est une sinusoïde d'amplitude fixe. La modulation par déplacement de phase est un processus de modulation par lequel le signal d'entrée, une forme d'onde PCM binaire, décale la forme d'onde de sortie vers l'un d'un nombre fixe d'états. L'expression analytique générale de la PSK est

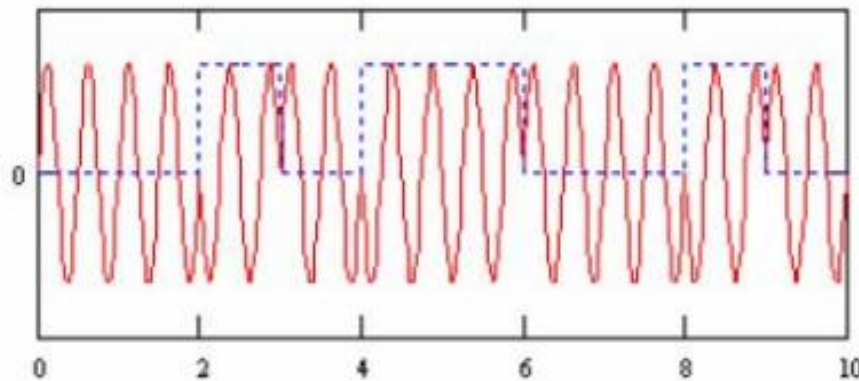
$$S_i(t) = (2E/T)^{1/2} \cos [\omega_o t + \varphi_i(t)] \quad (02)$$

$0 \leq t \leq T$   $i=1, \dots, M$  Où le terme de phase  $\varphi(t)$  aura  $M$  valeurs discrètes, typiquement donné par  $\varphi(t) = 2\pi i/M$   $i=1, \dots, M$   $E$  est l'énergie du symbole,  $T$  est la durée du symbole.

Pour le PSK binaire, il a une phase fixe généralement  $0^\circ$  lorsque les données sont 1. Pour transmettre 0, nous décalons la phase de la sinusoïde de  $180^\circ$ . Le déphasage représente le changement d'état de l'information dans ce cas. Les techniques ASK sont les plus sensibles aux effets des dispositifs non linéaires qui compriment et déforment l'amplitude du signal. Pour éviter une telle distorsion, le système doit fonctionner dans la plage linéaire, loin du point de

puissance maximale où se produit la plupart des comportements non linéaires. L'utilisation de la modulation par déplacement de phase produit un signal d'amplitude constante et a été choisie pour sa simplicité et pour réduire les problèmes de fluctuations d'amplitude dues à l'évanouissement.

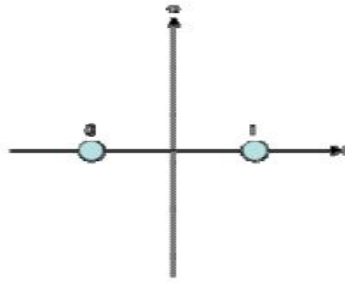
$$\text{Binaire PSK}(t) = \begin{cases} \sin(2\pi ft) & \text{for bit 1} \\ \sin(2\pi ft + \pi) & \text{for bit 0} \end{cases}$$



**Figure II.5.** Porteuse PSK binaire (notez  $180^\circ$  décalages de phase aux bords des bits).

### II.4.4.1. BPSK

Dans la modulation par déplacement de phase binaire (BPSK), le signal transmis est une sinusoïde d'amplitude fixe. BPSK est la forme la plus simple de PSK. Il utilise deux phases séparées de  $180^\circ$  et peut donc également être appelé 2-PSK. Il a une phase fixe lorsque les données sont à un niveau et quand les données sont à un autre niveau la phase est différent de  $180^\circ$ . La position exacte des points de la constellation n'a pas particulièrement d'importance, et sur cette figure, ils sont représentés sur l'axe réel, à  $0^\circ$  et  $180^\circ$ . Cette modulation est la plus robuste de toutes les PSK's, car il faut une sérieuse distorsion pour que le démodulateur atteigne une décision incorrecte. Il n'est cependant capable de moduler qu'à 1 bit/symbole (comme le montre la figure II.5.) et ne convient donc pas aux applications à haut débit lorsque la bande passante est limitée.



**Figure II.6.** Diagramme de constellation pour BPSK.

Le taux d'erreur binaire (BER) de BPSK en AWGN peut être calculé comme suit :

$$P_b = Q \left[ \sqrt{\frac{2E_b}{N_o}} \right]$$

Où  $N_o/2$  est la densité spectrale de puissance de bruit (W/Hz)

Où  $T_b$  est un intervalle de bits

Où  $E_b = p_s T_b$  est l'énergie contenue dans une durée de bit

Où  $P_s$  est la puissance de la sinusoïde d'amplitude A

$$\text{Alors, } P_s = \frac{1}{2} A^2$$

Dans la modulation par déplacement de phase binaire (BPSK), le signal transmis est une sinusoïde d'amplitude fixe.

Si la sinusoïde est d'amplitude A, elle a une puissance  $P_s = \frac{1}{2} A^2$  pour que  $A = \sqrt{2P_s}$ .

Ainsi, le signal transmis est soit

$$V_{BPSK}(t) = \sqrt{2P_s} \cos(\omega_0 t) \quad (03)$$

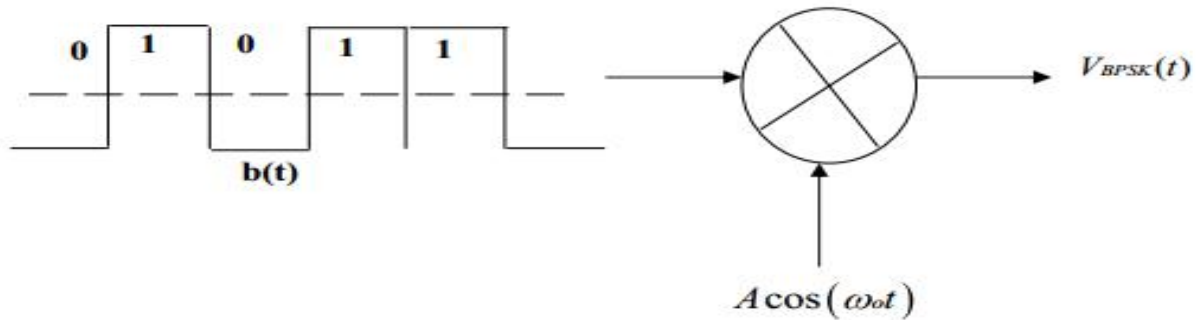
$$V_{BPSK}(t) = \sqrt{2P_s} \cos(\omega_0 t + \pi) \quad (04)$$

$$= -\sqrt{2P_s} \cos(\omega_0 t) \quad (05)$$

Dans BPSK, les données  $b(t)$  sont un flux binaire chiffres avec des niveaux de tension qui, convenance, nous prenons pour être à +1v et -1v. Lorsque  $b(t) = 1v$  on dit qu'il est au niveau logique 1 et lorsque  $b(t) = -1v$  on dit qu'il est au niveau logique 0. D'où  $V_{BPSK}(t)$  peut-être écrit comme

$$V_{BPSK}(t) = b(t) \sqrt{2P_s} \cos(\omega_0 t) \quad (06)$$

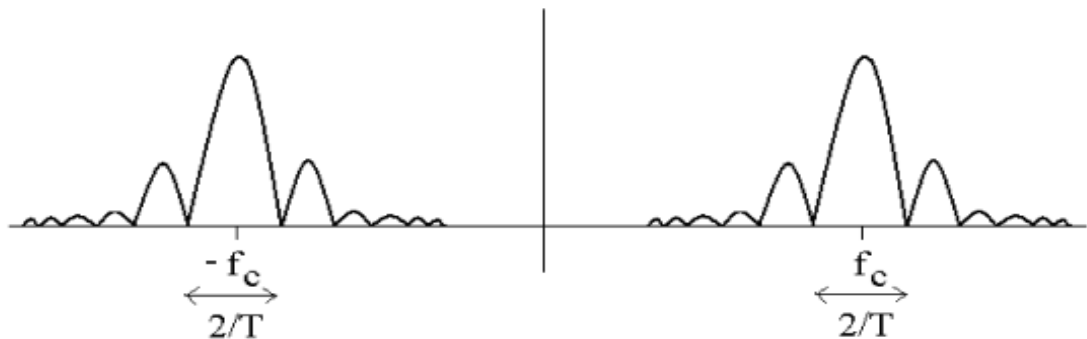
Ainsi, le signal BPSK est généré comme le montre la figure II.7.



**Figure II.7.** Illustration de la modulation d'un signal de message pour produire un signal BPSK.

En pratique, un signal BPSK est généré en appliquant la forme d'onde  $\cos(\omega_0 t)$ , en tant que porteur, à un modulateur équilibré et en appliquant le signal de bande de base  $b(t)$  comme forme d'onde de modulation. Dans ce sens BPSK peut être considéré comme un signal AM.

Si  $f_c$  est la fréquence de la sinusoïde et  $T$  est l'intervalle de bit puis le spectre de là le signal BPSK résultant est montré dans la figure II.8.



**Figure II.8.** Spectre d'amplitude de BPSK.

Pour une séquence binaire  $m(t) = 0 1 0 1 0 0 1$ , et si la sinusoïde  $s(t)$  est d'amplitude  $A$ , alors le signal BPSK résultant sera comme indiqué sur la figure II.9.

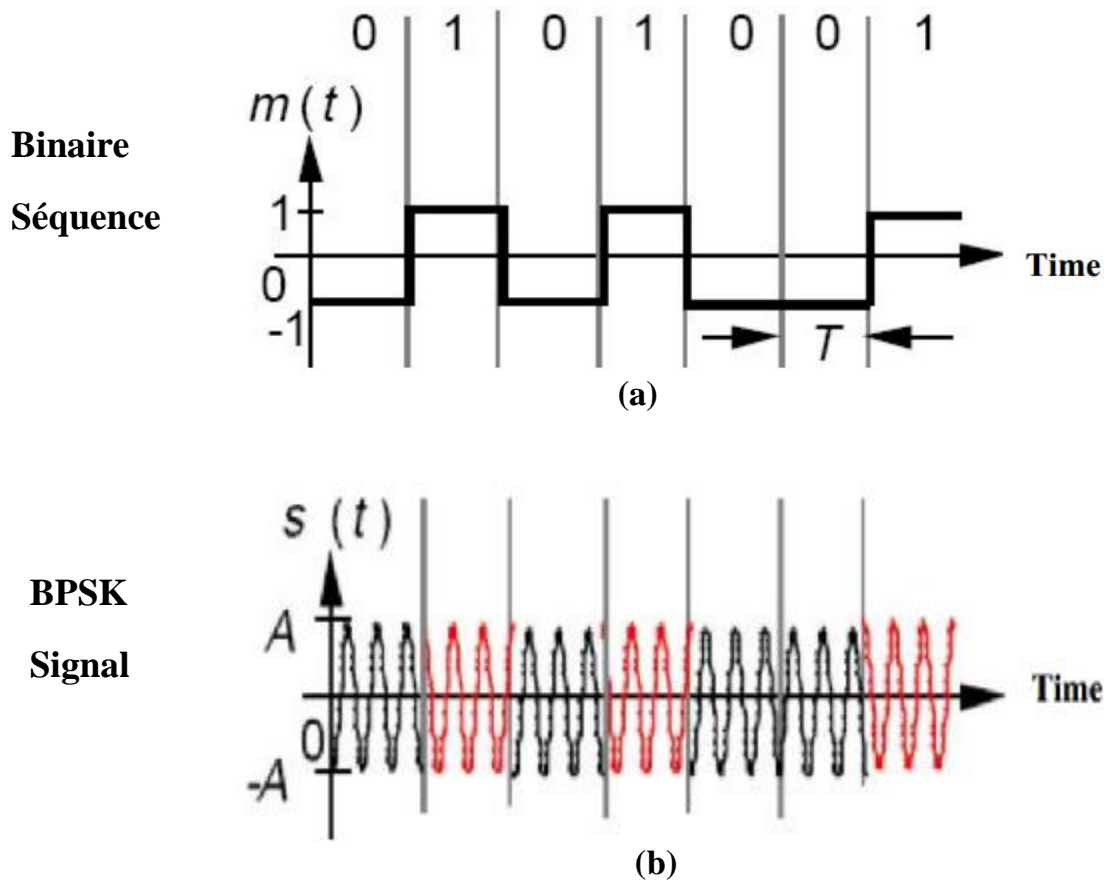
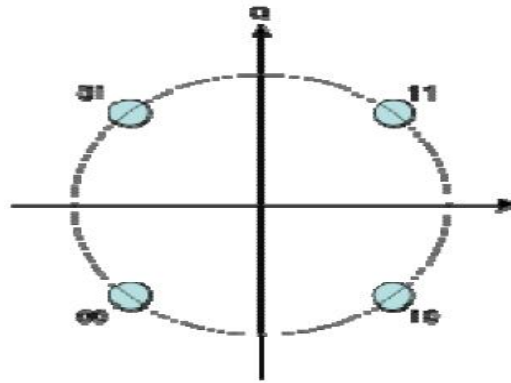


Figure II.9. (a) signal de modulation binaire et (b) signal BPSK.

#### II.4.4.2. QPSK

QPSK (4-ary PSK) consiste à changer la phase de la forme d'onde transmise. Chaque le changement de phase fini représente des données numériques uniques. Une forme d'onde modulée en phase peut être générée en utilisant les données numériques pour modifier la phase d'un signal tandis que sa fréquence et son amplitude restent constantes. Une porteuse modulée QPSK subit quatre changements de phase distincts qui sont représentés sous forme de symboles et peuvent prendre les valeurs de  $\pi/4$ ,  $3\pi/4$ ,  $5\pi/4$ , et  $7\pi/4$ . Chaque symbole représente deux bits binaires de données. Le diagramme de constellation d'une porteuse modulée QPSK est illustré à la figure II.10.

$$s(t) = x\cos(\omega t) + y\sin(\omega t) \quad (07)$$



**Figure II.10.** Diagramme de constellation pour QPSK avec codage Gray.

Chaque symbole adjacent ne diffère que d'un bit.

Noter que

$$I_{amplitude} = (\text{symbol expression}) * \cos(\text{phase})$$

$$Q_{amplitude} = (\text{symbol expression}) * \sin(\text{phase})$$

**Tableau II.1 :** Quatre définitions de mappage de symboles pour QPS

Symbol	Bits	Expression	Phase	I	Q
S1	00	$(2E/T)^{\Lambda} 1/2 * \cos (wt + \frac{\pi}{4})$	$\pi/4$	$2^{\Lambda}(-1/2)$	$2^{\Lambda}(-1/2)$
S2	10	$(2E/T)^{\Lambda} 1/2 * \cos (wt + 3\frac{\pi}{4})$	$3\pi/4$	$-2^{\Lambda}(-1/2)$	$2^{\Lambda}(-1/2)$
S3	11	$(2E/T)^{\Lambda} 1/2 * \cos (wt + 5\frac{\pi}{4})$	$5\pi/4$	$-2^{\Lambda}(-1/2)$	$-2^{\Lambda}(-1/2)$
S4	01	$(2E/T)^{\Lambda} 1/2 * \cos (wt + 7\frac{\pi}{4})$	$7\pi/4$	$2^{\Lambda}(-1/2)$	$-2^{\Lambda}(-1/2)$

#### II.4.4.2.1. Code gris

Les performances du système d'un réseau de communication numérique peuvent être améliorées en incorporant une technique de codage, au sein du système, connue sous le nom de codage Gray. L'encodeur gris est utilisé pour mapper les données de manière à aider à réduire les erreurs sur les bits. Un système QPSK prend les bits de données d'entrée, deux à la fois, et crée un symbole qui représente l'un des quatre états de phase. Le codeur gray est donc utilisé pour mapper tous les deux bits de données d'entrée sur l'une des quatre valeurs de symbole uniques de sorte que les paires de bits qui sont utilisées pour générer les symboles ne diffèrent

que d'un bit de chaque symbole adjacent. Cette technique s'avère utile pour les performances d'erreur car si un symbole est reçu par erreur, il ne contiendra qu'un seul bit d'erreur s'il a été reçu par erreur dans un symbole adjacent. Cela peut être plus facilement observé en visualisant le diagramme de constellation QPSK illustré à la Fig. II.10. Ce diagramme de constellation QPSK montre des symboles, chacun représenté par deux bits de données qui ont d'abord été codés en gris. On peut voir que chaque symbole adjacent est représenté par deux bits de données qui varient d'un bit. Les performances des réseaux de communication numériques peuvent encore être améliorées par l'utilisation de codes correcteurs d'erreurs.

### II.4.4.2.2. Modulation QPSK

La figure II.11. représente le processus d'un modulateur QPSK. Tout d'abord, le flux de bits binaires d'entrée est divisé en deux flux de bits qui sont les flux de bits pairs et impairs (flux en quadrature et en phase) par le convertisseur série-parallèle. Ensuite, envoyez des bits alternés aux canaux I, Q : les bits pairs au canal Q, les bits impairs au canal I.

Deuxièmement, en utilisant la méthode de NRZ, les bits pairs et impairs sont convertis d'une séquence unipolaire en une séquence bipolaire (0 à -1). Ensuite, multipliez le canal Q avec un sinus de  $f_c$  et multipliez le canal I avec un sinus mais décalé de 90 degrés qui est -cosinus. Notez que le bloc à 90 degrés sur la figure transmet la séquence sinus supérieure à la séquence cosinus inférieure.

Enfin, en combinant ou en ajoutant les parties supérieures (I) et inférieures (Q) et en passant par un filtre harmonique ou de canal, vous obtiendrez la sortie modulée QPSK.

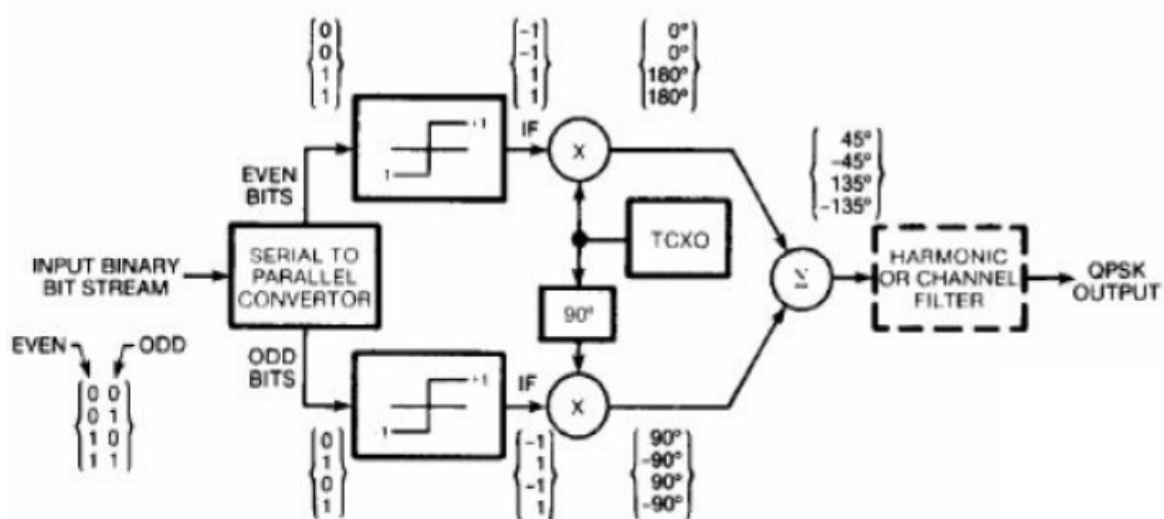
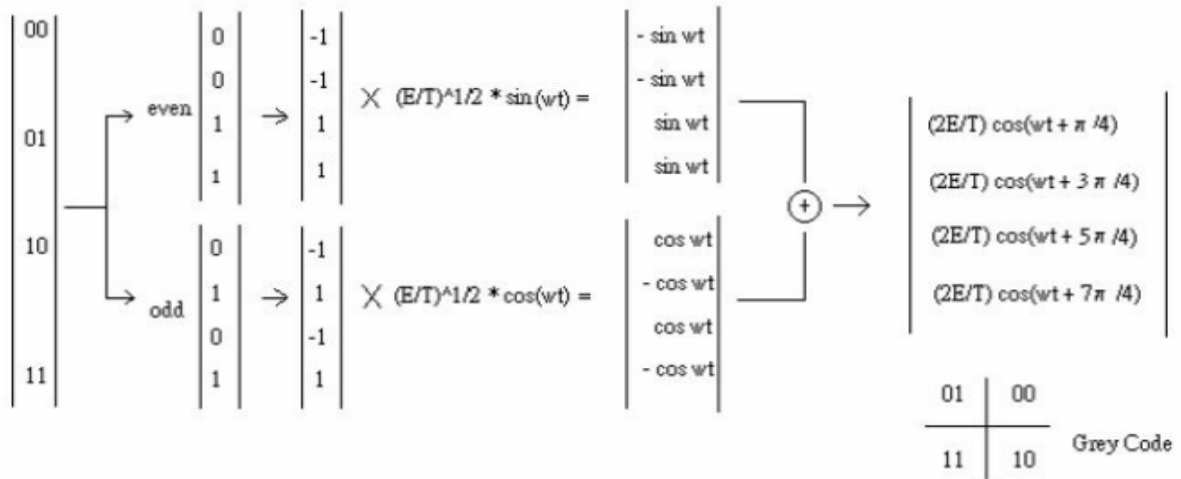
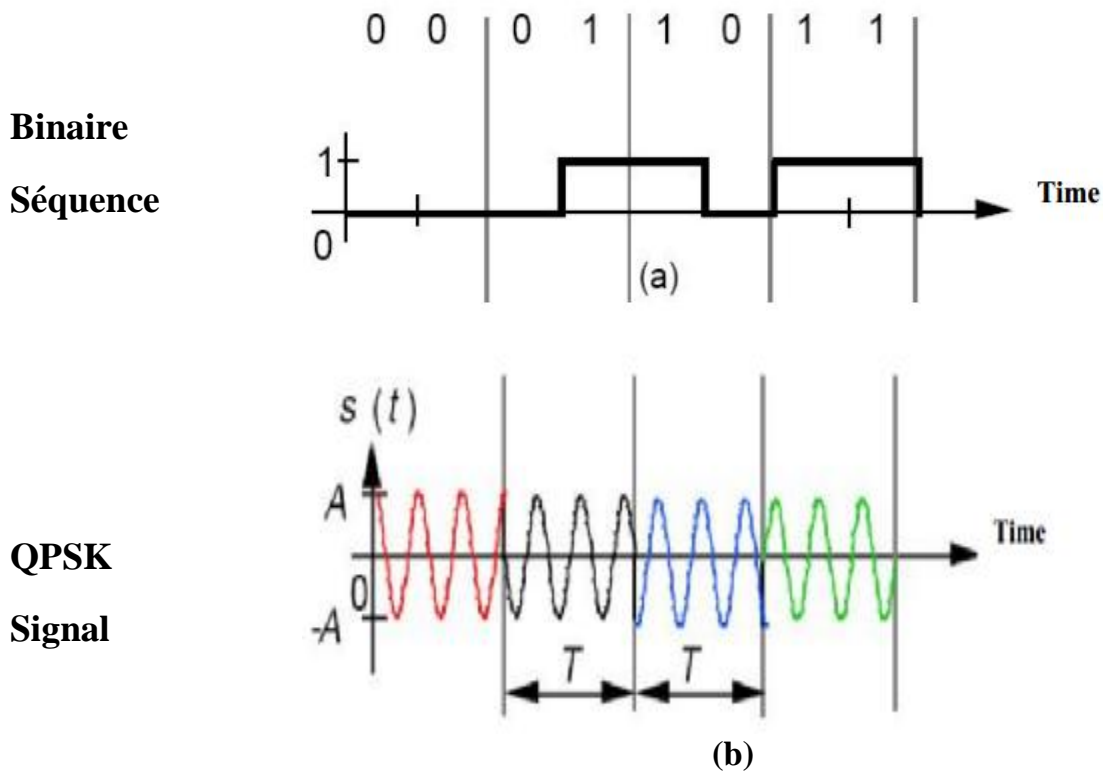


Figure II.11. Modulateur QPSK.



**Figure II.12.** La représentation mathématique du processus du modulateur QPSK.

Pour une séquence binaire  $m(t) = 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1$ , si la sinusoïde  $s(t)$  est d'amplitude  $A$ , alors le signal QPSK résultant sera comme indiqué sur la figure II.13. La phase de la sinusoïde est décalée de  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $360^\circ$  pour les données 00, 01, 10, 11 respectivement



**Figure II.13.** Modulation QPSK : (a) séquence binaire et (b) signal QPSK.

### II.4.4.3. MPSK

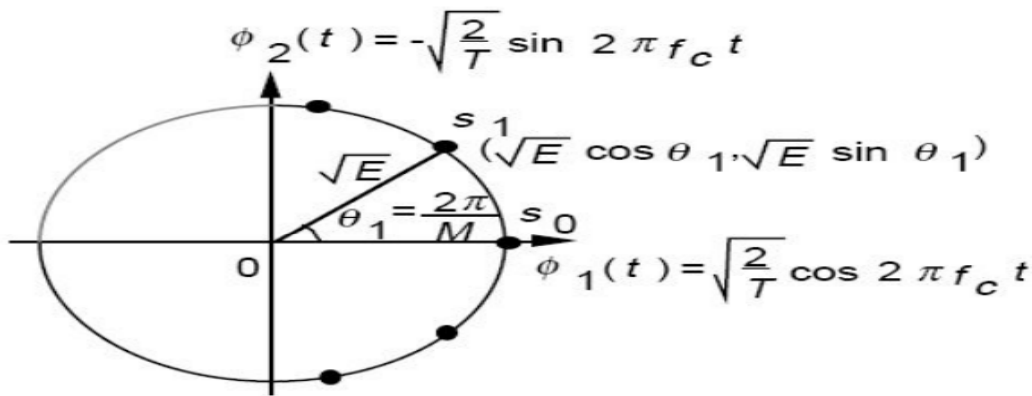
Dans BPSK, nous transmettons chaque bit individuellement. Selon que  $b(t)$  est à 0 logique ou à 1 logique, on transmet l'une ou l'autre des sinusoïdes pour le temps bit  $T_b$ , les sinusoïdes différant en phase de  $2\pi/2 = 180^\circ$ . Dans QPSK, nous regroupons deux bits. Selon lequel des quatre deux bits mots se développe, on transmet l'une ou l'autre des quatre sinusoïdes de durée  $2T_b$ , les sinusoïdes différant en phase par quantité  $2\pi/4 = 90^\circ$ . Le régime peut être étendu. Regroupons-nous N bits de sorte que dans ce symbole de N bits, s'étendant dans le temps  $NT_b$ , il ya  $2^N = M$  symboles possibles. Représentons maintenant les symboles par des sinusoïdes de durée  $NT_b = T_s$  qui diffèrent de l'autre par la phase de  $2\pi/M$ .

Ainsi, dans M-ary PSK, les formes d'onde utilisées pour identifier les symboles sont

$$v_m(t) = \sqrt{2P_s} \cos(\omega_o + \phi_m) \quad (m = 0, 1, \dots, M - 1) \quad (08)$$

Avec l'angle de phase du symbole donné par

$$M\phi_m = (2m + 1) \frac{\pi}{M} \quad (09)$$



**Figure II.14.** Diagramme de constellation pour M-aire PSK.

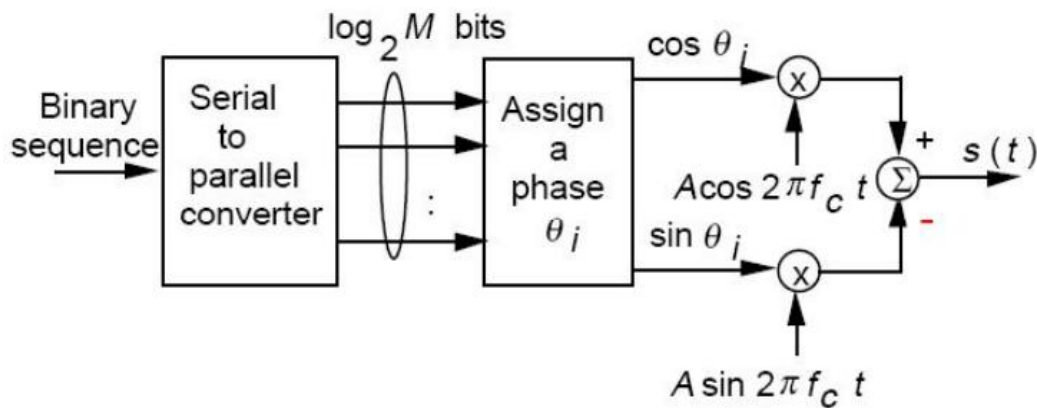


Figure II.15. Modulateur PSK maire.

## II.4.5. QAM

Dans BPSK, QPSK et PSK maire, nous transmettons, dans n'importe quel intervalle de symboles, un signal ou un autre qui se distinguent les uns des autres en phase mais sont tous de la même amplitude. Dans chacun de ces systèmes individuels, les points terminaux des vecteurs de signal dans l'espace du signal tombent sur la circonférence d'un cercle. Nous avons maintenant noté que notre capacité à distinguer un vecteur de signal d'un autre en présence de bruit dépendra de la distance entre les points d'extrémité du vecteur. Il est donc assez évident que nous pourrions améliorer l'immunité au bruit d'un système en permettant aux vecteurs de signal de différer, non seulement en phase mais aussi en amplitude. Nous appelons cela la modulation par déplacement d'amplitude et de phase ou la modulation d'amplitude en quadrature (QAM).

ASK est également combiné avec PSK pour créer des systèmes hybrides tels que la modulation d'amplitude en quadrature (QAM) où l'amplitude et la phase sont modifiées en même temps. QAM est un schéma de modulation qui transmet des données en modifiant (modulant) l'amplitude de deux ondes porteuses. Ces deux ondes, généralement des sinusoïdes, sont déphasées l'une de l'autre de  $90^\circ$  et sont donc appelées porteuses en quadrature - d'où le nom du schéma.

Comme pour de nombreux schémas de modulation numérique, le diagramme de constellation est une représentation utile. Dans QAM, les points de constellation sont généralement disposés dans une grille carrée avec un espacement vertical et horizontal égal, bien que d'autres configurations soient possibles. Étant donné que dans les télécommunications numériques, les données sont généralement binaires, le nombre de points dans la grille est généralement une puissance de 2 (2, 4, 8...). Étant donné que le QAM est généralement carré,

certaines d'entre eux sont rares - les formes les plus courantes sont 16-QAM, 64-QAM, 128-QAM et 256-QAM. En passant à une constellation d'ordre supérieur, il est possible de transmettre plus de bits par symbole. Cependant, si l'énergie moyenne de la constellation doit rester la même (au moyen d'une comparaison équitable), les points doivent être plus proches les uns des autres et sont donc plus sensibles au bruit et à d'autres corruptions ; cela se traduit par un taux d'erreur binaire plus élevé et donc un QAM d'ordre supérieur peut fournir plus de données de manière moins fiable qu'un QAM d'ordre inférieur.

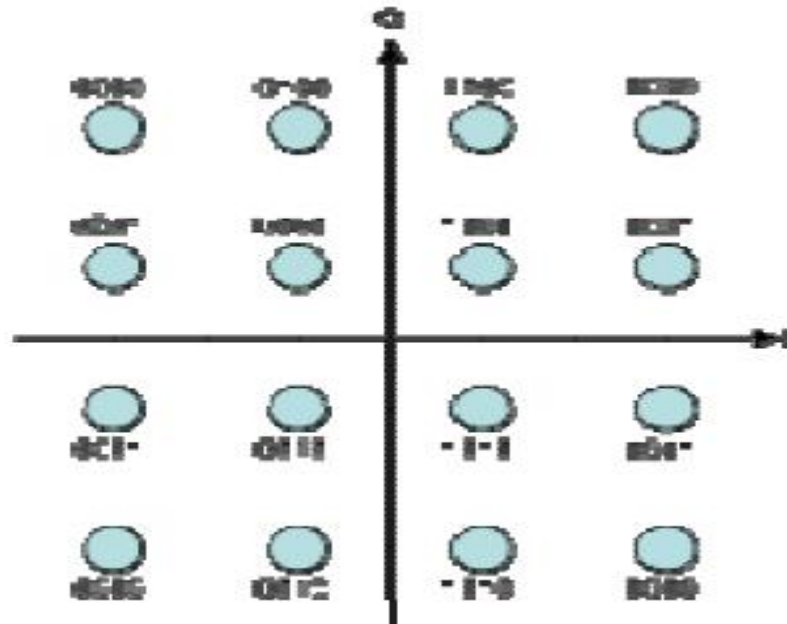
Si des débits de données supérieurs à ceux offerts par 8-PSK sont requis, il est plus courant de passer au QAM car il permet d'obtenir une plus grande distance entre les points adjacents dans le plan IQ en répartissant les points plus uniformément. Le facteur de complication est que les points n'ont plus tous la même amplitude et que le démodulateur doit donc maintenant détecter correctement à la fois la phase et l'amplitude, plutôt que la phase uniquement.

64-QAM et 256-QAM sont souvent utilisés dans les applications de télévision par câble numérique et de modem câble. Aux États-Unis, 64-QAM et 256-QAM sont les schémas de modulation obligatoires pour le câble numérique. Au Royaume-Uni, 16-QAM et 64-QAM sont actuellement utilisés pour la télévision numérique terrestre (Freeview et Top Up TV).

### II.4.5.1. MAQ rectangulaire

Les constellations QAM rectangulaires sont, en général, sous-optimales en ce sens qu'elles n'espacent pas au maximum les points de constellation pour une énergie donnée. Cependant, ils ont l'avantage considérable qu'ils peuvent être facilement transmis sous forme de deux signaux de modulation d'amplitude d'impulsion (PAM) sur des porteuses en quadrature, et peuvent être facilement démodulés. Les constellations non carrées atteignent un taux d'erreur sur les bits (BER) légèrement meilleur mais sont plus difficiles à moduler et à démoduler.

La première constellation QAM rectangulaire habituellement rencontrée est la 16-QAM, son diagramme de constellation est représenté sur la fig. II.16. Une affectation de bit codée Gray est également donnée. La raison pour laquelle 16-QAM est généralement le premier est qu'un bref examen révèle que 2-QAM et 4-QAM sont en fait une modulation par déplacement de phase binaire (BPSK) et une modulation par déplacement de phase en quadrature (QPSK), respectivement. En outre, les performances de taux d'erreur du 8-QAM sont proches de celles du 16-QAM (seulement environ 0,5 dB de mieux), mais son débit de données n'est que les trois quarts de celui du 16-QAM.



**Figure II.16.** Diagramme de constellation pour 16-QAM rectangulaire.

Les expressions pour le taux d'erreur de symbole de QAM rectangulaire ne sont pas difficiles à dériver mais donnent des expressions plutôt désagréables. Pour un nombre pair de bits par symbole,  $k$ , des expressions exactes sont disponibles. Ils sont plus facilement exprimés dans un sens par transporteur :

$$P_{sc} = 2 \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right] Q \left[ \sqrt{\frac{3}{M-1} \frac{E_s}{N_o}} \right] \quad (10)$$

Alors, 
$$P_s = 1 - (1 - P_{sc})^2 \quad (11)$$

Le taux d'erreur binaire dépendra de l'affectation exacte des bits aux symboles, mais pour une affectation codée Gray avec des bits égaux par porteuse :

$$P_{bc} = \frac{4}{K} \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right] Q \left[ \sqrt{\frac{3K}{M-1} \frac{E_b}{N_o}} \right] \quad (11)$$

Alors, 
$$P_b = 1 - (1 - P_{bc})^2 \quad (12)$$

$M$  = Nombre de symboles dans la constellation de modulation

$E_b$  = Énergie par bit

$E_s$  = Énergie par symbole =  $kE_b$  avec  $k$  bits par symbole

$N_o$  = Densité spectrale de puissance de bruit (W/Hz)

$P_b$  = Probabilité d'erreur binaire

$P_{bc}$  = Probabilité d'erreur binaire par porteuse

$P_s$  = Probabilité d'erreur de symbole

$P_{sc}$  = Probabilité d'erreur de symbole par porteuse

## **II.5. Conclusion**

Les techniques de transmission utilisés dans le contrôle des drones à savoir: l'OFDM, le FHSS et le DSSS permettent une communication fiable et robuste, protégé contre les interférences, ont été abordés dans ce chapitre. Le principe de fonctionnements ainsi que les détails techniques ont été décrites.

Dans le chapitre qui suit nous allons aborder l'implémentation et la simulation de ces techniques sous différentes conditions.



**Chapitre III :**  
Simulations et Discussions

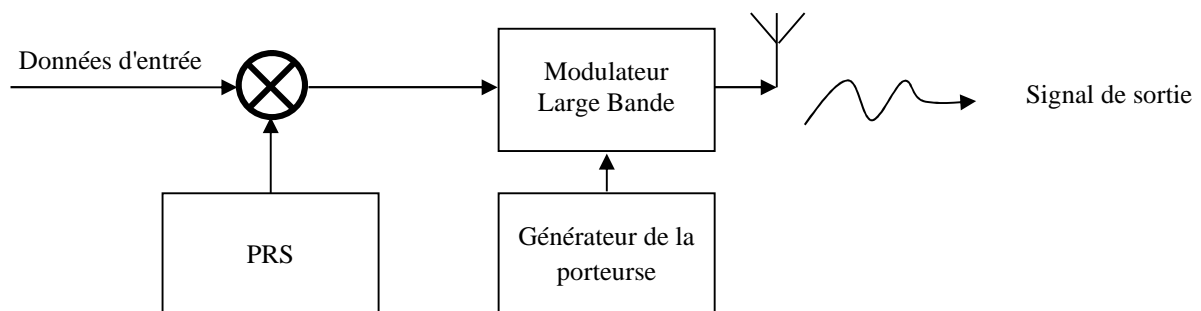


### III.1. Introduction

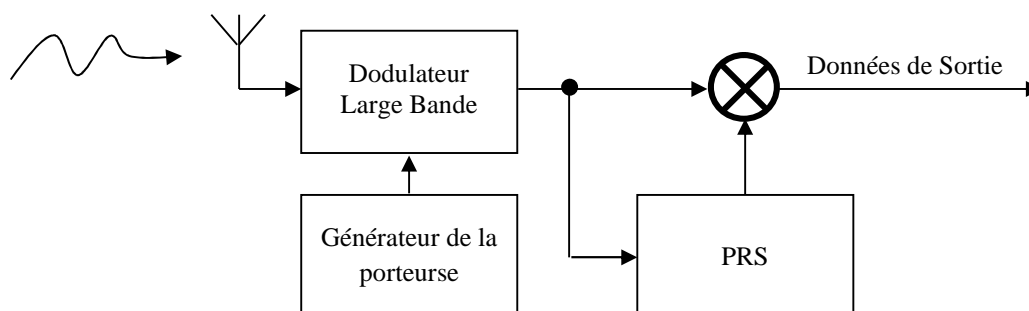
Nous présentons dans ce chapitre une étude comparative des trois techniques de transmission utilisées dans le contrôle des drones à savoir : FHSS, DSSS et OFDM. La comparaison a été faite par des simulations sous MATLAB pour différents conditions.

### III.2. Spectre étalé à séquence directe (DSSS)

La technique DSSS est la technique de modulation adoptée dans les produits sans fils basés sur le standard IEEE 802.11. Dans cette technique, les bits d'information sont modulés par des codes PN (en anglais : pseudo noise codes). Les codes PN sont des symboles de code pseudos-bruit. Ces codes PN ont une durée courte comparativement aux bits d'information. L'information transmise à travers l'aire occupe plus de bande passante comparativement aux bits d'information de l'utilisateur. Dans le système DSSS toute la bande passante est disponible pour un seul utilisateur tous le temps.



**Figure III.1.** Emetteur DSSS.

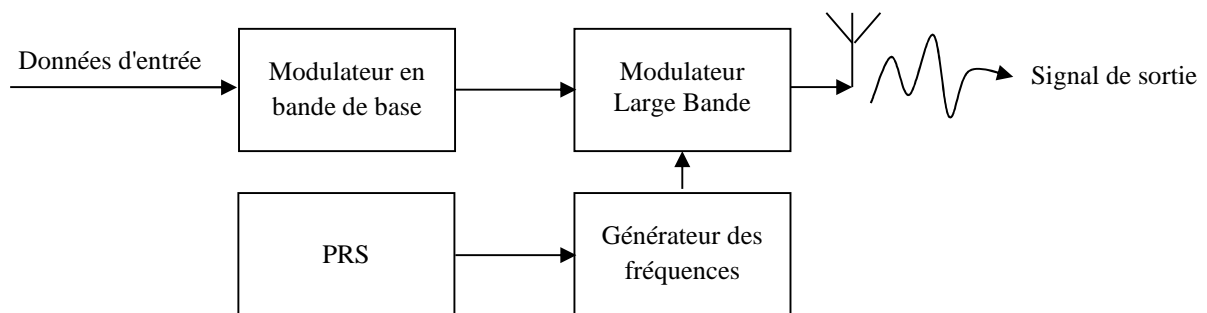


**Figure III.2.** Récepteur DSSS.

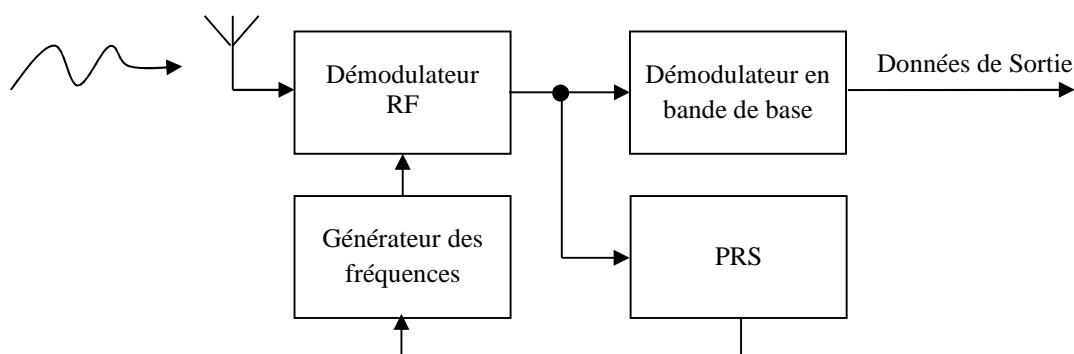
### III.3. Spectre à saut de fréquence (FHSS)

Dans le système FHSS (En anglais : Frequency Hopping Spread Spectrum) la fréquence porteuse RF est modifiée en fonction de la séquence pseudo-aléatoire (séquence PRS ou PN). Cette séquence PN est connue à la fois de l'émetteur et du récepteur et aide donc à démoduler/décoder les informations.

La figure III.3. montre le schéma block d'un émetteur FHSS.



**Figure III.3.** Schéma Bloch d'un émetteur Emetteur FHSS.



**Figure III.4.** Schéma Bloch d'un récepteur FHSS.

### III.4. La différence entre le DSSS et le FHSS

Étant donné que les systèmes FHSS reposent sur une fréquence porteuse RF variable, cela entraîne une nature en rafales d'erreurs dues à la nature des canaux de transmission à effet d'évanouissement sélectif en fréquence, à canal de Rayleigh et le canal ricien.

Dans le système DSSS, les bits d'information sont répartis sur les plans de fréquence et de temps, minimisant ainsi l'effet des interférences ainsi que l'évanouissement. Par conséquent, le système DSSS est sujet aux erreurs mais à un niveau bas par rapport aux systèmes FHSS.

Le système FHSS produit de fortes erreurs en rafale. Le système DSSS offre une capacité jusqu'à 11 Mbps tandis que FHSS prend en charge jusqu'à 3 Mbps. Le système DSSS est une technologie très sensible tandis que FHSS est une technologie très robuste. Ceci est observé dans un environnement difficile comprenant une large couverture, des bruits, des cellules colocalisées, des trajets multiples et la présence d'ondes de fréquence Bluetooth, etc. Le système DSSS est idéal pour les applications point à point tandis que FHSS peut être utilisé dans le déploiement point à multipoint avec d'excellentes performances.

### **III.5. Simulations**

#### **III.5.1. MATLAB [29]**

Le logiciel MATLAB est un logiciel de manipulation de données numériques et de programmation dont le champ d'application est essentiellement les sciences appliquées. Son objectif, par rapport aux autres langages, est de simplifier au maximum la transcription en langage informatique d'un problème mathématique, en utilisant une écriture la plus proche possible du langage naturel scientifique. Le logiciel fonctionne sous Windows et sous Linux. Son interface de manipulation HMI utilise les ressources usuelles du multi-fenêtrage. Son apprentissage n'exige que la connaissance de quelques principes de base à partir des quels l'utilisation des fonctions évoluées est très intuitive grâce à l'aide intégrée aux fonctions.

#### **III.5.2. SIMULINK [29]**

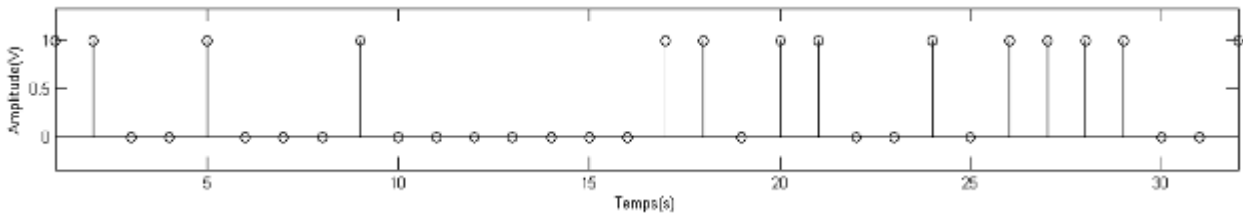
SIMULINK est une extension de MATLAB qui permet aux ingénieurs de construire des modèles dynamiques rapidement et avec une haute précision en utilisant les notations des diagrammes de bloc. En utilisant SIMULINK, il est facile de modéliser des systèmes complexes non linéaires. Un modèle SIMULINK peut inclure des composants des systèmes continus, hybrides et discrets, ce modèle peut produire des animations et des graphes qui montrent le progrès de la simulation.

#### **III.5.3. Simulation d'un system FHSS**

Dans cette section nous présentons la simulation d'un émetteur récepteur FHSS. Nous commençons tout d'abord par l'implémentation de l'émetteur.

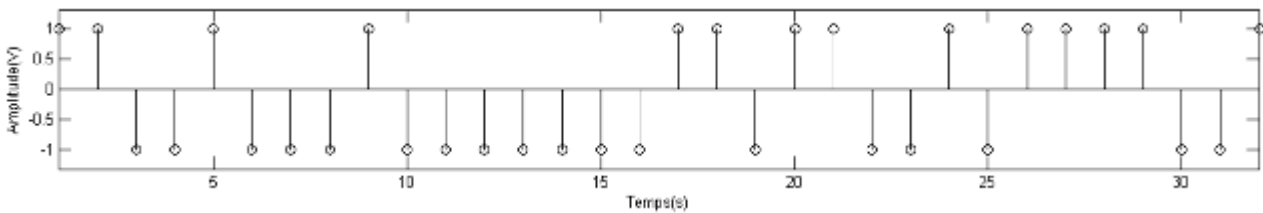
### III.5.3.1. Emetteur

Le signal d'entrée que nous avons utilisé est une séquence binaire aléatoire de longueur  $L = 32$  bits comme est montrée dans la figure III.5.



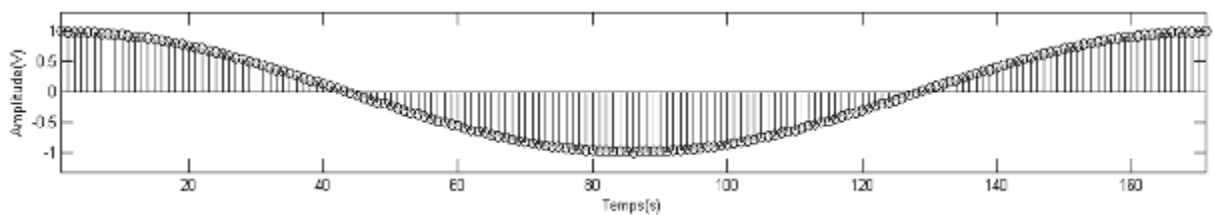
**Figure III.5.** Séquence Binaire aléatoire d'entrée.

La séquence binaire d'entrée est par la suite modulé e utilisant un modulateur BPSK comme est montrée dans la figure III.6.

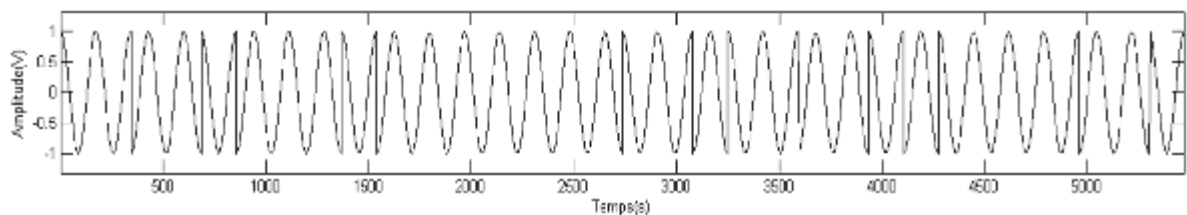


**Figure III.6.** Signal d'entrée modulé par le modulateur BPSK.

Montrée dans la figure III.7.

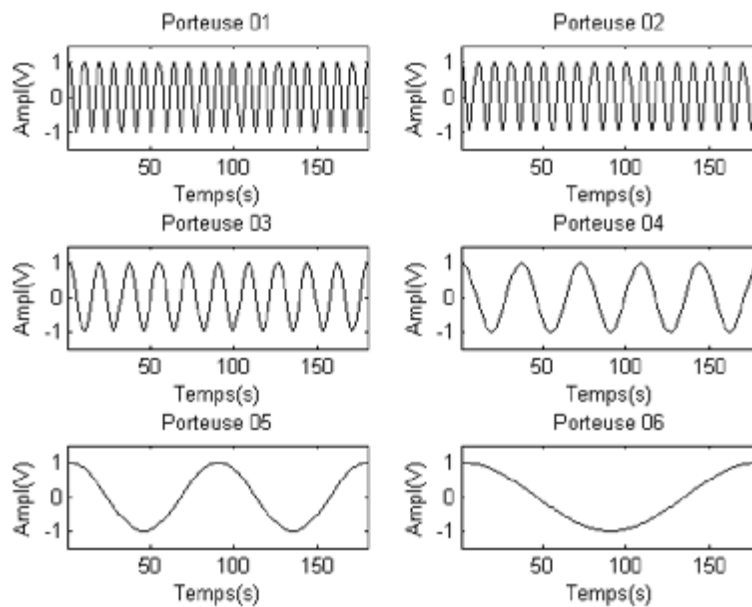


**Figure III.7.** Porteuse sinusoïdale.



**Figure III.8.** Signal modulé.

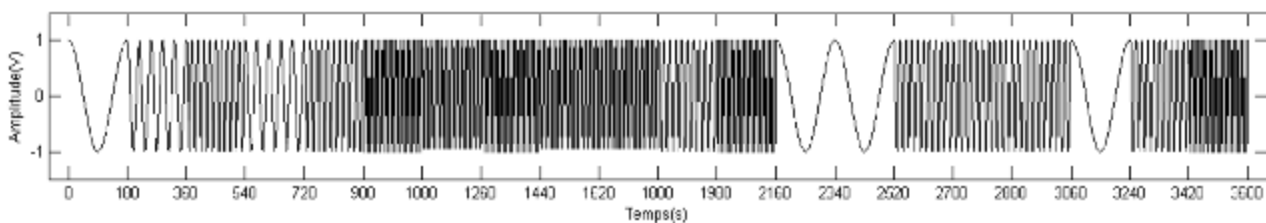
L'émetteur prépare les fréquences porteuses afin d'étaler le spectre du signal originale. Pour cela six porteuses de fréquences différentes sont générés par l'émetteur comme est montrée dans la figure III.9.



**Figure III.9.** Les six porteuses.

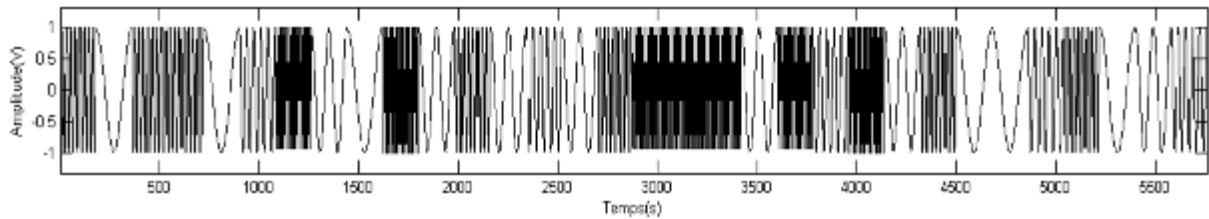
L'émetteur passe à l'étape du saut aléatoire de fréquence à partir du signal étalé, pour cela elle utilise à titre d'exemple la séquence aléatoire (PN code) suivante :

3	4	5	5	4	5	3	4	1	1	6	2	4	6	2	2	3	6	3	2
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---



**Figure III.10.** Code d'étalement avec 06 fréquences.

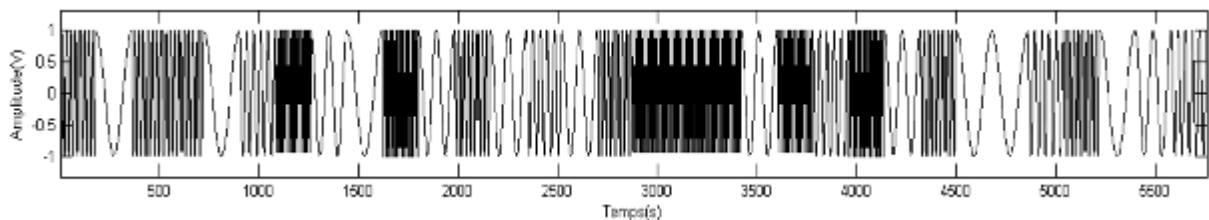
Le code d'étalement avec 06 fréquences qui sera utilisé dans l'étalement du signal modulé est montrée dans la figure III.10. Ce signal est utilisé dans l'étalement du signal modulé comme est montrée dans la figure III.11.



**Figure III.11.** Signal à spectre étalé à saut de fréquences (FHSS) émis.

Le signal présenté dans la figure III.11 qui est le signal à spectre étalé et à saut de fréquences et le signal de sortie de l'émetteur basé sur la technique FHSS.

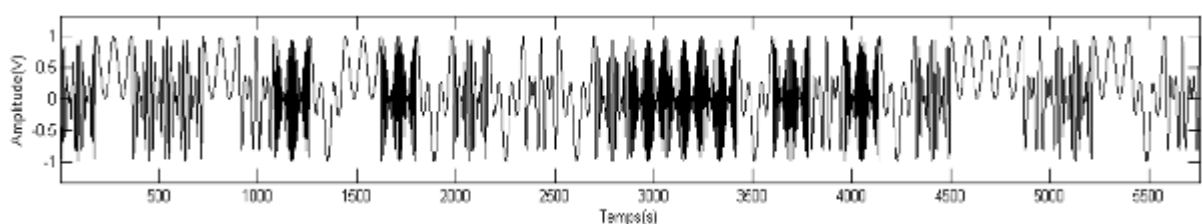
### III.5.3.2. Récepteur



**Figure III.12.** Signal à spectre étalé à saut de fréquences (FHSS) reçu.

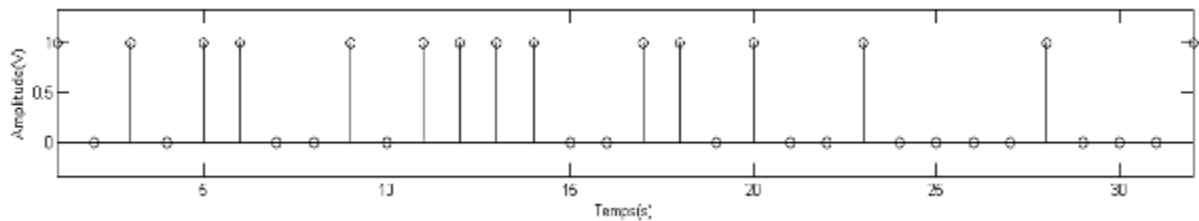
Dans cette section nous allons analyser les différentes étapes de réception d'un émetteur basé sur la technique FHSS. La figure III.12. montre le signal reçu qui est en principe similaire à celui émis. Ce signal passe par la suite par la phase de démodulation qui permet d'extraire l'information binaire.

En premier lieu, la démodulation permet d'extraire le signal BPSK modulé comme le montre la figure III.13.



**Figure III.13.** Signal à spectre étalé à saut de fréquences (FHSS) reçu.

Par la suite la démodulation passe à l'étape de l'extraction de l'information binaire émise et qui présente l'information émise comme le montre la figure III.14.



**Figure III.14.** Signal à spectre étalé à saut de fréquences (FHSS) reçu.

### III.5.4. Simulation d'un system DSSS

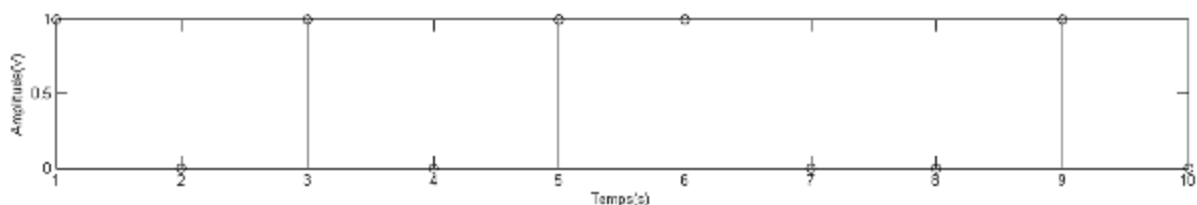
Dans cette section nous allons simulé un émetteur récepteur basé sur la technique du spectre étalé à séquence directe (DSSS). Nous commençons par l'émetteur.

#### III.5.4.1. Emetteur

Dans cette sous-section nous allons décrire les différentes étapes de modulation du signal d'entrée.

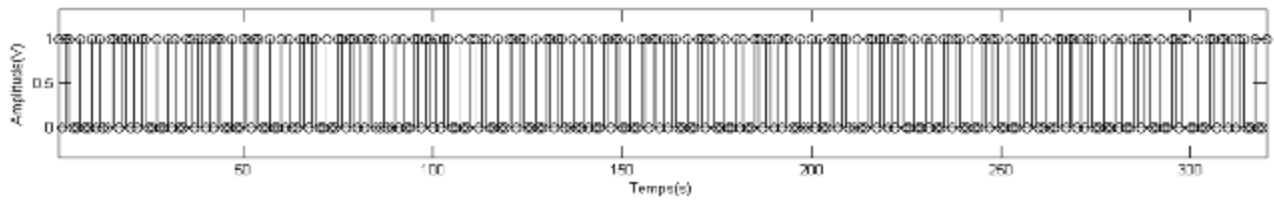
La séquence binaire d'entrée est similaire à celle utilisé dans la simulation de l'émetteur FHSSS, elle est présenté dans la figure III.5. Le but d'utilisé la même séquence binaires d'entrée est la comparaison, par la suite, des performances des différents systèmes sous les mêmes conditions

La séquence binaire d'entrée est codé en utilisant un code pseudo aléatoire (PN\_code) montrée dans la figure III.15.



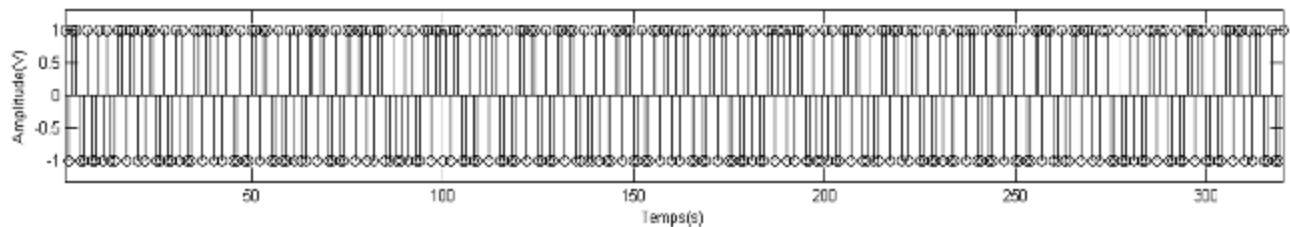
**Figure III.15.** Code pseudo aléatoire utilisé dans le codage de la séquence d'entrée.

Le signal codé résultant est montrée dans la figure III.16.



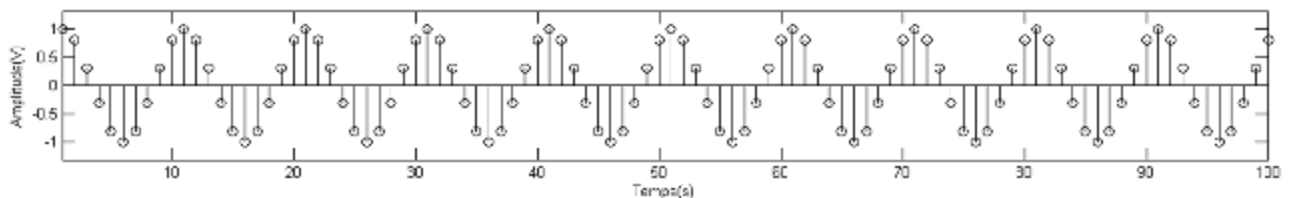
**Figure III.16.** séquence binaire codée par le code PN.

Le signal codé résultant est modulé par la suite en utilisant un modulateur BPSK, le signal BPSK résultant est montré dans la figure III.17.



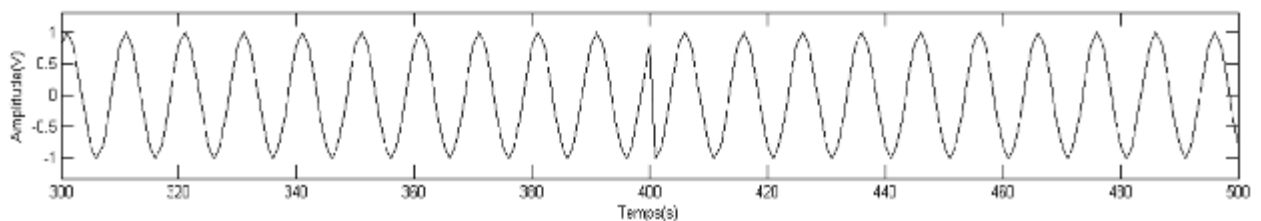
**Figure III.17.** séquence binaire codée par le code PN et modulé par le modulateur BPSK.

Le signal résultant de la modulation BPSK est modulé par la porteuse sinusoïdale montrée dans la figure III.18.



**Figure III.18.** Signal porteuse.

Une portion du signal à la sortie du modulateur, qui est le signal DSSS, est montrée dans la figure III.19.



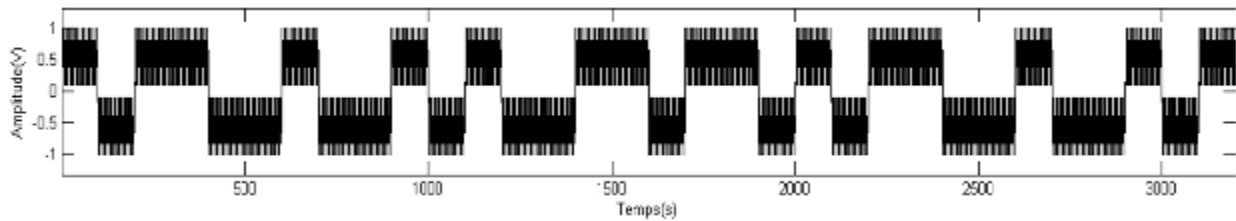
**Figure III.19.** Portion du signal DSSS de sortie.

### III.5.4.2. Récepteur

Dans cette section nous allons décrire les différentes étapes par lesquels passe le signal DSSS reçu.

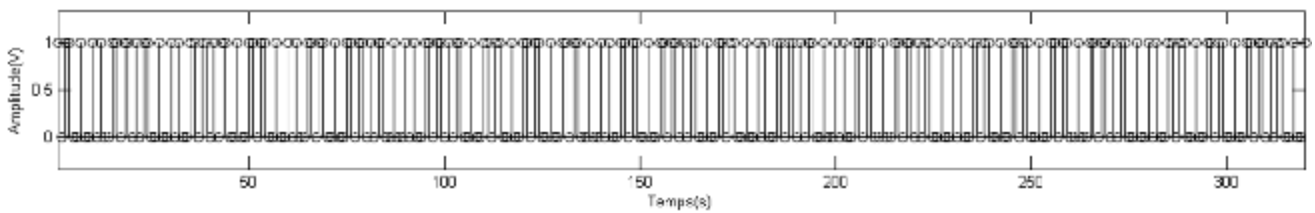
Le signal DSSS reçu est le même que celui émis, montré dans la figure III.19.

Afin de démodulé le signal DSSS reçu, ce dernier est multiplié par la porteuse. Le signal résultant est montré dans la figure III.20.

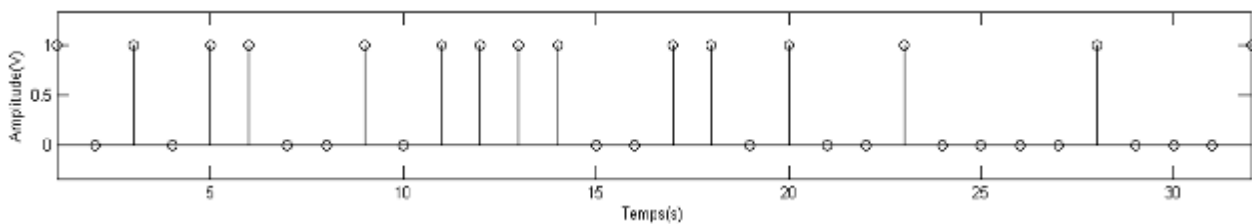


**Figure III.20.** Signal DSSS multiplié par la porteuse.

Le signal montré dans la figure III.20 est par la suite converti en forme binaire, comme est montrée dans la figure III.21.



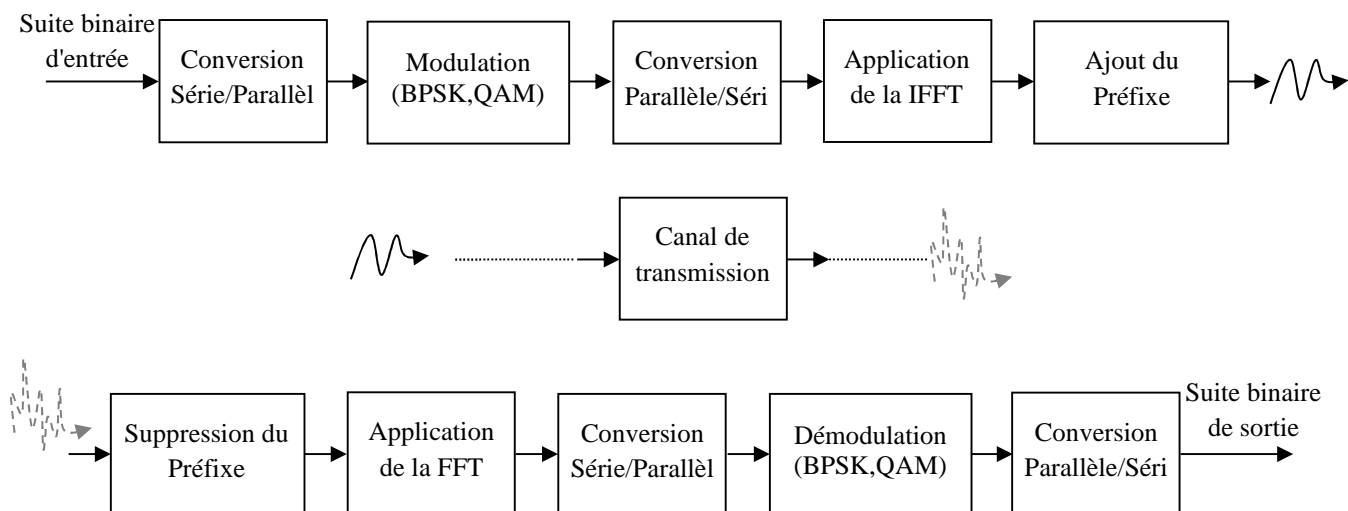
**Figure III.21.** Signal DSSS converti en binaire.



**Figure III.22.** Séquence binaire reçue.

### III.5.5. Simulation d'un system OFDM

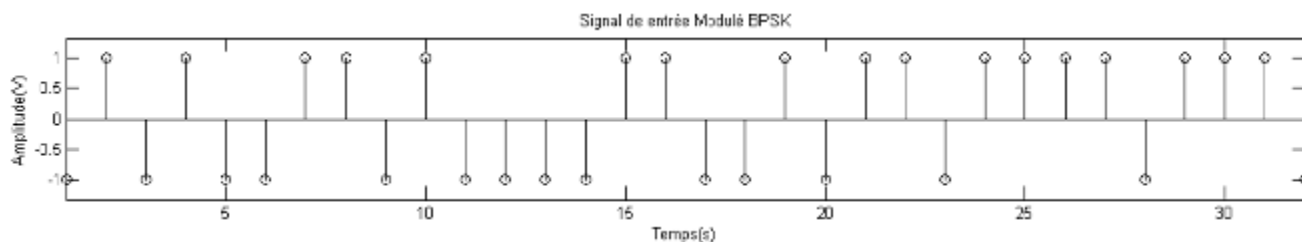
Dans cette section nous allons simulé un système OFDM. Le signal d'entrée est une séquence binaire similaire à celle utilisé pour le FHSS et le DSSS.



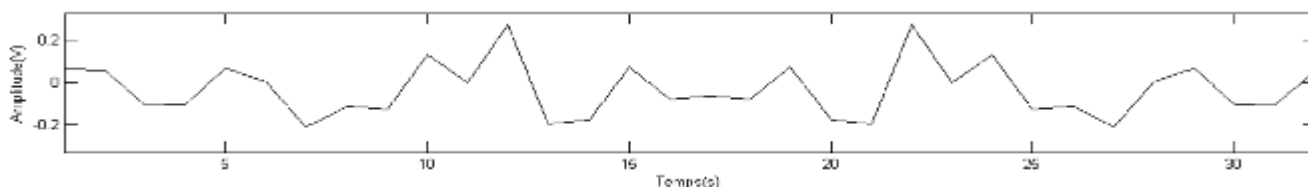
**Figure III.23.** Schéma block d'un émetteur récepteur

#### III.5.5.1. Emetteur

La séquence binaire d'entrée est modulée en utilisant un modulateur BPSK comme est montrée dans la figure III.24.

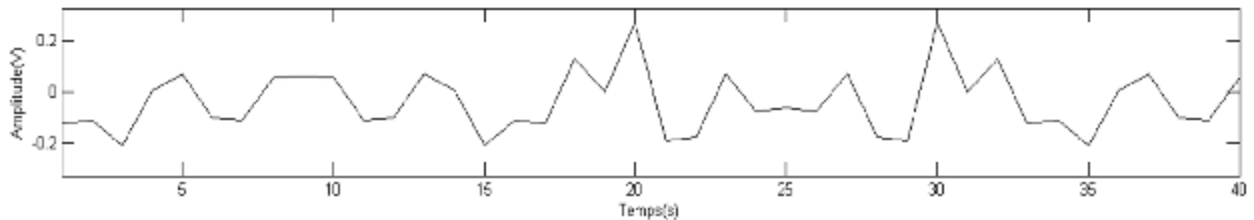


**Figure III.24.** Signal d'entrée modulé en utilisant un modulateur BPSK. complexe, ça partie réelle est montrée dans la figure III.25.



**Figure III.25.** Signal OFDM de sortie.

Le signal OFDM de sortie passe par l'étape d'ajout d'un préfixe cyclique avant d'être transmis dans le canal de transmission. Le préfixe cyclique correspond à une portion du signal OFDM de longueur CP échantillons de fins de ce dernier.



**Figure III.26.** Signal OFDM de sortie.

Le signal OFDM de la figure III.26. est transmis par la suite à travers le canal de transmission. Dans ce travail nous ignorons l'effet du canal sur le signal transmis. En d'autres termes, le signal OFDM reçu est similaire à celui émis.

### III.5.5.2. Récepteur

Le signal OFDM reçu correspond à celui de la figure III.26. Au niveau du récepteur le signal OFDM reçu passe par l'étape de la suppression du préfixe cyclique. Le signal OFDM résultant correspond bien à celui montré dans la figure III.25.

Par la suite le signal OFDM est transformé au domaine transformé par l'utilisation de la transformée de Fourier discrète (FFT), puis démodulé en utilisant un démodulateur BPSK pour obtenir à la fin la séquence binaire reçue qui correspond, dans notre cas, à celle émise.

## III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé sous MATLAB les techniques de transmission utilisées dans le contrôle des drones à savoir l'OFDM, la FHSS et le DSSS. D'après les simulations que nous avons effectuées, les trois techniques sont caractérisées par leur implémentation simple et leur robustesse. Ces trois techniques permettent une protection efficace des signaux de contrôle contre les interférences, et cela est dû au fait que ces techniques de transmission permettent l'étalement du spectre ce qui rend le signal émis similaire à un bruit et difficile à intercepter.



# Conclusion Générale



## Conclusion générale:

---

Dans ce mémoire, nous avons présenté une étude et une analyse théorique et expérimentale des performances des techniques de transmission utilisées dans le contrôle des drones, à savoir: l'OFDM, le FHSS et le DSSS ainsi leurs implémentation dans les communications destinées au contrôle des drones

Nous avons présenté une introduction aux drones où on a présenté des généralités sur les drones, les différents types et les classifications des drones. Nous avons vue que les drones est un domaine très vaste se base sur la discipline de la robotique, s'évolue rapidement et les différentes catégories des drones existantes prouve cette énorme évolution.

Les techniques de transmission utilisés dans le contrôle des drones à savoir: l'OFDM, le FHSS et le DSSS ont été présentées. Ils permettent une communication fiable et robuste et protègent l'information transmise contre les interférences. Le principe de fonctionnements ainsi que les détailles techniques ont été décrites.

Nous avons implémenté et simulé sous MATLAB les différentes techniques de transmission. Les simulations que nous avons effectuées, prouvent que les trois technique sont caractérisé par leurs implémentation simples et leurs robustesse. Ces trois technique permettent une protection efficace des signaux de contrôle contre les interférences, et cela est due au faite que ces techniques de transmission permettent l'étalement du spectre ce qui rend le signal émis similaire à un bruit et difficile à intercepté.



# Bibliographie



## Bibliographie:

---

- [1] A.ELMAHARAT, R. LAKHDARI ‘Conception et réalisation d’un mini drone’. Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj.
- [2] <https://wikimemoires.net/2021/02/drones-historique-differentes-categories/>. Consulté le 28 avril 2021.
- [3] A. R. Jha, ‘Theory, Design, and Applications of Unmanned Aerial Vehicles’. Taylor & Francis group (CRC Press). 2017.
- [4] C. Sedini, N. Cherigui, ‘Conception et commande d’un quadrotor UAV à base d’Arduino’, Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2019.
- [5] A.CHRIETTE. DRMMC : Drones autonomes : Définition et Classification. Ecole Centrale de Nantes à Département Auto à Robot, 2012.
- [6] <https://htpratique.com/types-drones/>.Consulté le 2 mai 2021.
- [7] A. KHLEDJ, O.BOUGAR, ‘Etude et réalisation d’un drone de type quadrotor’, Mémoire de master, Université Khemis Miliana, 2017.
- [8] Direction Cosine Matrix I MU: Theory. William Premerlani and Paul Bizard. Mai2009flying”
- [9] N. Guenard, T. Hamel, and V. Moreau “ modélisation et élaboration de commande de stabilisation de vitesse et de correction d’assiette pour un drone” CIFA, 2004
- [10] N. RACHEDI, “ Commande hybrid avec observation d’un UAV de type Quadrotor ”, mémoire de magistère, EMP Bordj EL-Bahri, algerie, Janvier 2011
- [11] <https://www.extendingbroadband.com>.
- [12] H. Singh and S. Bansal, “Channel estimation with ISFLA based pilot pattern optimization for MIMO OFDM syCFstem”, AEU-Int. J. Electron.Commun., vol. 81, Jul. 2017, pp. 143–149, doi:10.1016/j.aeue.2017.07.024.
- [13] P. Pattanayak and P. Kumar, “Quantized feedback scheduling for MIMO-OFDM broadcast networks with subcarrier clustering”, Ad Hoc Netw., vol. 65, Oct. 2017, pp. 26–37, doi:10.1016/j.adhoc.2017.07.007.
- [14] Wireless Communications and Networking for Unmanned Aerial Vehicles R. Jain and F. Templin, “Requirements, challenges and analysis of alternatives for wireless data links for unmanned aircraft systems,” Cambridge University Press 2020. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 30, no. 5, pp. 852–860, June 2012.
- [15] R. G. Gallager, Principles of Digital Communication. Cambridge University Press, 2008vol. 1.
- [16] U. Madhow, Fundamentals of Digital Communication. Cambridge University Press2008.

## Bibliographie:

---

- [17] M. Marcus, "Spectrum policy challenges of UAV/drones [spectrum policy and regulatory issues]," *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 5, pp. 8–9, October 2014.
- [18] National Telecommunications and Information Administration, "Aws-3 transition," Tech. Rep.
- [19] Z. Wu, H. Kumar, and A. Davie, "Performance evaluation of OFDM transmission in UAV wireless communication," in *Proceedings of the Thirty-Seventh Southeastern Symposium on System Theory*, March 2005, pp. 6–10.
- [20] J. Kadar and V. Marojevic, "Waveform and spectrum management for unmanned aerial systems beyond 2025," in *Proceedings of IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications*, October 2017, pp. 1–5.
- [21] C. Bluemm, C. Heller, B. Fourestie, and R. Weigel, "Air-to-ground channel characterization for OFDM communication in C-band," in *International Conference on Signal Processing and Communication Systems*, December 2013, pp. 1–8.
- [22] Y. Rahmatallah and S. Mohan, "Peak-to-average power ratio reduction in OFDM systems: A survey and taxonomy," *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 15, no. 4, pp.1567–1592, Fourth quarter 2013.
- [23] A. Giorgetti, M. Lucchi, M. Chiani, and M. Z. Win, "Throughput per pass for data aggregation from a wireless sensor network via a UAV," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 47, no. 4, pp. 2610–2626, October 2011.
- [24] J. Li, Y. Zhou, L. Lamont, and M. Déziel, "A token circulation scheme for code assignment and cooperative transmission scheduling in CDMA-based UAV ad hoc networks," *Wireless Networks*, vol. 19, no. 6, pp. 1469–1484, August 2013.
- [25] M. Edrich and R. Schmalenberger, "Combined DSSS/FHSS approach to interference rejection and navigation support in UAV communications and control," in *IEEE Seventh International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, vol.3, September 2002, pp. 687–691.
- [26] S. J. Maeng, H.-i. Park, and Y. S. Cho, "Preamble design technique for GMSK-based beamforming system with multiple unmanned aircraft vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 8, pp. 7098–7113, August 2017.
- [27] D. Darlene, G. Gelid, I. Iodic, and F. Verde, "Equalization techniques of control and non-payload communication links for unmanned aerial vehicles," *IEEE Access*, vol.6, pp.4485–4496, 2018.
- [28] D. Jagadeesh. 'Simulation of wireless communication system using OFDM principle', Master thesis, department of electronics and communication engineering national institute of technology Rourkela. 2006.
- [29] P. Bonnet, *Outils de simulation*. Université Lille 1, 2010.