

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Projet de fin d'études

Filière Télécommunications

Spécialité Réseaux et Télécommunications

Présenté par

ARRACHE SOUAD
BOUREBAA NADJET

Sécurisation des transmissions des drones face aux interférences par la technique d'étalement du spectre FHSS

Proposé par :

Dr. Anou Abderrahmane

Année Universitaire 2023-2024

Dédicace

À ma mère Leila

Pour ton amour infini, ton soutien inconditionnel et tes encouragements constants qui m'ont permis de poursuivre mes rêves et d'atteindre ce jour, je réalise que cette réussite n'aurait pas été possible sans toi. Je t'aime plus que des mots ne peuvent le dire.

À mon cher fiancé

Pour ta patience infinie, ta compréhension sans faille et ton encouragement. Ta présence dans ma vie est un cadeau précieux qui m'inspire à donner le meilleur de moi-même.

À ma famille

Ma grand-mère Malika et à mes chères tantes, merci pour votre soutien inébranlable, vos sacrifices et votre compréhension tout au long de ce chemin académique. Votre présence a été ma force.

À mes proches

Romaïssa, Ferial, Fatouma, Maroua et Madina votre présence constante, votre soutien inébranlable et les moments de bonheur partagés ont été essentiels pour surmonter les défis et apprécier les réussites.

À cher binôme

Souad merci pour notre collaboration exceptionnelle. Ta détermination, ton dévouement et ton soutien. Ce mémoire est le résultat de notre travail d'équipe. Merci d'avoir été un partenaire exemplaire et de m'avoir inspiré.

Nadjet

Dédicace

*À l'âme de mon père **Hacene**, bien qu'il ne soit plus parmi nous, j'espère qu'il voit ce travail comme un geste de reconnaissance de la part de sa fille, qui prie toujours pour le salut de son âme. Puisse Dieu, le Tout-Puissant, l'accueillir en sa sainte miséricorde.*

*À ma chère mère **Nadia**, aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour et mon appréciation pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien-être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour, et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.*

*À mes chères sœurs **Ibtissem, Samia, Soulef et Sana**, votre amour, votre soutien et votre présence ont été des piliers essentiels dans ma vie. Que notre lien reste fort et que vos vies soient remplies de bonheur et de succès.*

*Au sucre du prestige et du charisme, mon cher neveu **Louay**.*

*A ma chère compagne à quatre pattes **BIBI**.*

*À mes chères amies **Azzedine, Sara, Rania et Fedoua** votre soutien, votre amitié et vos encouragements ont été indispensables tout au long de ce parcours. Merci pour les moments de joie, de partage et de réconfort que nous avons vécus ensemble. Vous avez embelli ma vie par votre présence et votre affection. Je vous dédie ce travail avec toute ma gratitude et mon amour.*

*À ma chère binôme **Nadjet**, ta collaboration, ton soutien et ton amitié ont été essentiels tout au long de ce parcours. Merci pour les moments de travail partagé, les encouragements et les rires. Tu as rendu cette aventure plus agréable et enrichissante. Je te dédie ce travail avec toute ma reconnaissance et mon affection.*

Souad

Remerciements

Nous tenons à remercier le Bon Dieu, le Tout-Puissant, de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Tout d'abord, nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à notre directeur de mémoire, Dr. ANOU Abderrahmane, pour son encadrement, sa patience et sa confiance tout au long de ce travail de recherche. Ses précieux conseils, son expertise et son soutien inébranlable ont grandement contribué à l'aboutissement de ce projet.

Nous tenons à adresser des remerciements particuliers à Mr. Zabel Abdelghani, pour son encadrement et ses conseils avisés tout au long de notre stage. Son soutien a été précieux pour la réalisation de ce mémoire.

Merci aussi aux membres du jury de notre soutenance de mémoire pour leurs remarques et suggestions précieuses qui ont amélioré la qualité de ce travail.

Nous remercions également l'ensemble des professeurs et le chef du département Mr. Ait Saadi Houcine de l'Université Saad Dahleb pour leur enseignement de qualité et les connaissances qu'ils nous ont transmises durant nos années d'études. Leur passion pour la recherche nous a inspirés à poursuivre nos propres questionnements scientifiques.

Un merci spécial à nos camarades de classe et amis, pour leurs encouragements, leurs échanges intellectuels stimulants, et pour tous les moments partagés.

Enfin, nous tenons à remercier nos familles pour leur soutien indéfectible et pour avoir toujours cru en nous. Leurs encouragements ont été notre motivation tout au long de ce parcours académique.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Que ce soit à travers des discussions enrichissantes, des conseils ou simplement par leur présence, leur contribution a été précieuse.

ملخص: الطائرات بدون طيار أصبحت أساسية في مختلف القطاعات بفضل قدرتها على الوصول إلى المناطق غير المستقرة وأداء المهام الخطيرة دون تعريض حياة البشر للخطر. ومع ذلك، تواجه هذه الانتشار تحديات كبيرة، خاصة فيما يتعلق بأمن النقل. أمن الاتصالات حاسم لكل من التطبيقات العسكرية والمدنية. يمكن أن تؤثر التداخلات في النقل، مما يؤدي إلى فقدان السيطرة والحوادث. لتأمين اتصالات الطائرات بدون طيار ضد التداخلات، يُستخدم تقنية انتشار طيف التردد بالقفزات تغير هذه الطريقة تردد النقل وفقاً لتسلسل شبه عشوائي. تعزز المقاومة من خلال توزيع الإشارة عبر نطاق واسع من الترددات، مما يجعل من الصعب على جهاز التشويش إحداث تداخل فعال

كلمات المفاتيح: طائرات بدون طيار، أمن، نقل، تداخلات

Résumé : Les drones (UAV), sont devenus essentiels dans divers secteurs grâce à leur capacité à accéder à des zones inaccessibles et à effectuer des tâches dangereuses sans risquer de vies humaines. Cependant, cette prolifération pose des défis importants, notamment en matière de sécurité des transmissions. La sécurité des communications est cruciale, pour les applications militaires et civiles. Les interférences peuvent compromettre les transmissions, entraînant des pertes de contrôle et des accidents. Pour sécuriser les communications des drones face aux interférences, la technique d'étalement de spectre par saut de fréquence est utilisée. Cette méthode fait varier la fréquence de transmission selon une séquence pseudo-aléatoire. Le FHSS améliore la résistance en répartissant le signal sur une large bande de fréquences, rendant plus difficile la perturbation efficace par un brouilleur.

Mots clés : Drones, FHSS, sécurisations, transmissions, interférences.

Abstract: Drones (UAV) have become essential in various sectors due to their ability to access inaccessible areas and perform dangerous tasks without risking human lives. However, this proliferation presents significant challenges, particularly concerning transmission security. Communication security is crucial for both military and civilian applications. Interferences can compromise transmissions, leading to loss of control and accidents. To secure drone communications against interferences, frequency-hopping spread spectrum technique is used. This method varies the transmission frequency according to a pseudo-random sequence. FHSS enhances resistance by spreading the signal over a wide frequency band, making it more difficult for an unauthorized signal disruptor to effectively interfere.

Keywords: Drones, FHSS, security, transmissions, interference.

Listes des acronymes et abréviations :

AWGN : Additive White Gaussian Noise
BBAG : Bruit Blanc Additif Gaussien
BER : Bit Error Rate
BPSK : Binary Phase Shift Keying
CAN : Communication Analogique/Numérique
CCW : counter Clockwise
CNA : Communication Numérique/Analogique
CW : Clockwise
DDS : Direct Digital Synthesis
DFS : Direct Frequency Synthesizer
DSP : Digital Signal Processing
DSSS : Direct Sequence Spread Spectrum
ESC : Electronic Speed Controller
EUROUVS : European Unmanned Vehicle systems
FDM : Frequency Division Multiplexing
FH : Frequency hopping
FHSS : Frequency-hopping spread spectrum
FPV : First Person View
FSK : phase-shift keying
GCS : Ground Control Station
GPS : Global Positioning system
ICE : Internal Combustion Engine
IFS : Indirect Frequency Synthesizer
IMU : Inertial Measurement Unit
IP : Internet Protocol
LIPO : Lithium Polymère
LOS : line-of-sight
LSFR : Linear Feedback Shift Regis
MAVLink : Micro Air Link
NLOS : Non-line-of-sight
PLL : Phase-Locked Loop
PN : pseudo-noise
PRNGs : Pseudo-Random Number Generators
PSK : Frequency-Shift Keying
PSK : Phase Shift Keying
QAM : Quadrature Amplitude Modulation
QPSK : Quadrature Phase Shift Keying
RC : Radiocommande
RX : Receive

SNR : signal-to-noise ratio
TCP : Transmission Control Protocol
THSS : Time-Hopping Spread Spectrum
TOF : Time of Flight
TX : Transmitter
UAV : Unmanned Aerial Vehicles
UDP : User Datagram Protocol
UVS : Unmanned Vehicle systems
VCO : Voltage-Controlled Oscillator
VRX : Video Receiver
VTOL : Vertical Take-off and Landing
VTX : Video Transmitter
XOR : eXclusive OR

Table des matières

Introduction Générale.....	1
Chapitre 1 Généralités sur les drones	4
1.1 Introduction.....	4
1.2 Définition des drones	4
1.3 Types de drone	5
1.4 Classification des drones	7
1.5 Domaines d'utilisation des drones	8
1.6 Composant d'un drone.....	11
1.7 Types du pilotage	17
1.8 Mouvement de drone	17
1.9 Communication et Transmission de Données des Drones.....	19
1.10 Eléments de la communication des drones	22
1.11 Protocol de communication des drones.....	23
1.12 Impact des interférences sur la transmission des drones.....	27
1.13 Conclusion.....	28
Chapitre 2 Technique d'étalement de spectre FHSS	29
2.1 Introduction.....	29
2.2 Chaîne de transmission des données.....	29

2.3	Étalement de spectre	39
2.4	Techniques d'étalement de spectre.....	40
2.5	Évaluation des techniques d'étalement de spectre.....	42
2.6	Étalement de spectre par sauts de fréquence (FHSS).....	44
2.7	Techniques de Partage de la Bande Passante (FDM vs FHSS).....	45
2.8	Architecture de la technique d'étalement de spectre FHSS.....	45
2.9	Techniques de modulation de FHSS	48
2.10	Génération des Codes FHSS.....	50
2.11	Synthétiseur de fréquence dans le FHSS.....	53
2.12	Synchronisation.....	56
2.13	Principe de fonctionnement de FHSS.....	58
2.14	Types de la technique d'étalement du spectre FHSS.....	59
2.15	Avantages et Inconvénients du FHSS.....	61
2.16	Conclusion.....	61
Chapitre 3 Simulation et Résultats		63
3.1	Introduction.....	63
3.2	Génération du signal de base.....	66
3.3	Modulation du signal.....	69
3.4	Mise en œuvre du saut de fréquence.....	74

3.5	La transmission dans le canal.....	79
3.6	Réception et démodulation.....	83
3.7	Analyses des résultats.....	90
3.8	Conclusion.....	91
	Conclusion générale.....	92
	Bibliographie.....	94

Liste des figures :

Chapitre 01

Figure 1- 1 : Les catégories des drones.....	5
Figure 1- 2 : Drone a voile fixe.....	5
Figure 1- 3 : Drone à voile tournante.....	6
Figure 1- 4 : Drone hélicoptère.....	6
Figure 1- 5 : Drone hybrides].....	7
Figure 1- 6 : Drone militaires.....	8
Figure 1- 7 : Drone de surveillance.....	9
Figure 1- 8 : Drone de livraison.....	9
Figure 1- 9 : Drone agricole.....	10
Figure 1- 10 : Vue aérienne pour l'analyse topographique.....	10
Figure 1- 11 : Drone d'urgence.....	11
Figure 1- 12 : Structure de drone multi-rotors.....	12
Figure 1- 13 : Structure de drone a voile fixe.....	12
Figure 1- 14 : Moteur brushless.....	12
Figure 1- 15 : Les moteurs à combustion interne.....	13
Figure 1- 16 : contrôleur de vitesse.....	13
Figure 1- 17 : Les hélices.....	14
Figure 1- 18 : Les batteries.....	14
Figure 1- 19 : La radiocommande.....	15
Figure 1- 20 : Récepteur Radio.....	15
Figure 1- 21 : Contrôleur de vol.....	16
Figure 1- 22 : GPS.....	16
Figure 1- 23 : Altimètre.....	16
Figure 1- 24 : Indicateur de vitesse.....	17
Figure 1- 25 : Les camera de drone.....	17

Figure 1- 26 : Mouvement vertical.....	18
Figure 1- 27 : Mouvement de lacet.	18
Figure 1- 28 : Mouvement de tangages.....	19
Figure 1- 29 : Mouvement de roulis.	19
Figure 1- 30 : Les types de communication du drone.....	20
Figure 1- 31 : Système de données de contrôle	21
Figure 1- 32 : Système de données de vidéo	21
Figure 1- 33 : Trame du protocole MAVLink.....	24
Figure 1- 34 : En-tête TCP.....	25
Figure 1- 35 : En-tête UDP.....	27

Chapitre 02

Figure 2- 1 : Schéma d'un système de transmission numérique.....	30
Figure 2- 2 : Échantillonnage et Quantification.....	31
Figure 2- 3: Canal de Transmission.	32
Figure 2- 4 : Représentation temporelle d'un bruit gaussien et distribution statistique de son amplitude.	33
Figure 2- 5: Canal à bruit AWGN.....	34
Figure 2- 6: Propagation par trajets multiples.	34
Figure 2- 7: Propagation multi-trajet NLOS_ LOS.	35
Figure 2- 8: Canal de Rayleigh.	36
Figure 2- 9: Schéma du l'effet doppler.....	37
Figure 2- 10 : Paramètres de l'effet Doppler.....	38
Figure 2- 11: Taux d'erreur binaire en fonction du rapport signal à bruit.....	39
Figure 2- 12 : Principe d'étalement de spectre.	40
Figure 2- 13 : Etalement de spectre par séquence directe DSSS.	41
Figure 2- 14 : Etalement de spectre avec saut en temps.	41
Figure 2- 15: Principe de l'étalement de spectre par saut de fréquence.....	42

Figure 2- 16: Principe de sauts de fréquence.	44
Figure 2- 17: FDM vs FHSS.	45
Figure 2- 18 : Diagramme de la technique d'étalement de spectre FHSS.....	46
Figure 2- 19 : Architecture de l'émetteur.....	46
Figure 2- 20: Architecture du récepteur FHSS.....	47
Figure 2- 21: Schéma bloc d'un modulateur.	48
Figure 2- 22 : Modulation B-PSK.....	49
Figure 2- 23: Modulation Q-PSK.....	50
Figure 2- 24: Algorithme de PRNG.	51
Figure 2- 25: PRNG avec un registre a décalage.....	52
Figure 2- 26: Principe de fonctionnement d'un registre à décalage LSFR.....	52
Figure 2- 27: Synthétiseur de fréquence direct (DFS).	55
Figure 2- 28: Synthétiseur de fréquence indirect (IFS).....	56
Figure 2- 29: le processus de corrélation coulissante.....	57
Figure 2- 30 : Illustration de la boucle de suivi Split-Bit.....	58
Figure 2- 31: Fonctionnement des Générateurs Pseudo-Aléatoires.....	59
Figure 2- 32: Fonctionnement de sauts de fréquences.	59
Figure 2- 33: Fonctionnement de FHSS lent.	60
Figure 2- 35: Fonctionnement de FHSS rapide.....	61

Chapitre 03

Figure 3- 1 : Matériel utiliser.	66
Figure 3- 2 : Différentes valeurs des commandes de vol.	66
Figure 3- 3 : Valeurs des commandes de vol utiliser.....	67
Figure 3- 4 : Conversion en binaire.....	67
Figure 3- 5 : Représentation Temporelle et Fréquentielle des signaux des commandes.	67
Figure 3- 6 : Image transmis.	68

Figure 3- 7 : Pixels de l'image et leur forme binaire.....	68
Figure 3- 8 : Représentation Temporelle et Fréquentielle de l'Image.....	69
Figure 3- 9 : Représentation des données en NRZ.....	70
Figure 3- 10 : Représentation des bits de l'image en NRZ.	70
Figure 3- 11 : Représentation des paires de NRZ	71
Figure 3- 12 : Modulation QPSK de la commande Roll.	71
Figure 3- 13 : Modulation QPSK de la commande pitch.....	72
Figure 3- 14 : Modulation QPSK de la commande throttle.....	72
Figure 3- 15 : Modulation QPSK de la commande Yaw.....	72
Figure 3- 16 : Modulation QPSK de l'image.....	72
Figure 3- 17 : Modulation QPSK de roll dans le domaine fréquentiel.....	73
Figure 3- 18 : Modulation QPSK de pitch dans le domaine fréquentiel.	73
Figure 3- 19 : Modulation QPSK de throttle dans le domaine fréquentiel.	73
Figure 3- 20 : Modulation QPSK de yaw dans le domaine fréquentiel.....	73
Figure 3- 21 : Modulation QPSK de l'image dans le domaine fréquentiel.....	73
Figure 3- 22 : Le cas de type FHSS lent.	74
Figure 3- 23 : Signal d'étalement lent pour les commandes.....	75
Figure 3- 24 : Signal d'étalement lent pour l'image.....	75
Figure 3- 25 : Signal étalé lent de la commande Roll.	75
Figure 3- 26 : Signal étalé lent de la commande Pitch.	76
Figure 3- 27 : Signal étalé lent de la commande Throttle.	76
Figure 3- 28: Signal étalé lent de la commande Yaw.....	76
Figure 3- 29 : Signal étale lent de l'image.....	76
Figure 3- 30: Le cas de type FHSS rapide.	77
Figure 3- 31: Signal d'étalement rapide pour les commandes.....	77
Figure 3- 32 : Signal d'étalement rapide pour image.	77
Figure 3- 33 : Signal étalé rapide de la commande Roll.	78

Figure 3- 34: Signal étalé rapide de la commande Pitch.....	78
Figure 3- 35 : Signal étalé rapide de la commande Throttle.....	78
Figure 3- 36 : Signal étalé rapide de la commande Yaw.....	78
Figure 3- 37: Signal étalé rapide d'image.....	79
Figure 3- 38 : Établissement de la connexion TCP/IP entre l'émetteur et le récepteur.....	79
Figure 3- 39 : Bruit AWGN et Rayleigh.....	80
Figure 3- 40 : Signaux étalés bruités lents pour les commandes.....	81
Figure 3- 41 : Signal étalé bruité lent pour l'image.	81
Figure 3- 42 : Signaux étalés bruités rapides pour les commandes.....	82
Figure 3- 43 : Signal étalé bruité rapide pour l'image.	82
Figure 3- 44 : Signaux étalés bruités des commandes avec bruit et effet doppler.	83
Figure 3- 45 : Signal étalé de l'image avec bruit et effet doppler.	83
Figure 3- 46 : Signaux récupérés dans FHSS lent sans bruits pour les commandes.	84
Figure 3- 47 : signal récupéré dans FHSS lent sans bruits pour l'image.....	84
Figure 3- 48: Signaux récupérés dans FHSS rapide sans bruits pour les commandes.	84
.....	84
Figure 3- 49: signal récupéré dans FHSS lent sans bruits pour l'image.....	85
Figure 3- 50 : Le signal de désétalement des commandes pour FHSS Lent.....	85
Figure 3- 51 : Le signal de désétalement de l'image pour FHSS rapide.....	85
Figure 3- 52 : Le signal de désétalement de l'image pour FHSS lent.	85
Figure 3- 53 : Le signal de désétalement de l'image pour FHSS rapide.....	86
Figure 3- 54: Signaux désétalement pour des commandes de FHSS lent.	86
Figure 3- 55: Signaux désétalement pour des commandes de FHSS rapide.	87
Figure 3- 56: Signal désétalement pour l'image de FHSS lent.....	87
Figure 3- 57: Signal désétalement pour l'image de FHSS rapide.....	87
Figure 3- 58 : Les données récupérées du système de commandes.....	88

Figure 3- 59 : Représentation binaires des données récupérées du système de commandes.....	88
Figure 3- 60 : Les données récupérées du système de télémétrie.	88
Figure 3- 61 : Représentation binaires des données récupérées du système de télémétrie.	89
Figure 3- 62 : Conversion des données binaires en commandes décimales.....	89
Figure 3- 63 : Transformation des données binaires en image de télémétrie.	89
Figure 3- 64 : BER/SNR pour FHSS lent et rapide.	90
Figure 3- 65 : Capacité de canal pour FHSS lent rapide.	91

Liste des tableaux :

Chapitre 01

Tableau 1- 1 : Classification des drones.....	8
Tableau 1- 2 : Les éléments de la communication des drones.	23
Tableau 1- 3 : explication des acronymes de la trame MAVlink ainsi que de leur contenu.....	24
Tableau 1- 4 : Explication de l'en-tête TCP.....	26
Tableau 1- 5 : Explication de l'en-tête UDP.	27

Chapitre 02

Tableau 2- 1: Évaluation des techniques d'étalement de spectre.	43
--	----

Chapitre 03

Tableau 3- 1 : Description des outil et bibliothèques Python.....	65
Tableau 3- 2 : Comparaison de FHSS lent et rapide.	91

Introduction Générale

Les drones, ou véhicules aériens sans pilote (UAV), ont révolutionné divers secteurs, allant de la surveillance et de l'exploration à la livraison et à l'agriculture. Leur capacité à accéder à des zones inaccessibles et à effectuer des tâches dangereuses sans risquer de vies humaines les rend irremplaçables dans de nombreuses applications. Cependant, l'essor fulgurant des drones s'accompagne de défis majeurs, notamment en matière de sécurité des communications. La sécurisation des communications est d'une importance capitale pour les drones, en particulier lorsqu'ils sont déployés dans des missions sensibles telles que les opérations militaires, les missions de surveillance critiques et les livraisons de colis. Les interférences, qu'elles soient intentionnelles (brouillage) ou accidentelles, peuvent compromettre la transmission des données entre le drone et son opérateur, entraînant des pertes de contrôle, des erreurs de navigation, voire des accidents. Garantir la robustesse et la fiabilité de ces transmissions est donc une priorité absolue pour assurer le bon fonctionnement et la sécurité des drones. Parmi les techniques avancées pour sécuriser les communications des drones, l'étalement de spectre par saut de fréquence (FHSS) se distingue par son efficacité et sa fiabilité. Cette méthode ingénieuse consiste à faire varier la fréquence de la transmission selon une séquence pseudo-aléatoire, rendant ainsi les communications moins vulnérables aux interférences et au brouillage. Le FHSS améliore considérablement la résistance aux interférences en répartissant le signal sur une large bande de fréquences, ce qui rend plus difficile pour un brouilleur de perturber la communication de manière efficace.

Ce mémoire se propose d'examiner en profondeur la sécurisation des transmissions des drones face aux interférences en utilisant la technique d'étalement de spectre FHSS. Nous mènerons une analyse détaillée des principes fondamentaux du FHSS, de ses

avantages et de ses défis d'implémentation. Des simulations rigoureuses seront réalisées pour évaluer l'efficacité du FHSS dans différents scénarios d'interférence.

Le mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

Chapitre 1 : Introduction aux drones et aux défis de la sécurité des communications
Ce chapitre présente un aperçu des drones, de leurs applications et des défis liés à la sécurité des communications dans les environnements électromagnétiques complexes.

Chapitre 2 : L'étalement de spectre par saut de fréquence (FHSS): principes et avantages
Ce chapitre explore en détail les principes fondamentaux du FHSS, ses avantages en matière de sécurité des communications et ses différents paramètres de configuration.

Chapitre 3 : Simulations et analyse des performances du FHSS
Ce chapitre présente des simulations rigoureuses pour évaluer les performances du FHSS dans différents scénarios d'interférence. Les résultats obtenus seront analysés et discutés en profondeur.

Nous terminerons avec une conclusion qui présente une synthèse des résultats obtenus, met en avant les contributions de ce travail de recherche et propose des perspectives pour de futures recherches dans le domaine de la sécurisation des communications des drones.

Ce mémoire vise à contribuer à la compréhension et à l'amélioration de la sécurité des communications des drones en s'appuyant sur la technique d'étalement de spectre par saut de fréquence (FHSS). Les résultats de ce travail de recherche permettront d'éclairer le développement de solutions de communication plus robustes et fiables pour les drones, contribuant ainsi à leur utilisation plus sûre et plus efficace dans une large gamme d'applications.

La réalisation de ce travail s'inscrit dans le cadre d'un stage enrichissant effectué au Centre de Recherche en Technologie de l'Information (CRTI). Ce stage a constitué une expérience formatrice inestimable, nous permettant d'acquérir une expertise pratique concrète dans le domaine des techniques de protection des transmissions. La mise en

œuvre de la méthode FHSS dans des scénarios réels nous a permis de mettre en pratique nos connaissances théoriques et de développer des compétences précieuses en matière de recherche appliquée

Chapitre 1

Généralités sur les drones

1.1 Introduction

Les drones, ou véhicules sans pilote, sont devenus incontournables dans divers secteurs grâce à leurs technologies avancées et leur polyvalence. Ils occupent une place importante dans différents secteurs civils et militaires. Afin d'assurer des opérations performantes et sécurisées, il est essentiel de préserver les données sensibles des interférences. Au cours de ce chapitre, nous aborderons les aspects généraux des drones et les éléments essentiels qui garantissent une communication sécurisée face aux interférences.

1.2 Définition des drones

En général, Le terme « drone » désigne le véhicule aérien (UAV). Cependant, en ce qui concerne les caractéristiques, un drone désigne tout sort de véhicule sans pilote, ils peuvent être divisés en différentes catégories, telles que les drones aériens, terrestres et marins, comme le montre la figure1-1. Chacun d'eux répond à des besoins particuliers, allant des activités de loisirs aux applications professionnelles, militaires et scientifique.



Figure 1- 1: Les catégories des drones [1] [2]

1.3 Types de drone

Les drones aériens (UAV), sont des engins dont la forme et l'apparence jouent un rôle crucial. Ils sont classés principalement en fonction des types d'ailes [3].

➤ Drone à voilure fixe

Les drones à voilure fixe, utilisés dans l'industrie aéronautique. La conception et le fonctionnement sont conçus de manière similaire aux avions. La Figure 1-2 montre un exemple de ces drones, qui génèrent de la portance grâce à leurs ailes plutôt qu'à des hélices. Cela leur permet de parcourir de longues distances et de surveiller de vastes zones. Ces drones offrent une meilleure efficacité de poussée, peuvent utiliser des moteurs à essence et ont une autonomie de vol de plus de 15 heures[4].

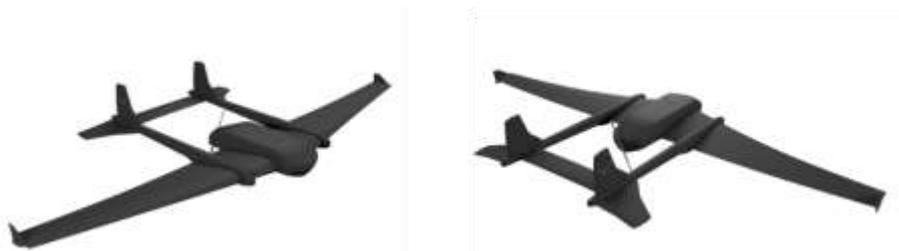


Figure 1- 2 : Drone a voilure fixe[5]

➤ Drone à voilure tournante

Les drones à voilure tournante, également connus sous le nom de drones à rotor multiple, sont le type de drones le plus utilisé[4]. Ces drones utilisent des hélices pour générer de la portance. Ils peuvent décoller sans effort, atterrir verticalement, maintenir

un vol stationnaire stable et naviguer rapidement dans des espaces restreints. Bien que leur temps de vol et leur capacité de charge utile soient généralement limités, ces caractéristiques peuvent varier considérablement en fonction du modèle[6].



Figure 1- 3 : Drone à voilure tournante [7]

➤ Les Drones hélicoptère à rotor unique

Les drones à rotor simple, comme les hélicoptères, utilisent une grande hélice principale et un rotor de queue pour le cap. Bien que les hélicoptères soient courants dans l'aviation traditionnelle, ils sont rares dans le domaine des drones en raison de leur complexité. Cependant, les drones hélicoptères, souvent équipés de moteurs à essence pour des vols plus longs, sont plus efficaces pour certaines tâches. Leur grand rotor, tournant lentement, génère une poussée plus efficace, semblable à une aile rotative[4].



Figure 1- 4 : Drone hélicoptère[8]

➤ Les Drones hybrides

Certains types de drones ne sont pas considérés comme des drones à voilure fixe ou multi rotor, car tout simplement ils combinent des caractéristiques des deux types. Les systèmes hybrides sont des systèmes qui utilisent plusieurs rotors pour décoller et

atterrir verticalement, tout en possède également des ailes pour pouvoir voler sur de plus longues distances[3].



Figure 1- 5: Drone hybrides[9]

1.4 Classification des drones

L'association européenne des systèmes de véhicules (EUROUVS) a établi une classification basée sur diverses performances de drone telle que la capacité de charge utile, l'altitude maximale et le temps de vol maximal. Devenue plus tard l'international Unmanned Vehicle systems (UVS international)[10].

Le tableau 1-1 ci-dessus représente les différentes catégories principales des drones :

Catégorie	Acronyme	Poids maximum au décollage (kg)	Altitude de vol maximale (km)	Endurance (h)
Micro/Mini drone	MAV	0.1	0.25	1
	Mini	<30	0.15 - 0.3	<2
Drones tactiques	CR	150	3	2 - 4
	SR	200	3	3 - 6
	MR	150 - 500	3 - 5	6 - 10
	LR	-	5	6 - 13
	EN	500 - 1500	5 - 8	12 - 24
	MALE	1000 - 1500	5 - 8	24 - 48
Drones Stratégiques	HALE	2500 - 12500	15 - 20	24 - 48
Drones spécialisés	LET	250	3 - 4	3 - 4
	DEC	250	0.05 - 5	<4
	STRATO	A déterminer	20-30	>48

	EXO	A déterminer	>30	A déterminer
--	-----	--------------	-----	--------------

Tableau 1- 1 : Classification des drones[10]

1.5 Domaines d'utilisation des drones

Le drone est de plus en plus présent dans une multitude de domaines, avec une expansion constante de ses applications. On observe principalement deux grands domaines d'utilisation :

➤ Utilisation militaire

Les drones sont largement utilisés dans les opérations militaires pour la collecte des données de surveillance et de suivi sur le champ de bataille. Ils identifient les menaces telles que les ennemis, les explosifs et les produits chimiques dangereux, ce qui en fait des outils indispensables pour les forces armées. En offrant une plus grande flexibilité et précision, les drones permettent des opérations de reconnaissance et d'espionnage en temps réel, En plus ils jouent un rôle essentiel dans la logistique, en livrant du sang, des fournitures médicales, des munitions et d'autres équipements essentiels, ce qui réduit les risques pour les soldats et améliore l'efficacité des opérations[3].



Figure 1- 6 : Drone militaires[11]

➤ Utilisation civile

Les drones jouent un rôle crucial et variées dans les applications civiles et commerciales urbaines, offrant divers services tels que :

- Surveillance et sécurité Environnementale

Les drones sont des outils précieux pour la surveillance et la sécurité, offrant des images sous divers angles pour une gestion efficace des événements et des urgences. De plus, ils permettent de suivre les feux de forêt et de détecter les déversements de pétrole. Ces appareils recueillent des données précises sur l'impact de la pollution et les changements environnementaux, aidant les chercheurs et les autorités à prendre des mesures appropriées pour protéger les écosystèmes fragiles et préserver la biodiversité[6].



Figure 1- 7 : Drone de surveillance[12]

- **Livraison et logistique**

Une autre application importante des drones est la livraison de colis. De nombreuses études ont exploré le développement de systèmes de livraison efficaces basés sur des drones. Les opérations de livraison sont particulièrement utiles pour la livraison de la nourriture et les fournitures médicales, Cette approche innovante de la livraison offre une efficacité des services et répondant aux besoins urgents dans des conditions difficiles[6].



Figure 1- 8 : Drone de livraison[13]

- **Agriculture**

Les drones agricoles collectant des données essentielles sur les conditions du sol, la croissance et la santé des plantes, aidant les agriculteurs à prendre des décisions éclairées. Ils surveillent les cultures en continu[6], permettent des pulvérisations précises, détectent rapidement des maladies et parasites, et localisent les nids de frelons asiatiques ainsi que les plants manquants. Ils sont particulièrement utiles dans les zones peu peuplées, permettant une intervention rapide sur de vastes surfaces, optimisant les rendements, réduisant les couts et favorisant des pratiques durables[14].



Figure 1- 9 : Drone agricole[15]

- **Topographie**

Les drones offrent une polyvalence exceptionnelle pour la topographie, en réalisant une variété de tâches complexes avec une précision et une efficacité accrue. Parmi les utilisations courantes, on trouve la réalisation de cadastres, le géoréférencement, les implantations 3D et les orthophotographies. Ces applications permettent aux urbanistes, aux ingénieurs et aux gestionnaires de terrains d'obtenir des données détaillées et précises, facilitant ainsi la planification et la gestion des espaces[16].



Figure 1- 10 : Vue aérienne pour l'analyse topographique

- **Situations d'urgence et de catastrophe**

Lors d'une catastrophe naturelle ou d'attaques, les drones jouent un rôle crucial dans un système d'intervention d'urgence, en relevant les défis posés par le manque de personnel et les infrastructures endommagées. Ils sont également utilisés pour livrer des fournitures vitales dans des zones difficiles d'accès. Cette capacité est particulièrement importante pour acheminer des médicaments, de la nourriture et d'autres ressources essentielles aux populations isolées[6].

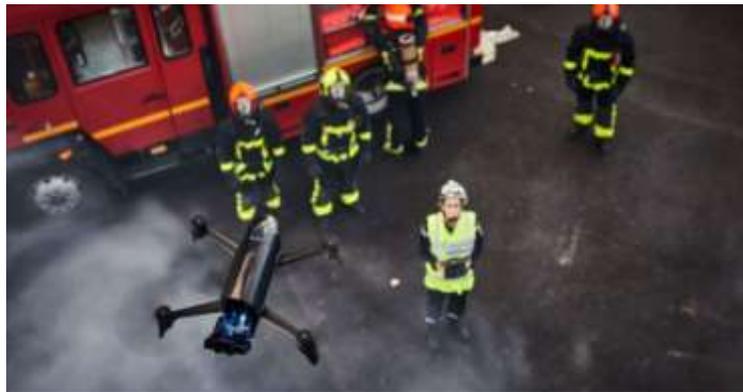


Figure 1- 11 : Drone d'urgence[17]

1.6 Composant d'un drone

Les composants sont les éléments physiques qui forment le drone et lui permettent de fonctionner. Chaque pièce joue un rôle essentiel dans le vol et le contrôle du drone :

- **Structure de drone**

La structure de drone représente la base ou le squelette du drone, également connus sous le nom de cadres par la plupart des connaisseurs, principalement fabriquées en fibre de carbone, de plastique, d'aluminium, ou d'autres matières plutôt résistantes. Elle se présente sous différentes formes et caractéristiques :

- **Drone multi-rotors** : les différents châssis des multi-rotors se distinguent par le nombre de bras : Le tricoptère (3 bras), Le quadricoptère (4 bras), L'hexacoptère (6 bras), Le modèle Y6 (3 bras doubles), L'octocoptère (8 bras), Le modèle X8 (4 bras doubles)[18].



Figure 1- 12 : Structure de drone multi-rotors[19]

- **Drone à voilure fixe** : se déclinent en divers modèles et formes, Certains sont équipés d'une hélice à l'avant, d'un fuselage central, de deux ailes sur le côté, d'une queue à l'arrière comprenant des volets horizontaux et verticaux. En outre, les drones à corps d'ailes mélangées ont l'air très futuriste avec des ailes, et un fuselage intégrés en une seule pièce sans queue[20].



(a) cadres à aile mixte



(b) cadres conventionnel

Figure 1- 13 : Structure de drone a voilure fixe[21]

➤ Les moteurs

Les drones utilisent principalement deux types de moteurs :

- **Les moteurs électriques brushless** : Utilisés en modélisme, les bobinages en cuivre sont montés sur le stator et les aimants sur le rotor, chaque un rotor constitué d'un ou de plusieurs aimants permanents Sur la plupart des drones on en compte 4, un pour chaque hélices[19].



Figure 1- 14 : Moteur brushless[22]

- **Les moteurs à combustion interne (ICE) :** Sont la forme la plus courante de moteur thermique, utilisés dans les véhicules, les navires, les avions et les trains. Les drones à voilure fixe utilisent les moteur brushless et les moteurs à combustion interne afin d'atteindre des vitesses élevées, en particulier sur l'axe X. Ces moteurs offrent plusieurs avantages par rapport aux moteurs électriques traditionnels, notamment en termes de puissance et d'endurance.



Figure 1- 15 : Les moteurs à combustion interne[23]

➤ **Contrôleurs de vitesse (ESC)**

Les contrôleurs de vitesse ou contrôleur brushless c'est un convertissent de courant continu de la batterie de vol en courant alternatif sous forme d'impulsions précises pour faire fonctionner les moteurs brushless. Chaque moteur nécessite un ESC[24].



Figure 1- 16 : contrôleur de vitesse

➤ **Les hélices**

Les hélices se trouve au bout de la branche du drone, se distinguent par leur sens de rotation : horaire (CW) ou antihoraire (CCW). Elles sont généralement en plastiques, fibre de carbone, en bois de hêtre et peuvent être en matériaux composites. Ils sont identifiés par leur diamètre et leur pas en pouces[24].



Figure 1- 17 : Les hélices

➤ **Les batteries**

Les batteries équipées sur les drones sont des batteries Lipo "batterie Lithium Polymère". Ils sont couramment utilisés dans les drones en raison de leur petite taille et de leur capacité à fournir une puissance élevée. Ils alimentent l'énergie pour tous les composants électriques du drone, y compris les moteurs qui nécessitant une tension spécifique pour fonctionner correctement. Ils sont caractérisés par un excellent rapport poids/puissance[25].



Figure 1- 18 : Les batteries

➤ **La radiocommande (RC)**

La radiocommande d'un drone est un élément essentiel permettant au pilote de contrôler précisément les mouvements et les actions de l'appareil à distance. Elle se compose d'un émetteur radio (TX) intégré dans son boîtier, convertissant les signaux électriques en signaux radio sur la fréquence réglementée des 2,4 GHz. Ces signaux sont reçus par un récepteur (RX) installé sur le drone, lequel transmet les instructions au contrôleur de vol. La compatibilité entre l'émetteur et le récepteur dépend du protocole de communication radio et de la fréquence d'émission. Grâce à cette connexion sans fil, le pilote peut envoyer des commandes à distance, permettant au drone d'effectuer des manœuvres complexes et de capturer des images aériennes de haute qualité [26].



Figure 1- 19 : La radiocommande

➤ Récepteur Radio

Le récepteur de drones est un composant électrique équipé d'une antenne ou parfois plus. Il reçoit les signaux radio émis par la télécommande ou la station de contrôle au sol.



Figure 1- 20 : Récepteur Radio

➤ Le contrôleur de vol

Le contrôleur de vol est le composant principal du drone, appelé cerveau du drone. Il est composé d'une carte électronique équipée de capteurs de haute précision [18]:

- **Le gyroscope** : mesurer et signaler les changements de vitesse angulaire sur les trois axes : tangage (pitch), roulis (roll) et lacet (yaw).
- **L'accéléromètre** : mesurer l'accélération linéaire (la vitesse) sur les trois axes.
- **Le magnétomètre** : mesurer l'orientation par rapport au cadre de référence du drone.
- **Le baromètre** : mesure le changement de pression atmosphérique (altitude).

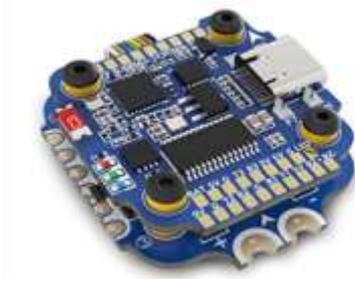


Figure 1- 21 : Contrôleur de vol

➤ Les capteurs de drone

- **Le GPS** : mesure la position en longitude et en latitude, permettant ainsi au drone de maintenir une position fixe, une altitude donnée, voire de revenir automatiquement à son point de départ en cas de perte de signal radio[24].



Figure 1- 22 : GPS

- **Altimètre** : ce capteur permet de mesure l'altitude par rapport au niveau de la mer, la hauteur par rapport au niveau du sol local.



Figure 1- 23 : Altimètre

- **Indicateur de vitesse** : ce capteur mesure la vitesse par rapport à l'air environnant. Cette mesure est généralement obtenue en comparant la pression de l'air statique et la pression dynamique causée par le mouvement d'un drone à voilure fixe.



Figure 1- 24 : Indicateur de vitesse.

➤ La camera

La caméra est un composant qui permet soit d'enregistrer le vol pour une vision ultérieure (cas de la camera Gimbal), soit de faire du FPV (cas de la caméra embarquée). La figure 1-25 nous révèle que la caméra est généralement positionnée en dessous du drone pour une prise de vue optimale. Une caméra peut être intégrée ou fixée à l'extérieur du drone. Il est important de noter que la caméra intégrée ne dispose pas forcément l'enregistrement[25].



Figure 1- 25 : Les camera de drone[24]

1.7 Types du pilotage

Généralement les drones sont pilotés en trois manières différentes :

- **Pilotage à vue** : La distance horizontale entre le drone et son pilote est de moins de 100 mètres, ce qui permet d'avoir une vue directe sur le drone.
- **Pilotage hors vue** : La distance est supérieure à 100 mètres, de ce fait le guidage du drone se fait par retour de vidéos.
- **Pilotage automatique** : Les paramètres de navigation sont enregistrés avant le vol alors le drone évolue en fonction de ces paramètres prédéfinis.

1.8 Mouvement de drone

Les mouvements fondamentaux d'un drone sont générés en ajustant la vitesse de chaque rotor, ce qui modifie la poussée produite. En principe le quadri-rotor a cinq mouvements qui se présentent comme suite : Mouvement vertical (gaz), mouvement de roulis, mouvement de tangage et mouvement de lacet[27].

➤ **Mouvement vertical**

Il s'agit du mouvement de montée/descente du drone, tel qu'illustré dans la figure 1-26. Les moteurs tournent à la même vitesse. Si la vitesse des moteurs est réduite le multi-rotor descend. Par contre si la vitesse augmentant, il monte[27].

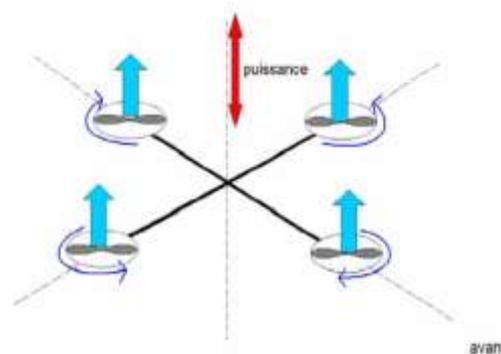


Figure 1- 26 : Mouvement vertical[27]

➤ **Mouvement de lacet**

Il s'agit d'un mouvement qui permet au drone de tourner sur lui-même. Afin d'accomplir cela, la vitesse de rotation des deux moteurs avant et arrière est réduit, tandis que les deux autres moteurs (gauche et droit) augmentent la vitesse. La figure 1-27 illustre cela[27].

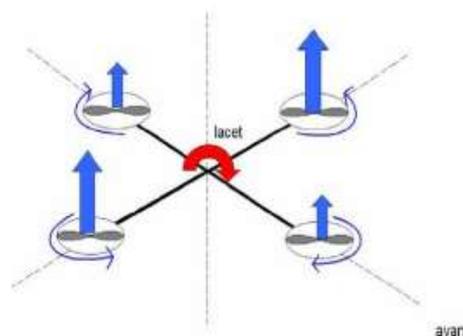


Figure 1- 27: Mouvement de lacet[27]

➤ **Mouvement de tangages**

Ce mouvement résulte d'une rotation autour de l'axe X, pour ce faire en agit sur les moteurs gauches et droit. Par exemple, si le multi-rotor penche à gauche, on augmente la vitesse du moteur gauche tout en diminuant celle du moteur droit[27].

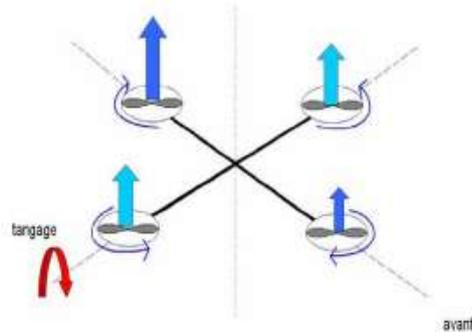


Figure 1- 28 : Mouvement de tangages[27]

➤ Mouvement de roulis

Ce mouvement se produit suite à une rotation autour de l'axe Y, pour ce faire en agit sur les moteurs avant et arrière permettent de garder une assiette stable sur cet axe. Si le multi-rotor est orienté vers l'arrière, il faut donner plus de vitesse au moteur arrière et diminuant celle du moteur avant[27].

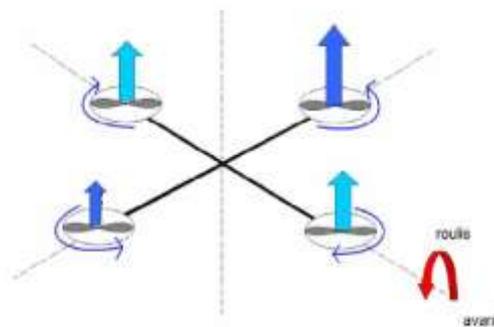


Figure 1- 29: Mouvement de roulis[27]

1.9 Communication et Transmission de Données des Drones

Les drones reposent sur des systèmes de communication avancés pour transmettre divers types de données, ce qui inclut :

➤ Types de communication

Les communications par drone peuvent se dérouler entre un drone et un autre point final, ce que l'on appelle la communication UAV-2-X. La figure 1-30 présente les quatre catégories de communications :

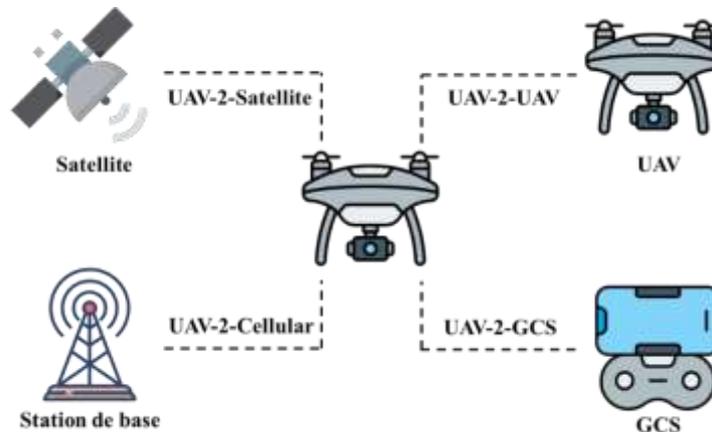


Figure 1- 30 : Les types de communication du drone

- **UAV-2-GCS** : Cette communication est essentielle pour les drones, permettant au Station de contrôle (GCS) d'échanger des données avec les UAV via des liaisons montantes et descendantes pour surveiller et contrôler la mission de vol[28].
- **UAV-2-Satellite** : La communication par satellite est la solution idéale pour établir une liaison entre deux points très éloignés. Les satellites permettent une communication efficace entre le GCS et l'UAV, assurant ainsi une connexion stable et fiable sur de vastes distances[29].
- **UAV-2-Cellular** : L'utilisation des réseaux cellulaires permet la transmission de données entre les UAV et les stations de contrôle, qu'ils évoluent dans des environnements urbains ou ruraux, et à différentes altitudes. Cette méthode assure une communication fiable et étendue dans une variété d'environnements[28].
- **UAV-2-UAV** : Ce type de communication est utilisée lors de missions de vol implique plusieurs drones. Ils collaborent et échangent des données via des technologies sans fil à faible consommation d'énergie comme Bluetooth. Cependant, cette communication présente généralement des limitations en termes de débit et de bande passante[28].

➤ La transmission des données

Dans le domaine du vol de drone, la communication entre le pilote et l'aéronef s'articule autour de deux systèmes distincts :

- **Système de données de contrôle**

Le système de contrôle des données des drones fonctionne de manière unidirectionnelle, s'appuyant sur la communication entre l'émetteur radio (TX) et le récepteur radio (RX). Le pilote utilise la radio commande (émetteur) pour envoyer les commandes de mouvement. Le récepteur monté sur le drone, capte ces signaux et les convertit en actions spécifiques, permettant ainsi au drone de naviguer et de manœuvrer conformément aux instructions du pilote.

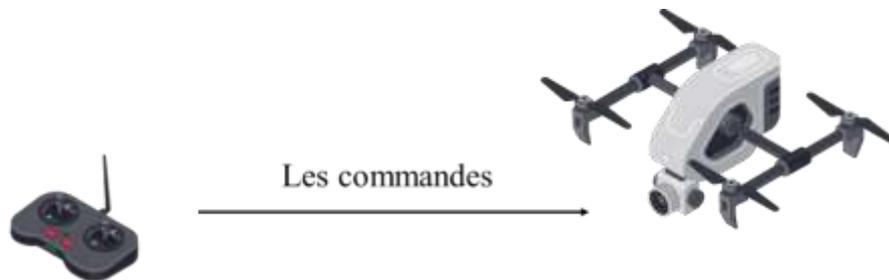


Figure 1- 31: Système de données de contrôle

- **Système de télémétrie**

Le système de télémétrie des drones fonctionne selon une communication full-duplex, permettant la transmission bidirectionnelle des données. Ce système comprend une liaison montante pour l'envoi de messages de commande depuis la radiocommande vers le drone, ainsi qu'une liaison descendante pour la transmission du flux vidéo compressé et les données capturées depuis le drone vers la radiocommande[30].

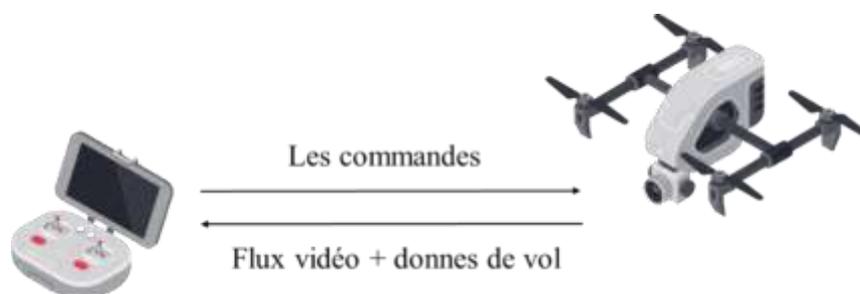


Figure 1- 32 : Système de données de vidéo

➤ **Types de données transmis**

Les données transmises par les drones sont en effet cruciales pour le contrôle, la navigation et la collecte de données, notamment :

- **Les commandes de vol** : ces données sont essentielles pour piloter le drone. Elles englobent les instructions de vol telles que le contrôle des gaz, le tangage, le roulis et le lacet.
- **Flux vidéo** : il s'agit des images et vidéos capturées par la caméra embarquée sur le drone. Ces données permettent au pilote de visualiser en temps réel ce que voit le drone, ce dernier est essentiel pour le pilotage en vue à la première personne (FPV).
- **Données des capteurs** : cette catégorie regroupe l'ensemble des données transmises du drone vers la radiocommande ou le système de contrôle. Ces données offrent des renseignements cruciaux pour surveiller l'état du drone et son environnement, pour adapter les paramètres de vol et de caméra en conséquence. Les données incluent :
 - Données des capteurs de vol : baromètre, batterie, GPS, IMU, magnétomètre, moteurs, TOF.
 - Données de vol : altitude, angles, position, vitesse.
 - Données de stabilisation de la caméra : angles, position.
 - Les paramètres de la caméra[31].

1.10 Eléments de la communication des drones

La communication des drones repose effectivement sur plusieurs éléments essentiels qui garantissent une performance optimale et fiable des systèmes de contrôle et de transmission de données. Le tableau ci-dessous ces éléments et leurs implications dans les opérations des drones :

Facteur	Importance dans les opérations des drones	Mesures de sécurité et considérations
Portée	Cruciale pour le contrôle, de quelques mètres à des centaines de kilomètres.	“ Non Applicable”
Sécurité	Critique en raison de la transmission de données sensibles.	Utilisation de chiffrement et techniques anti-brouillage.
Latence	Le délai de communication : Minimale pour un contrôle efficace, surtout en situations d'urgence ou de combat.	“ Non Applicable”
Bande passante	Détermine la quantité de données transmissibles simultanément.	Une bande passante plus élevée permet la transmission de données de meilleure qualité.
Résilience	Doit être résistant aux interruptions, maintenir une connexion solide dans des conditions défavorables.	“ Non Applicable”

Tableau 1- 2 : Les éléments de la communication des drones [32].

1.11 Protocol de communication des drones

La communication des drones se fait généralement selon des protocoles spécifiques, permettent aux drones de communiquer efficacement avec leurs contrôleurs au sol, facilitant ainsi la planification et l'exécution des missions en temps réel.

➤ Protocole MAVLink

Le protocole MAVLink est utilisés pour les communications entre les UAV (Unmanned Aerial Vehicles) et les stations au sol (GCS), facilitant l'échange de données de contrôle et de télémétrie en temps réel via des canaux sans fil. Ce protocole message-based permet une communication bidirectionnelle où la GCS envoie des commandes de mission aux drones sous forme de messages basés sur des en-têtes, tandis qu'en retour transmettent des informations d'état, telles que les valeurs des capteurs et la position actuelle. MAVLink est intégré dans de nombreux systèmes de pilotes automatiques et existe en deux versions : v1.0 et v2.0, cette dernière étant

recommandée pour ses améliorations et sa rétrocompatibilité. MAVLink v2.0 ajoute des fonctionnalités comme les extensions de message et la signature de paquets, renforçant sa fiabilité pour les drones commerciaux[28].

La structure des messages du protocole MAVLink se présente comme suite dans la figure 1-33 :

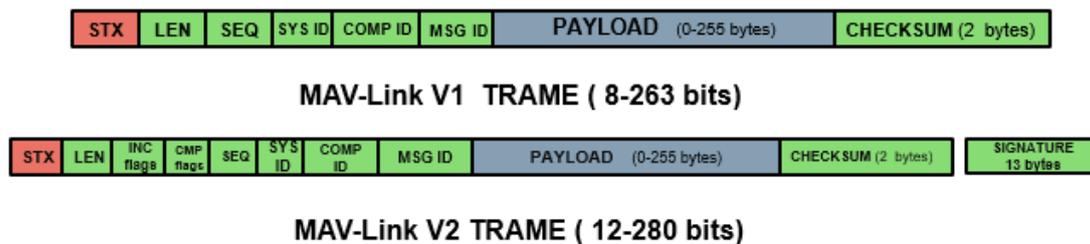


Figure 1- 33 : Trame du protocole MAVLink

Le tableau 1-3 suivant présente une explication des acronymes de la trame MAVlink v1 et v2 ainsi que de leur contenu :

Acronyme	La version	Valeur	Explication
STX	V1	0xFE	Il décrit le début de la trame
	V2	0xFD	
LEN	V1 et V2	0 - 255	Indique la longueur de champs de (Payload)
INC FLAGS	V2	/	Les indicateurs qui doivent être compris pour la compatibilité MAVLink
CMP FLAGS	V2	/	Indicateurs qui peuvent être ignorés s'ils ne sont pas compris
SEQ	V1 et V2	0 - 255	Utilisé pour détecter la perte de paquets.
SYS	V1 et V2	1 - 255	Ce champ représente l'ID du système sans pilote.
COMP	V1 et V2	1 - 255	Ce champ représente le composant du système qui envoie le message.
MSG	V1 et V2	/	Ce champ représente le type de message.
Payload	V1 et V2	/	Cela effectue les données réelles du message, qui dépendent du type de message
CKA and CKB (CRC) Or checksum	V1 et V2	2 octets	Le CKA et le CKB sont appelés somme de contrôle. La signature du paquet se fait du bit le moins significatif (LSB) au bit le plus significatif (MSB).
SIGNATURE	V2	/	Signature pour garantir que le lien est infalsifiable.

Tableau 1- 3 : explication des acronymes de la trame MAVlink ainsi que de leur contenu[33]

➤ Protocole TCP

Le protocole TCP (Transmission Control Protocol) est une couche de connexion sécurisée conçue pour s'intégrer dans un ensemble de protocoles multicouches, ce qui facilite le fonctionnement des réseaux avec des architectures variées. Directement positionné au-dessus du protocole Internet IP (Internet Protocol), TCP bénéficie de la capacité d'IP à envoyer et recevoir des segments de données de longueur variable, emballés dans des paquets Internet, également connus sous le nom de "datagrammes". Cette architecture multicouche garantit une communication fiable et ordonnée. Les paquets TCP sont ainsi encapsulés dans des datagrammes IP qui transmettent des informations cruciales telles que les adresses IP source et de destination. La Figure 1-34 présente l'en-tête TCP, illustrant la structure et les différents champs utilisés pour gérer les connexions et la transmission des données de manière efficace et sécurisée[34].

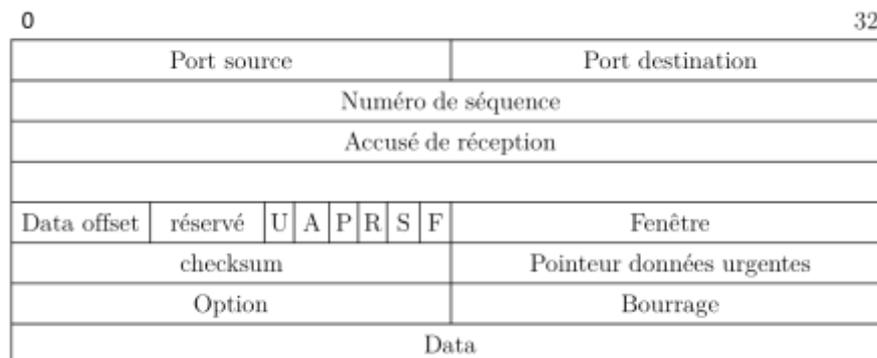


Figure 1- 34 : En-tête TCP

Le tableau 1-4 présente une explication de l'en-tête TCP :

Champ	Taille	Description
Port source	16 bits	Le numéro de port de la source.
Port destinataire	16 bits	Le numéro de port de la destinataire
Numéro de séquence	32 bits	Le numéro du premier octet de données par rapport au début de la transmission (sauf si SYN est marqué).
Accusé de réception	32 bits	Si ACK est marqué, ce champ contient le numéro de séquence du prochain octet que le récepteur s'attend à recevoir.
Data Offset	4 bits	La taille de l'en-tête TCP en nombre de mots de 32 bits. Il indique où commencent les données.
Réservé	6 bits	Réservés pour usage futur. Doivent nécessairement être à 0.
Bits de contrôle	6 bits	URG : Pointeur de données urgentes significatif. ACK : Accusé de réception significatif. PSH : Fonction Push. RST : Réinitialisation de la connexion. SYN : Synchronisation des numéros de séquence. FIN : Fin de transmission.
Fenêtre	16 bits	Le nombre d'octets à partir de la position marquée dans l'accusé de réception que le récepteur est capable de recevoir.
Checksum	16 bits	Le Checksum est constitué en calculant le complément à 1 sur 16 bits de la somme des compléments à 1 des octets de l'en-tête et des données pris deux par deux mots de 16 bits.

Tableau 1- 4 : Explication de l'en-tête TCP[34]

➤ Protocole UDP

Le protocole UDP (User Datagram Protocol) est un protocole de transport de données utilisé sur les réseaux informatiques. Contrairement à TCP, UDP est un protocole sans connexion et non fiable. Cela signifie que les appareils envoient des données sans établir de connexion préalable et ne reçoivent pas d'accusé de réception. De ce fait, UDP est plus rapide et plus simple que TCP, mais il est également moins fiable. Il est donc idéal pour les applications où la vitesse est plus importante que la

fiabilité, comme le streaming vidéo ou audio, les jeux en ligne ou le transfert de petites quantités de données. La Figure 1-35 présente l'en-tête UDP, montrant la structure et les différents champs utilisés pour la transmission de données rapide et efficace sur les réseaux[34].

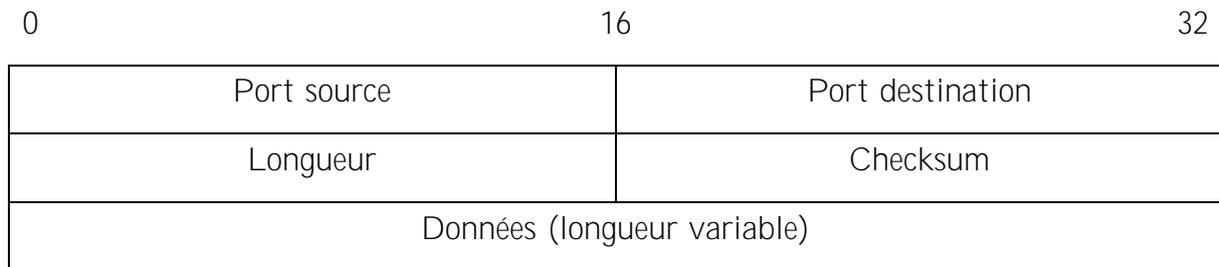


Figure 1- 35 : En-tête UDP

Le tableau 1-5 présente une explication de l'en-tête UDP :

Champ	Taille	Description
Port source	16 bits	Correspond au port relatif à l'application en cours sur la machine source.
Port destinataire	16 bits	Correspond au port relatif à l'application en cours sur la machine de destination.
Longueur	16 bits	Représente la taille de l'en-tête et des données. Son unité est l'octet et sa valeur maximale est 64 k Octets (2^{16}).
Checksum	16 bits	Représente la validité du paquet UDP.

Tableau 1- 5 : Explication de l'en-tête UDP[34]

1.12 Impact des interférences sur la transmission des drones

Les systèmes de communication et de transmission de données par drone font face à plusieurs défis affectant leur performance et fiabilité, notamment la distance, les obstacles physiques, les conditions météorologiques, les réglementations et la sécurité, ainsi que ces systèmes sont vulnérables aux attaques malveillantes telles que le piratage, le brouillage et l'usurpation d'identité, menaçant l'intégrité et la confidentialité des données transmises.

Les interférences peuvent avoir plusieurs impacts sur les transmissions des drones, notamment :

- **Perte de signal** : Les interférences électromagnétiques, provenant d'autres appareils électroniques ou de signaux radio extérieurs, peuvent entraîner une perte de contrôle temporaire ou totale du drone. Cela met en danger son vol ainsi que les opérations associées.
- **Dégradation de la qualité du signal** : Les interférences peuvent entraîner une baisse de la qualité du signal. Cela se traduit par une réception vidéo moins nette ou des données de capteurs moins précises.
- **Augmentation de la latence** : Les interférences peuvent entraîner des retards dans la transmission des données, ce qui se traduit par une latence accrue entre les commandes envoyées par l'opérateur et leur exécution par le drone. Cette latence peut rendre le contrôle du drone plus difficile, en particulier dans des situations nécessitant des réponses rapides.
- **Risques de collision** : les interférences affectent la capacité du drone à détecter et à éviter les obstacles, cela peut augmenter les risques de collision avec d'autres objets tels que des bâtiments, des véhicules ou d'autres drones. Ces collisions peuvent entraîner des dommages matériels, des blessures ou des incidents graves.

1.13 Conclusion

Les drones sont vulnérables à diverses interférences lors de leurs opérations. Pour minimiser ces risques, plusieurs techniques de sécurisation sont disponibles, dont l'étalement de spectre par saut de fréquence (FHSS) se distingue. Cette méthode offre une solution efficace en répartissant les données sur un large spectre de fréquences, réduisant ainsi les effets des interférences. Dans le prochain chapitre, nous approfondirons cette technique, examinant son fonctionnement et son utilisation pour garantir des communications stables et sécurisées entre les drones et leurs stations de contrôle.

Chapitre 2

Technique d'étalement de spectre FHSS

2.1 Introduction

L'étalement de spectre par sauts de fréquence (FHSS) est une technique de modulation pour les communications sans fil, basée sur des principes fondamentaux de la théorie des communications et de la sécurité des systèmes. Le FHSS fournit une protection efficace contre les interférences et les tentatives de brouillage intentionnel des transmissions de données. Initialement conçu par Hedy Lamarr et George Antheil pour des applications militaires, cette technique est désormais utilisée dans divers systèmes, tels que les télécommunications mobiles, les communications satellitaires, les réseaux locaux sans fil, ainsi que pour les communications entre drones et radiocommandes[35].

2.2 Chaîne de transmission des données

Les systèmes de transmission numérique transportent des informations sous forme numérique entre une source et un ou plusieurs destinataires en utilisant un canal sans fil comme le montre la figure 2-1. Les signaux numériques dans la chaîne de transmission peuvent provenir de deux sources distinctes :

- **Analogiques** : dans ce cas, des signaux analogiques, comme la voix ou une image, sont d'abord transformés en un format numérique à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique (CAN).

- **Numériques** : c'est le cas des réseaux de données, où les informations sont déjà sous forme de bits binaires (0 et 1) dès leur création. Par exemple : un code informatique[36].

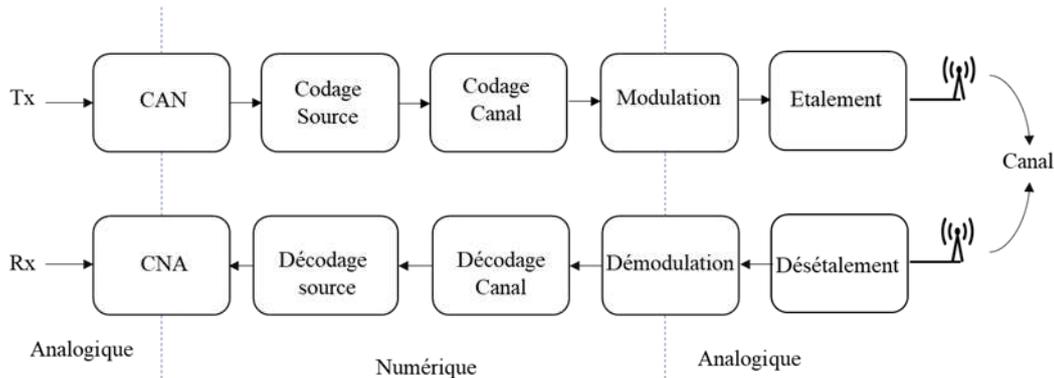


Figure 2- 1 : Schéma d'un système de transmission numérique

➤ Codage source

Le codage source réduit au maximum la taille de données à transmettre, car un message plus long implique un coût plus élevé en termes de ressources limitées tel que le temps, la puissance et la bande passante. Pour diminuer ce coût on élimine la redondance ce qui permet de numériser les données si elles sont analogiques (son, image, vidéo) et de compresser les données numériques. Le critère de fidélité est essentiel et varie selon l'application : certaines nécessitent une compression sans perte (codage réversible), tandis que d'autres tolèrent des pertes (codage non-réversible)[37].

La numérisation d'un signal analogique se décompose en deux étapes qui sont l'échantillonnage et la quantification, comme illustré dans la figure 2-2. Le signal analogique est transformé en une série de valeurs numériques, ce qui permet son stockage, sa manipulation et sa transmission dans un format numérique.

- **Échantillonnage** : processus où le signal original est remplacé par une série de valeurs instantanées prélevées à intervalles réguliers dans le temps. Pour retrouver le signal original à la réception on utilise un filtre numérique.
- **Quantification** : processus où chaque amplitude d'échantillon est associée à l'amplitude la plus proche dans une série discrète d'étalons appelée « Niveaux ». Ces niveaux représentent des valeurs discrètes que le signal peut prendre[38].

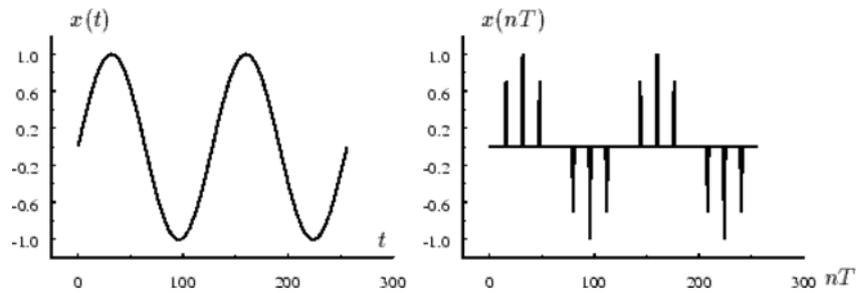


Figure 2- 2 : Échantillonnage et Quantification

➤ Codage canal

Le codage de canal protéger les messages contre les perturbations du canal en ajoutant de la redondance à l'information utile. Cette redondance permet au décodeur de détecter et si possible de corriger les erreurs survenues durant la transmission[37].

➤ Modulation

Pour transmettre le message à travers le canal de communication, le modulateur produit un signal porteur, qui peut prendre la forme d'une série d'impulsions ou d'une onde sinusoïdale. En modulation numérique, le modulateur convertit chaque groupe de [m bits] du message entrant à un débit binaire $[D_b = \frac{1}{T_b} (\text{bits} \cdot \text{s}^{-1})]$ en un signal physique d'une durée $T = \frac{1}{F}$. Dans le cas de l'onde sinusoïdale, le message peut être encodé en utilisant la phase, l'amplitude et/ou la fréquence (PSK, FSK, QAM...etc.)[37].

➤ Étalement

L'étalement consiste en une séquence binaire rapide, beaucoup plus large que le débit des données à traiter. En multipliant les données par cette séquence, le signal résultant s'étend sur une bande de fréquences beaucoup plus large que nécessaire pour transmettre les données initiales.

- Cette séquence d'étalement est indépendante des données et chaque bit de la séquence est appelé "chip".
- La longueur d'une séquence d'étalement correspond au nombre de "chips" dans une période complète.

- Le gain de traitement, ou facteur d'étalement, est le rapport entre la bande de fréquence du signal étalé et celle des bits d'information, ou entre les débits de la séquence d'étalement et des bits d'information.

$$G_p = \frac{D_c}{D_s} = \frac{T_s}{T_c} \quad (2.1)$$

Où :

D_c : Le débit de la séquence d'étalement.

D_s : Le débit des bits d'information.

T_c : La durée d'un "chip".

T_s : La durée d'un bit d'information.

➤ Canal de transmission

Le canal de transmission permet de relier l'émetteur et le récepteur en utilisant des ondes électromagnétiques propagées dans l'atmosphère. Comprendre ses mécanismes est essentiel pour concevoir des systèmes de communication efficaces. Le canal sans fil introduit souvent des distorsions et des délais dus à des interférences aléatoires, telles que les propagations multi-trajets et les bruits, ce qui peut dégrader le signal et entraîner des erreurs de transmission, affectant la fiabilité de l'information reçue[39].

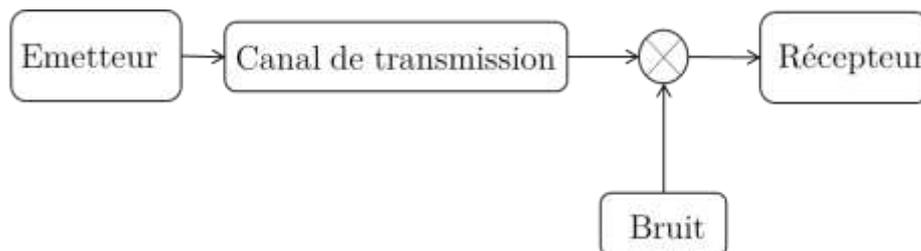


Figure 2- 3: Canal de Transmission

➤ Types de Bruits dans les canaux de communications

Dans un système de transmission de signaux, les bruits du canal de transmission sont des interférences indésirables qui affectent la qualité du signal reçu. Ces bruits peuvent provenir de différentes sources internes ou externes au système et peuvent avoir un impact significatif sur la performance de la communication. En raison de ces

bruits, il est nécessaire de mettre en place des mécanismes pour minimiser leur effet et améliorer la fiabilité de la transmission[40].

➤ Canal a bruit blanc additif Gaussien (BBAG)

Le canal à bruit blanc additif gaussien est un modèle couramment utilisé pour représenter les perturbations dans un système de transmission à entrée binaire et sortie analogique, tel que chaque symbole sortant du canal est la somme du symbole émis $x(t)$ et d'un bruit Gaussien centré de moyenne nulle $\mu = 0$ et variance constante la figure 2-4 représente le bruit blanc gaussien en fonction de temps et en fonction de densité de probabilité $[\sigma^2 = \frac{N_0}{2}]$ [41] [37]. La densité de probabilité est donnée par l'équation :

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.2)$$

Où :

X : est la variable aléatoire représentant une réalisation spécifique du bruit gaussien.

μ : est la moyenne du bruit gaussien, qui est $\mu=0$ pour un bruit AWGN centré.

σ^2 : est la variance du bruit gaussien, qui est $\sigma^2 = \frac{N_0}{2}$ pour le bruit AWGN.

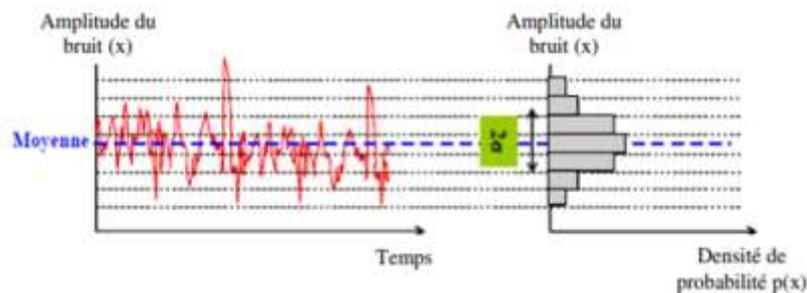


Figure 2- 4 : Représentation temporelle d'un bruit gaussien et distribution statistique de son amplitude [37]

Le signal à la sortie du canal est donné par :

$$y(t) = x(t) + n \quad (2.3)$$

Où :

- N : le bruit AWGN.
- $y(t)$: le signal de sortie
- $x(t)$: le signal d'entrée.

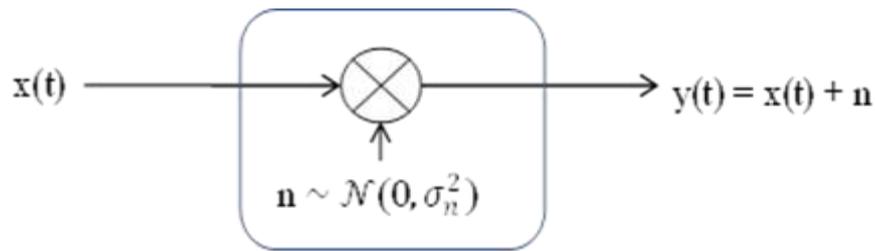


Figure 2- 5: Canal à bruit AWGN

- Canal a trajets multiples

L'évanouissement dans un canal de transmission se produit en raison d'interférences destructives entre les diverses propagations du signal provenant des multiples trajets qu'il emprunte. La figure 2-6 illustre ce phénomène d'évanouissement par trajets multiples qui est peut-être causé par des effets tels que la réflexion, la diffraction et la dispersion, qui affectent gravement la propagation des signaux dans la transmission sans fil [42].

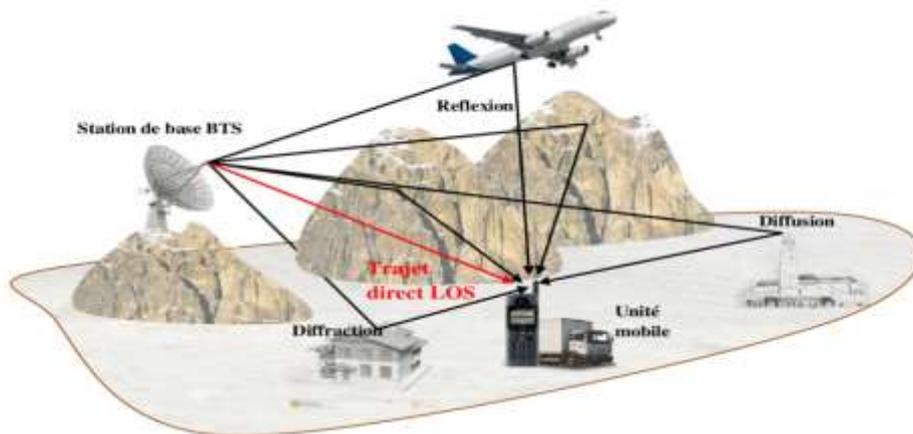


Figure 2- 6: Propagation par trajets multiples [42]

Dans le cas des évanouissements rapides (à petite échelle), on suppose que le signal reçu varie très peu ou pas du tout sur la durée d'un symbole. En prenant en compte le bruit blanc additif gaussien, le signal à la sortie d'un canal à évanouissements lents comportant N trajets multiples peut être exprimé comme suit :

$$y(t) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n x(t + \tau_n) + n \quad (2.4)$$

Où :

- $y(t)$: représente le signal reçu à l'instant t .

- $x(t)$: signal transmis.
- N : le bruit AWGN
- τ_n : retard du $n^{\text{ième}}$ trajet
- a_n : atténuation complexe du $n^{\text{ième}}$ trajet.
- N : nombre de trajets multiples.

Le signal reçu est échantillonné à des instants discrets k , ce qui donne le signal observé y_k .

Où

y_k : Représente le signal observé à l'instant kT , où T est la période d'échantillonnage.

$$y_k = \sum_{l=0}^{L-1} a_l s_{k-\tau_l} + n_k \quad (2.5)$$

a_l : Atténuation complexe du $l^{\text{ième}}$ trajet à l'instant kT

n_k : Bruit AWGN à l'instant kT .

- **Évanouissements de Rayleigh et Rice**

L'environnement de propagation d'un canal sans fil dépend des conditions de propagation (LOS ou NLOS), tandis que le bruit AWGN s'ajoute au signal quel que soit l'environnement, Ces modèles permettent de caractériser statistiquement le canal de transmission et d'analyser les performances des systèmes de communication sans fil[43].

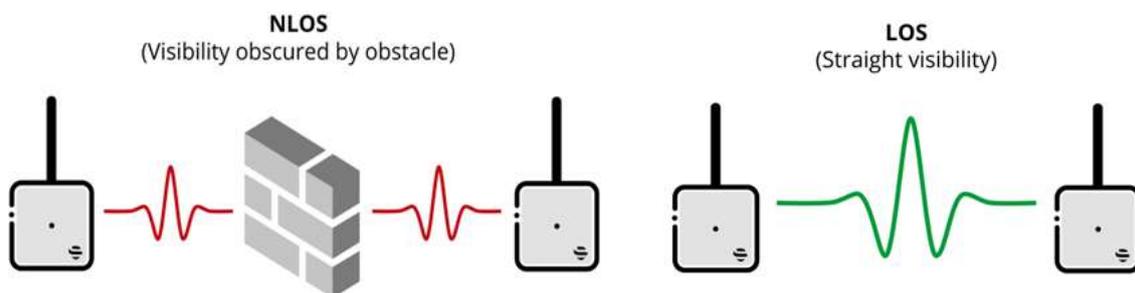


Figure 2- 7: Propagation multi-trajet NLOS_ LOS [43]

- ❖ **Canal de Rayleigh**

La distribution de Rayleigh utilisée pour modéliser le signal reçu dans un environnement de propagation sans fil en conditions NLOS (Non Line-Of-Sight). Ce

modèle s'applique lorsqu'il n'y a pas de trajet direct dominant entre l'émetteur et le récepteur, et que le signal reçu résulte de la somme d'un grand nombre de trajets indirects issus de réflexions multiple[43].

$$Y(t) = L(t)x(t) + n \quad (2.6)$$

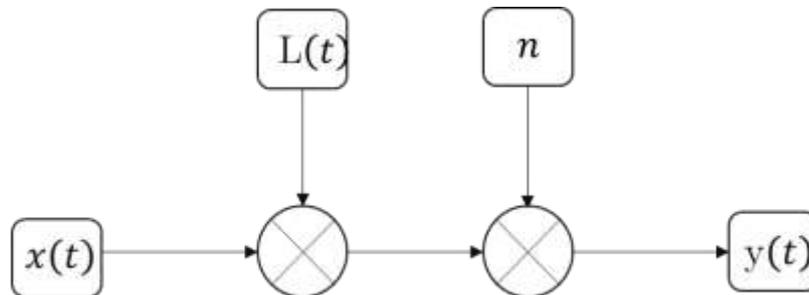


Figure 2- 8: Canal de Rayleigh

La loi de Rayleigh avec une variance $\sigma_{a_l}^2$ et sa densité de probabilité est de la forme :

$$p(a_l) = \frac{a_l}{\sigma_{a_l}^2} e^{-\frac{a_l^2}{2\sigma_{a_l}^2}} \quad (2.7)$$

Avec :

$$a_l = \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2} \quad (2.8)$$

Où :

$x(t)^2$ et $y(t)^2$ Deux variables gaussiennes.

❖ Canal de Rice

La distribution de Rice utilisée pour modéliser le signal reçu dans un environnement de propagation sans fil en conditions LOS (Line-Of-Sight). Cette distribution de Rice est définie de manière à prendre en compte la présence de multiples trajets indirects et un trajet direct, ce qui reflète des conditions de propagation réalistes où plusieurs chemins de propagation contribuent au signal reçu [44].

$$p(a_l) = \frac{a_l}{\sigma_{a_l}^2} e^{-\frac{a_l^2 + \zeta^2}{2\sigma_{a_l}^2}} I_0\left(\frac{a_l \zeta}{\sigma_{a_l}^2}\right) \quad (2.9)$$

Où :

- ζ est un paramètre de non-centralité dû au trajet direct et $I_0(x)$ représente la fonction de Bessel modifiée d'ordre 0.

➤ Effet Doppler

Lorsque l'émetteur et le récepteur se déplacent l'un par rapport à l'autre avec une vitesse radiale v_m constante, le signal reçu subit un décalage de fréquence constant appelé effet Doppler, ce décalage est proportionnel à la vitesse radiale et à la fréquence porteuse du signal une explication précise du fonctionnement de l'effet Doppler illustré dans la figure 2-9 [44].

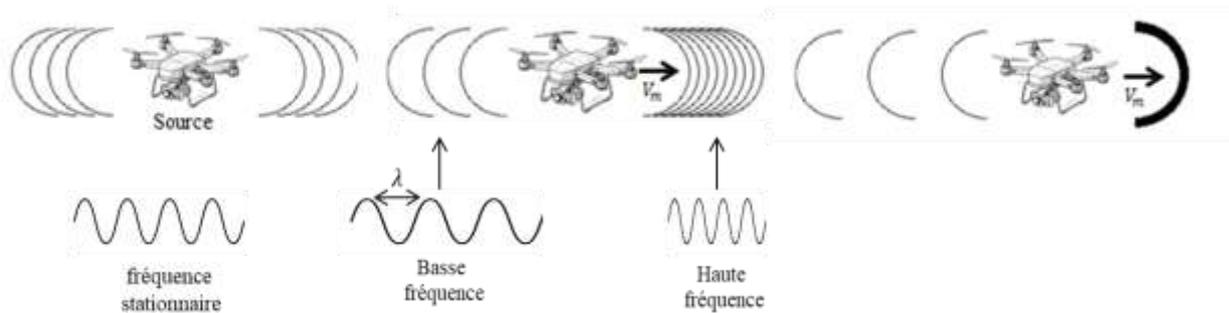


Figure 2- 9: Schéma du l'effet doppler

• Propagation a trajet unique

Dans le cas d'une propagation à trajet unique avec une distance (d) entre l'émetteur et le récepteur qui varie au cours du temps, avec f_t la fréquence émise, f_r la fréquence reçue, c la vitesse de la lumière $C = 3 \times 10^8$, v_m la vitesse du récepteur que l'on considère mobile, et θ l'angle d'arrivée de l'onde émise. L'expression de la fréquence Doppler f_d est :

$$f_d = f_t \frac{v_m}{c} \cos(\theta) \text{ et } f_r = f_t + f_d \quad (2.10)$$

Lorsque le récepteur se déplace vers l'émetteur, avec un angle $(\theta) = 0$, donc on a une fréquence Doppler maximale :

$$f_{d_{max}} = f_t \frac{v_m}{c} \quad (2.11)$$

• Propagation a trajet multiple

Dans le cas d'une propagation à trajets multiples, on reçoit plusieurs fréquences de décalage Doppler en fonction des différents angles θ_n d'arrivée des n trajets considérés.

Chaque fréquence Doppler f_{d_n} associée au $n^{i\text{-ème}}$ trajet est calculée par :

$$f_d = f_t \frac{v_m}{c} \cos(\theta_n) \quad (2.12)$$

Figure 2- 10 : Paramètres de l'effet Doppler

➤ **Impact des bruits sur les canaux de transmission**

Lorsqu'on évalue l'impact des bruits sur les canaux de transmission, deux mesures importantes à considérer sont le BER (Bit Error Rate) et le SNR (Signal to Noise Ratio).

• **Rapport signal sur bruit (SNR)**

Le rapport signal sur bruit (SNR) est une mesure cruciale pour évaluer l'impact du bruit sur la qualité d'un signal de transmission et la sensibilité d'un dispositif pour une densité spectrale de bruit donnée. Il est crucial pour les signaux analogiques car un SNR faible indique une forte dégradation par le bruit, rendant difficile l'élimination de cette influence. Un SNR élevé assure que le signal reçu est fidèle au signal transmis, Il est défini comme le rapport entre la puissance du signal utile P_s et la puissance du bruit N [40].

$$SNR = \frac{P_s}{N} \quad (2.13)$$

Le SNR est exprimé en décibels (dB) pour faciliter les comparaisons et les calculs, à l'aide de la formule [40]:

$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{N} \right) \quad (2.14)$$

Et dans les signaux numériques : Le rapport signal sur bruit par bit $\frac{E_b}{N_0}$ représentant l'équilibre entre l'énergie par bit (E_b) et la densité spectrale de puissance du bruit (N_0). Cette valeur est directement corrélée au taux d'erreur binaire (BER)[40].

$$SNR(dB) = \frac{E_b}{N_0} \quad (2.1)$$

• **Taux d'erreur binaire (BER)**

Le taux d'erreur binaire (BER) est une mesure de la qualité d'une transmission numérique, il représente le pourcentage d'erreurs de bits détectées par le récepteur par rapport au nombre total de bits transmis. Un BER faible indique que la transmission est de haute qualité tandis qu'un BER élevé indique que la transmission est mauvaise.

$$\text{BER}(\%) = \frac{\text{nombre de bits erronés}}{\text{nombre total de bits recus}} \quad (2.15)$$

Le SNR et le BER sont inversement liés, ce qui signifie que lorsque le SNR augmente↑, le BER diminue↓ cette relation inverse étant illustrée par la figure 3 – 12 [40].

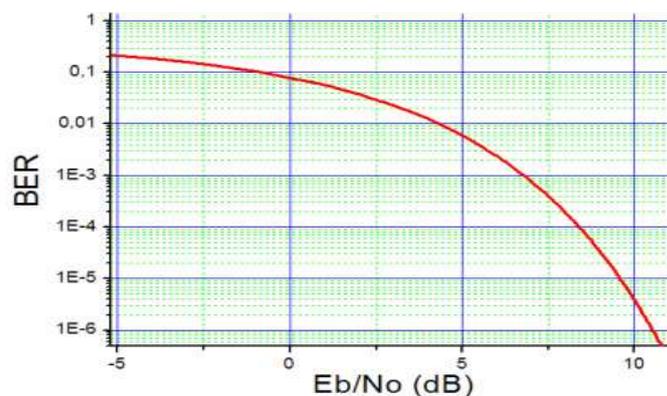


Figure 2- 11: Taux d'erreur binaire en fonction du rapport signal à bruit [40]

- **Capacité du Canal de Transmission**

La capacité du canal de transmission C représente le débit maximal auquel des données peuvent être transmises de manière fiable, mesurée en bits par seconde (bps). Cette capacité dépend de la largeur de bande B_s du canal et du rapport signal sur bruit (SNR), le bruit affecte directement le SNR, qui évalue la puissance du signal par rapport à celle du bruit, Une augmentation du le SNR, améliore la capacité du canal en réduisant le taux d'erreur binaire (BER), permettant ainsi une transmission plus fiable des données[39].

$$C = B_s \log_2(1 + \text{SNR}) \quad (2.16)$$

2.3 Étalement de spectre

Les techniques d'étalement de spectre (Spread Spectrum) sont des méthodes de transmission des signaux qui sont repose sur le principe d'élargissement de la bande

spectrale d'un signal et la répartition de l'énergie du signal à émettre sur une bande de fréquence plus large que celle réellement nécessaire à sa transmission, le principe fondamental de l'étalement de spectre implique la multiplication du signal d'information par des séquences pseudo-aléatoires (Codes PN) lors de l'émission, ces codes PN agissant comme le clé de codage. Le récepteur doit produire la même séquence de code utilisée dans l'émission pour désétalement le signal et récupération précise de l'information transmise. La figure 2-12 représente le fonctionnement de cette technique[45].

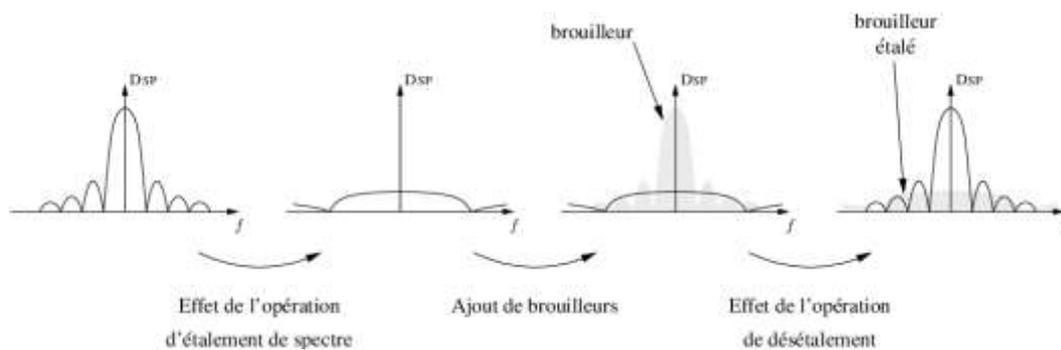


Figure 2- 12 : Principe d'étalement de spectre

2.4 Techniques d'étalement de spectre

Pour un système de communication à l'étalement de spectre, plusieurs techniques peuvent être utilisées. Pour réaliser l'opération d'étalement de spectre, il existe 3 principales techniques :

- Étalement de Spectre à Séquence Directe (DSSS)
- Étalement par saut d'intervalle de temps (THSS)
- Étalement de spectre par sauts de fréquences (FHSS)

➤ Étalement de Spectre à Séquence Directe (DSSS)

Dans la technique d'étalement de spectre par séquence directe (DSSS), le principe repose sur la multiplication (XOR), entre chaque bit d'information en format (0 et 1) de durée T_b par un code pseudo-aléatoire PN (Pseudo Random Noise Code) de durée nT_c , la figure 2-13 représente cette opération, qui équivaut à une multiplication de

signaux en format -1 et 1, lequel dispose d'une séquence de "chipping" (code) qui détermine comment l'information est codée et décodée. Ainsi le signal d'information passe d'un débit D_d a un débit D_c et voit son spectre élargi avec un gain d'étalement[45].

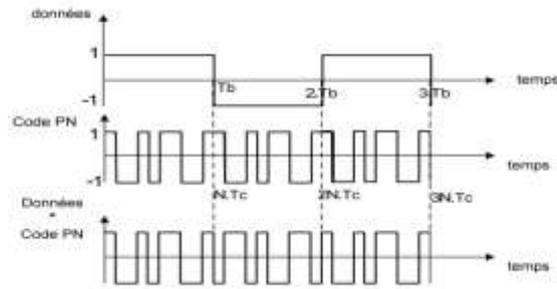


Figure 2- 13 : Etalement de spectre par séquence directe DSSS [45]

➤ **Etalement par saut d'intervalle de temps (THSS)**

Dans la technique d'étalement de spectre par saut d'intervalle de temps (THSS), le principe repose sur la division du temps de transmission en plusieurs intervalles appelés trames. Chaque trame est ensuite subdivisée d'une fenêtre de transmission qui est composée de M périodes de transmission unitaires, appelées (slots) comme illustré dans la figure 2-14. Pendant une trame, un seul slot est modulé avec le message. Une fois toutes les trames nécessaires pour contenir le message binaire constituées, la transmission est effectuée[45].

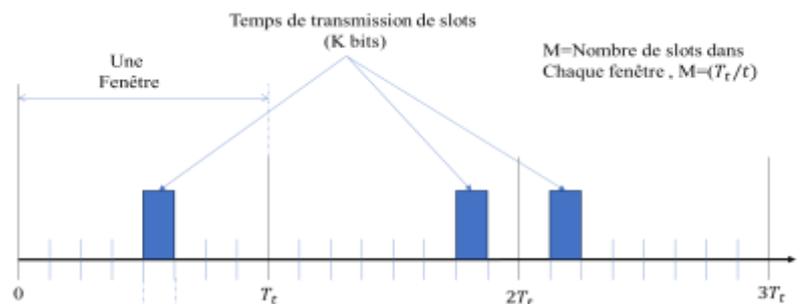


Figure 2- 14 : Etalement de spectre avec saut en temps [45]

➤ **Etalement de spectre par sauts de fréquence (FHSS)**

Dans la technique d'étalement de spectre par sauts de fréquence (FHSS), le principe consiste à occuper tout le spectre de fréquence avec un ensemble de canaux. Cependant la fréquence utilisée change périodiquement selon une séquence pseudo-aléatoire connue

et synchronisée entre l'émetteur et le récepteur. La figure 2-15 représente un schéma de fonctionnement des sauts de fréquence. Ce saut de fréquence peut être soit rapide (Fast FHSS) ou lent (Slow FHSS) selon que le rythme des sauts par rapport au rythme des symboles.

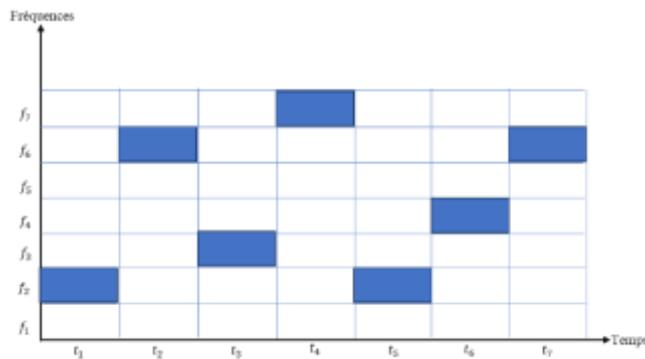


Figure 2- 15: Principe de l'étalement de spectre par saut de fréquence

2.5 Évaluation des techniques d'étalement de spectre

Le choix de la technique d'étalement de spectre dépend des priorités spécifiques de l'application en termes de sécurité, robustesse, résilience, l'efficacité spectrale. Une analyse approfondie des exigences et des contraintes spécifiques de l'application permettra de déterminer la méthode la plus efficace. Le tableau 2-1 ci-dessous présente les différences entre ces techniques.

	DSSS	THSS	FHSS
Principe	Un spectre étalé à séquence directe	Un spectre étalé à sauts de temporels	Un spectre étalé à sauts de fréquence
Bande de fréquence	Transmet les données en utilisant une bande de fréquences plus large.	N'est pas directement associée à une bande de fréquences spécifique car elle est plus axée sur la modulation temporelle	Transmet les données à l'aide d'une porteuse à bande étroite qui saute entre différents canaux de fréquence.

Résistant aux interférences	Plus vulnérable aux interférences car il utilise une bande de fréquences plus large.	Plus résistant aux interférences grâce aux sauts de temps	Plus résistant aux interférences car il utilise des sauts de fréquence, ce qui rend difficile l'interception du signal.
Susceptibilité	Plus sensible aux évanouissements par trajets multiples car il utilise une bande de fréquences plus large	Moins sensible à l'évanouissement par trajets multiples	Moins sensible à l'évanouissement par trajets multiples
Vitesse de transmission	Débits de transmission élevés (jusqu'à 11 Mbps).	Faibles taux de transmission (jusqu'à 3 Mbps)	Faibles taux de transmission (jusqu'à 3 Mbps).
Efficacité	Moins efficace car il utilise une bande de fréquences plus large.	Généralement moins efficace en termes d'utilisation de la bande passante	Généralement plus efficace que DSSS et THSS en termes d'utilisation de la bande passante.
Domaine d'utilisation	Réseau sans fil Wi-Fi (IEEE 802.11b), Bluetooth	Télécommunications militaires	Télécommunications militaires, Réseau sans fil Bluetooth, Wi-Fi (IEEE 802.11b)

Tableau 2- 1: Évaluation des techniques d'étalement de spectre[46]

Dans les réseaux sans fil, ces techniques de communication sont efficaces et largement utilisées. En ce qui concerne la sécurisation des transmissions, la technique FHSS offre une excellente robustesse contre les interférences. FHSS fonctionne en changeant rapidement la fréquence porteuse sur une large gamme de fréquences de manière pseudo-aléatoire. Cette méthode rend les communications moins sensibles aux interférences et assure que seuls les dispositifs autorisés ont connaissance de cette séquence.

2.6 Etalement de spectre par sauts de fréquence (FHSS)

Le système FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum) est une technique utilisée dans les communications sans fil où la fréquence porteuse f_c du signal est modifiée de manière pseudo-aléatoire. Un synthétiseur de fréquence contrôle cette modification et sa sortie est multipliée aux données modulées selon une séquence prédéfinie. Cette séquence est contrôlée par un générateur de séquence pseudo-aléatoire et guide le saut de la fréquence porteuse parmi un ensemble de fréquences k disponibles avec un gain qui peut être défini par :

$$G_p = \frac{\text{Largeur de bande RF}}{\text{Largeur de bande du message modulé}} = \frac{k \times \Delta f}{\Delta f} = k. \quad (2.17)$$

$$\Delta f = (f_{max} - f_{min}) \quad (2.18)$$

Où :

- K : le nombre de fréquence disponible.
- Δf : L'espace séparant deux porteuses adjacentes.

Dans un système FHSS, la durée pendant laquelle la fréquence porteuse reste constante avant de sauter vers une nouvelle fréquence est définie par un élément de base appelé "chip" qui est généralement notée T_c , et cette séquence de sauts est répétée périodiquement. Cette technique permet d'étaler le spectre du signal sur une large bande de fréquences B portant l'information, améliorant ainsi la résilience contre les interférences et les brouillages, tout en assurant la confidentialité des communications[45].

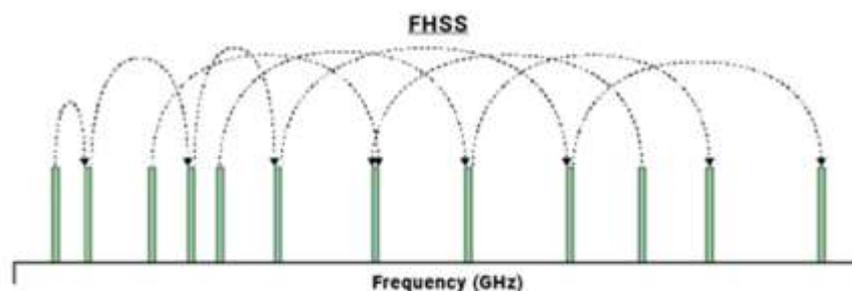


Figure 2- 16: Principe de sauts de fréquence

2.7 Techniques de Partage de la Bande Passante (FDM vs FHSS)

Le FDM (Frequency Division Multiplexing) et le FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) sont deux techniques de partage de bande passante utilisées pour optimiser l'utilisation du spectre. La figure 2-17 représente la différence entre ces deux techniques.

- **FDM (Frequency Division Multiplexing)** : Divise une large bande passante en plusieurs sous-canaux fixes, chacune alloué à un signal différent, permettant une transmission simultanée mais statique de plusieurs signaux sur la même bande de fréquence.
- **FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)** : Transmet le signal en sautant de manière pseudo-aléatoire entre différentes fréquences porteuses, selon une séquence partagée entre l'émetteur et le récepteur ce qui améliore la robustesse et la sécurité des transmissions en réduisant les interférences.

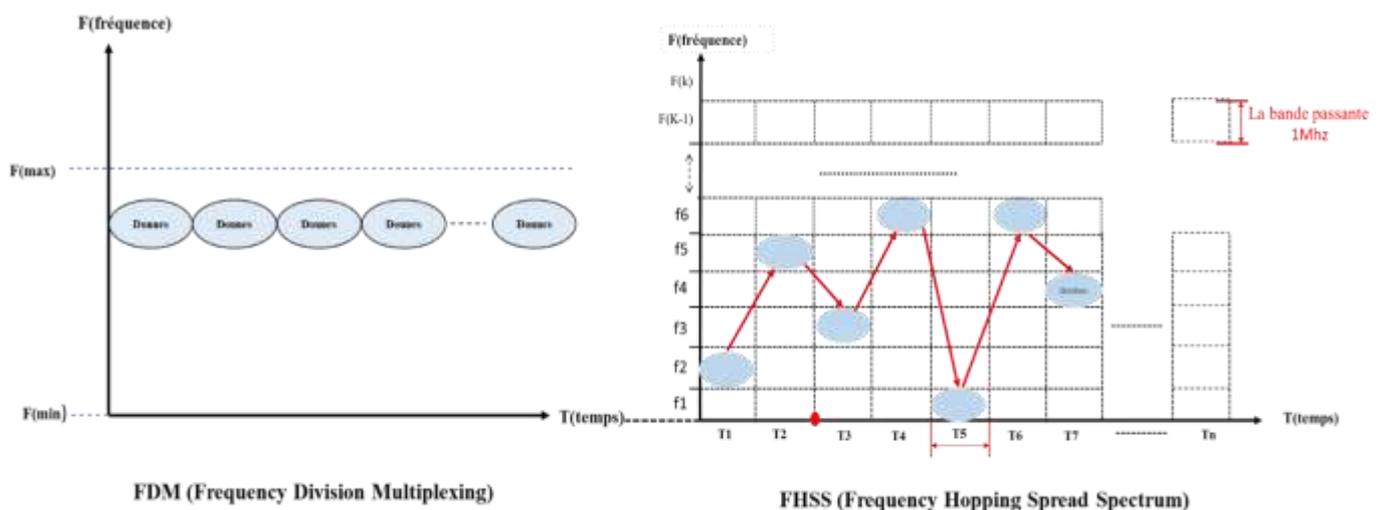


Figure 2- 17: FDM vs FHSS

2.8 Architecture de la technique d'étalement de spectre FHSS

Un système FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum) utilise une technique de transmission dans laquelle la fréquence porteuse du signal change rapidement et de manière pseudo-aléatoire selon une séquence prédéterminée, synchronisée entre

l'émetteur et le récepteur. Cela permet d'étaler le signal sur une large bande de fréquences.

Le diagramme présenté dans la figure 2-18 illustre l'architecture de la technique d'étalement de spectre par saut de fréquence (FHSS).

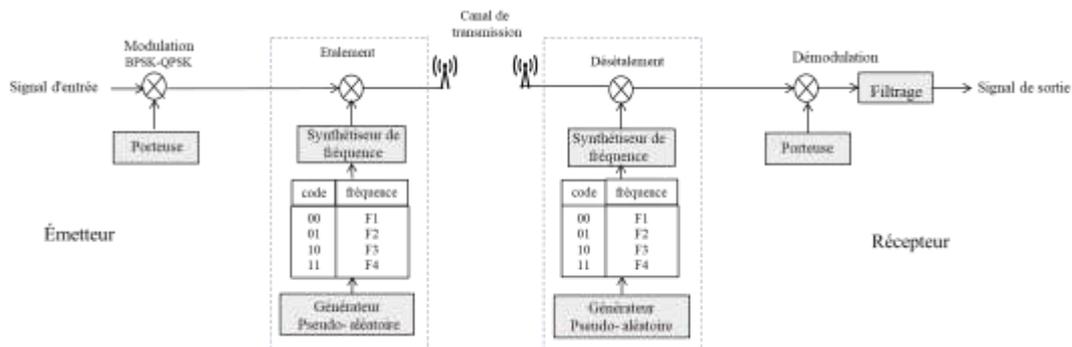


Figure 2- 18 : Diagramme de la technique d'étalement de spectre FHSS

➤ Architecture de l'émetteur

L'architecture de l'émetteur représentée dans la figure 2-19, d'un système FHSS désigne l'ensemble des composants et des processus mis en œuvre pour générer, moduler et transmettre un signal à travers des fréquences changeantes de manière pseudo-aléatoire [47].

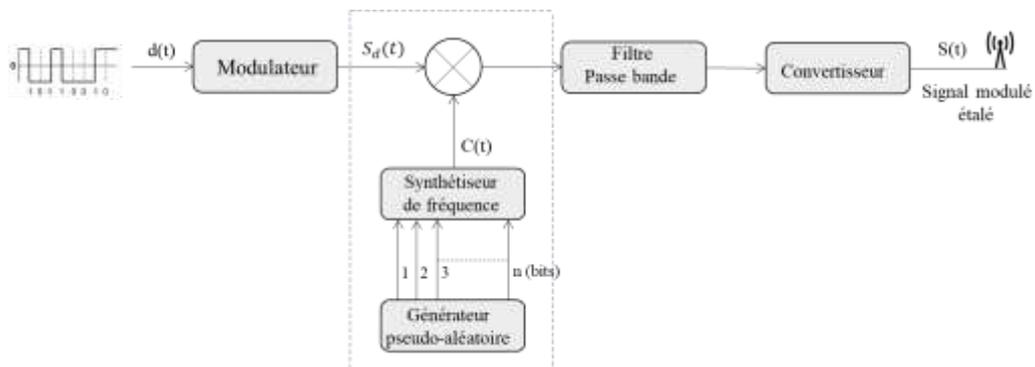


Figure 2- 19 : Architecture de l'émetteur

Cette architecture peut être décomposée en deux parties :

- **Modulation des Données :**

Cette partie concerne la modulation classique des données, telles que la modulation BPSK, QPSK, FSK, qui sont bien adaptées à la technique d'étalement de spectre FHSS, et aboutit à la formation du signal modulé.

L'équation du signal modulé $S_d(t)$:

$$S_d(t) = \sum_k \text{Cos}(2\pi f_c + \varphi_k) r(t - kT) \quad (2.19)$$

$S_d(t)$: est le signal modulé.

f_c : est la fréquence de la porteuse.

$R(t)$: est la forme d'onde de base, souvent une impulsion rectangulaire de durée T .

T est la durée de chaque symbole.

- **Génération des Fréquences Porteuses avec un Générateur de Codes Pseudo-aléatoire**

Un générateur de codes pseudo-aléatoires pilote un synthétiseur de fréquence codé sur n-bits. Ce synthétiseur est conçu pour générer les fréquences porteuses. Il permet d'obtenir $k=2^n$ fréquences possibles, ou chaque séquence de n-bits correspond à une fréquence unique Le signal $S_d(t)$ est modulé par le signal de fréquence porteuse $C(t)$ produit par le synthétiseur. Le signal en fréquence intermédiaire résultant $S(t)$ est ensuite filtré à l'aide d'un filtre passe-bande, Enfin, il est converti en un signal radiofréquence (RF) centré autour de la fréquence f_{RF} [47].

➤ **Architecture du récepteur**

L'architecture du récepteur représentée dans la figure 2-20, d'un système FHSS est conçue pour désétalement et démoduler efficacement un signal transmis en utilisant des fréquences changeantes de manière pseudo-aléatoire en assurant la synchronisation avec la même séquence pseudo aléatoire que l'émetteur[47].

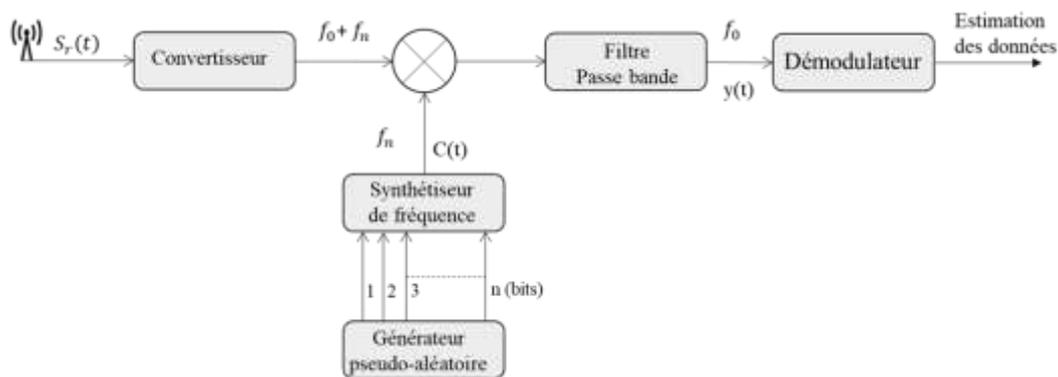


Figure 2- 20: Architecture du récepteur FHSS

2.9 Techniques de modulation de FHSS

Les systèmes FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum) peuvent utiliser plusieurs techniques de modulation pour transmettre les données :

➤ Objectif de la modulation

La modulation est un processus essentiel dans la transmission de signaux sans fils, son objectif principal est d'adapter le signal à transmettre au canal de communication disponible, souvent en modifiant un ou plusieurs paramètres de l'onde porteuse, tels que l'amplitude, la fréquence ou la phase, cette adaptation permet d'optimiser l'efficacité de la transmission et de réduire les interférences, assurant ainsi une meilleure qualité de la communication[45].

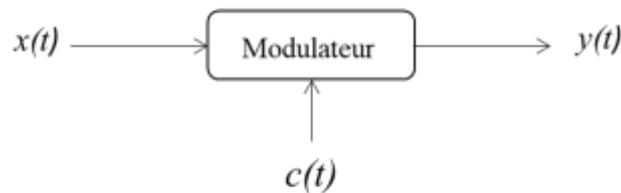


Figure 2- 21: Schéma bloc d'un modulateur

La porteuse est de forme sinusoïdale :

$$C(t) = A_C \cos(\omega_c t + \varphi_k) \quad (2.20)$$

Avec :

A_C : l'amplitude de la porteuse.

$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi}$: la fréquence de la porteuse.

φ_k : La phase associée au $k^{ième}$ symbole S_k .

➤ Modulation PSK

Dans la modulation PSK, la phase φ_k de la porteuse sinusoïdale est modifiée pour représenter chaque symbole S_k (0 et 1) du signal numérique, une phase spécifique peut représenter le bit (1), tandis qu'une autre phase représente le bit (0) sur l'intervalle k, et l'amplitude et la fréquence de la porteuse restent fixes[45].

Dans les procédés de modulation M-aire, l'information est transmise en utilisant un paramètre qui peut prendre M valeurs différentes. Cela signifie que chaque état de

modulation peut représenter un symbole distinct. À chaque symbole est associé un mot de ‘n bits’, Les formes courantes de PSK incluent BPSK (Binary PSK), QPSK (Quadrature PSK), 8-PSK, etc.[45]

$M=2^n$: le nombre total d'états possibles dans une modulation M-aire.

$N=\log_2(M)$: le nombre de bits pour représenter chaque symbole.

➤ Modulation B-PSK

B-PSK est la forme la plus simple de PSK, en utilisant deux phases φ_k de l'intervalle $k= [0 ; \pi]$. Cela représente directement le bit binaire 0 et 1. Le signal modulé PSK s'écrit[45] :

$$u(t) = \sum_k \text{Cos}(2\pi f_c + \varphi_k) r(t - kT) \quad (2.21)$$

Où :

- $u(t)$ Est le signal modulé.
- f_c Est la fréquence de la porteuse.
- $R(t)$ est la forme d'onde de base, souvent une impulsion rectangulaire de durée T .
- T est la durée de chaque symbole.

Les phases φ_k prennent les valeurs avec un constellation suivantes :

- $\varphi_k = \pi$ pour un bit binaire 0
- $\varphi_k = 0$ pour un bit binaire 1

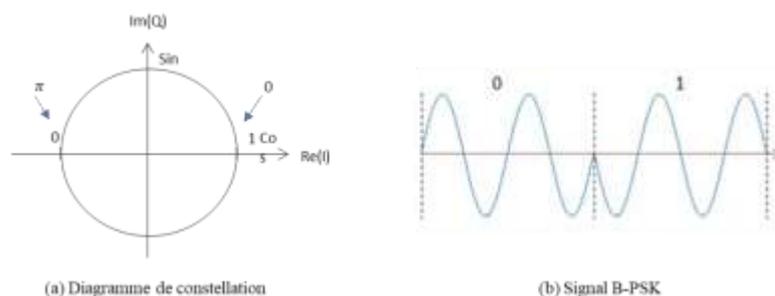


Figure 2- 22 : Modulation B-PSK

➤ Modulation Q-PSK

Dans la modulation Q-PSK, la phase φ_k de la porteuse sinusoïdale est modifiée pour représenter chaque symbole S_k du signal numérique, chaque symbole en Q-PSK

correspond a une paire de bits [00,01,10,00] est chaque paire est transmis avec une partie réelle et une partie imaginaire, utilisant ainsi deux porteuses sinusoidales $\text{Cos}(2\pi f_c + \varphi_k)$ et $\text{Sin}(2\pi f_c + \varphi_k)$ déphasés de $\frac{\pi}{2}$ en quadrature , avec une phase distincte pour chaque combinaison[44] .

Le signal modulé Q-PSK s'écrit :

$$u(t) = \sum_k r(t - kT) [\text{Cos}(2\pi f_c + \varphi_k)] \quad (2.22)$$

$$U(t) = \sum_k r(t - kT) [\text{Cos}(2\pi f_c) \text{cos}(\varphi_k)] - [\text{Sin}(2\pi f_c) \text{Sin}(\varphi_k)] \quad (2.23)$$

En séparant les termes en cosinus et sinus :

A partir de l'expression $u(t)$ nous avons deux termes distincts :

$$I(t) = \sum_k r(t - kT) \text{cos}(\varphi_k) \quad (2.24)$$

$$Q(t) = \sum_k r(t - kT) \text{sin}(\varphi_k) \quad (2.25)$$

Où :

$I(t)$: la composante en phase

$Q(t)$: la composante en quadrature

L'expression du signal modulé $u(t)$ en Q-PSK peut être écrite sous la forme :

$$U(t) = I(t) \text{Cos}(2\pi f_c) - Q(t) \text{Sin}(2\pi f_c) \quad (2.26)$$

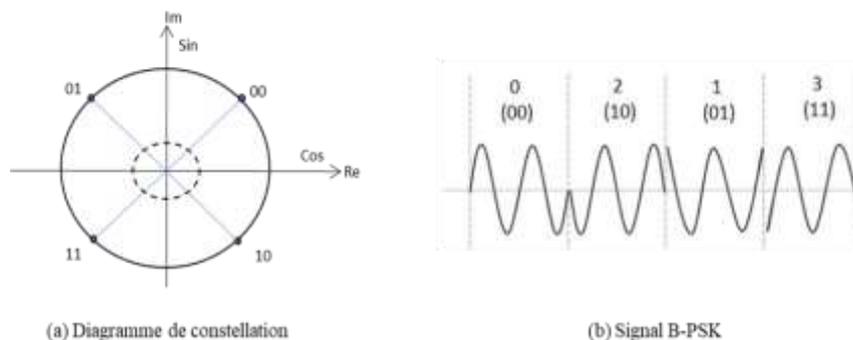


Figure 2- 23: Modulation Q-PSK

2.10 Génération des Codes FHSS

Les codes FHSS reposent sur l'utilisation de séquences pseudo-aléatoires pour déterminer la séquence de sauts de fréquence. Ces séquences sont générées à l'aide d'algorithmes spécifiques, tels que les registres à décalage à rétroaction linéaire (LFSR).

➤ **Générateurs de nombres pseudo-aléatoires (PRNGs)**

Les générateurs de nombres pseudo-aléatoires (PRNG) sont des algorithmes déterministes qui génèrent une séquence de nombres présentant certaines propriétés au hasard. Cependant, leurs sorties ne sont pas entièrement aléatoires car elles dépendent d'un état initial déterministe appelé "graine" (seed). Un PRNG produit toujours la même séquence de nombres à partir d'une graine donnée. Bien que les nombres générés aient l'air aléatoire. Les PRNG sont couramment utilisés dans diverses applications, telles que les simulations, la cryptographie, et les systèmes de communication à étalement de spectre.

Les générateurs de nombres pseudo-aléatoires PRNGs basés sur les méthodes de congruence linéaire (Linear Congruential) sont des algorithmes simples et efficaces pour générer des séquences de nombres pseudo-aléatoires[48].

La séquence de nombres aléatoires X_n est créée selon la formule suivante :

$$X_{n+1} = (aX_n + c) \text{ Mod } m \tag{2.27}$$

Où :

X_n : est le $n^{\text{ème}}$ nombre dans la séquence.

A : est le multiplicateur.

M : est le modulo, qui est utilisé pour réduire la valeur résultante à un entier entre 0

Les paramètres (a , c , et m) sont des constantes prédéfinies.

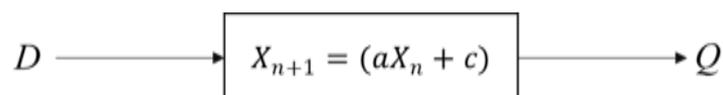


Figure 2- 24: Algorithme de PRNG

➤ **Registres à décalage à rétroaction linéaire (LFSR)**

Les générateurs de nombres pseudo-aléatoires basés sur les registres à décalage avec rétroaction linéaire (LFSR - Linear Feedback Shift Register) sont décrits dans la théorie des séquences à registres à décalage comme la figure 2-25 illustre. Ces PRNG sont constitués d'un registre de n bits et d'une boucle de rétroaction intégrant une fonction linéaire des bits comme indiqué dans la figure 2-26. À chaque décalage vers la droite, le bit b_1 est ajouté à la séquence générée, et un nouveau bit est créé en combinant tous les bits du registre via une fonction de rétroaction linéaire[48].

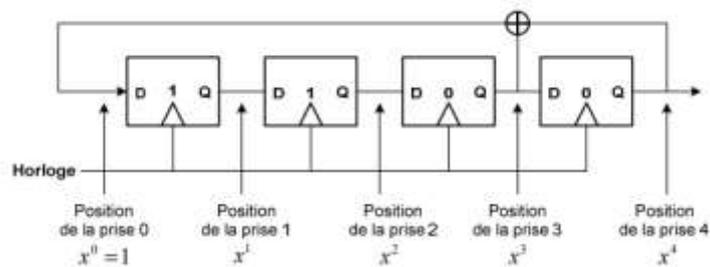


Figure 2- 25: PRNG avec un registre a décalage [48]

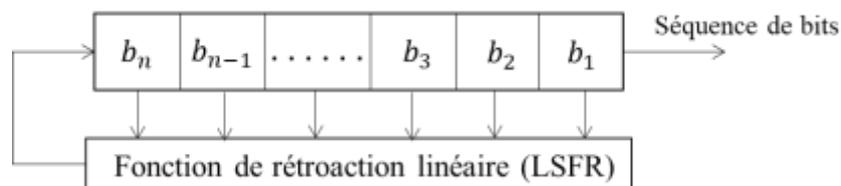


Figure 2- 26: Principe de fonctionnement d'un registre à décalage LSFR [48]

Un LFSR peut générer une séquence de bits de période maximale $2^n - 1$ (L'état 0 est exclu car il ne permet pas de changement d'état), où n : est le nombre de bascules. Par exemple, si les bits $b_1, b_2, b_3, b_4, \dots, b_n$ sont les entrées de la fonction de rétroaction, Le polynôme caractéristique du LFSR est fourni sous forme de représentation binaire[48].

$$p(x) = 1 + x + x^1 + x^2 + \dots + x^{n-1} + x^n \quad (2.28)$$

➤ Codes d'étalement de spectre

L'étalement de spectre par séquence directe consiste à multiplier les données par un code binaire appelé PN-code (pseudo-noise code). Ces séquences pseudo-aléatoires possèdent des propriétés particulières[49].

- Faible autocorrélation

La fonction d'autocorrélation d'une séquence PN, $R_c(\tau)$, représente la similarité entre la séquence et sa version décalée de τ . Il est essentiel que les séquences PN aient une faible autocorrélation pour $\tau \neq 0$. Cela signifie que la séquence est "décorrélée" d'elle-même à des décalages temporels non nuls[49].

$$R_c(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} C(u) \cdot C(u - \tau) \cdot du = 0 \quad , \quad \forall \tau \quad (2.29)$$

$$R_c(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} C(u) \cdot C(u - \tau) \cdot du = 0 \quad , \quad \forall \tau \quad (2.30)$$

- **Faible inter corrélation**

La fonction d'inter corrélation entre deux séquences PN distinctes, $R_{c_i c_j}(\tau)$, représente la similarité entre ces séquences décalées de τ . Il est important que les séquences PN aient un faible inter corrélation pour toutes les paires de séquences et pour tous les décalages temporels τ [49].

$$R_{c_i c_j}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} C(u) \cdot C(u - \tau) \cdot du = 0 \quad , \quad \forall \tau \quad (2.31)$$

- **Pic d'autocorrélation étroit**

La fonction d'autocorrélation d'une séquence PN à décalage nul, $R_c(0)$, représente l'énergie totale de la séquence. Pour les codes FHSS, il est souhaitable que les séquences PN aient un pic d'autocorrélation étroit et élevé à $\tau = 0$ [49].

$$R_c(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} C(u) \cdot C(u - 0) \cdot du = 1 \quad , \quad \forall \tau \quad (2.32)$$

2.11 Synthétiseur de fréquence dans le FHSS

Dans la technique d'étalement de spectre par saut de fréquence (FHSS), un synthétiseur considéré comme le cœur et la partie la plus critique d'un système FHSS. Le nombre de fréquences et le taux de saut sont indiqués par le type de synthétiseur de fréquence. En fait, le nombre de fréquences et la vitesse de saut sont des paramètres qui définissent les capacités du système. Un synthétiseur de fréquence se divise en deux

types principaux : le synthétiseur de fréquence direct (DFS) et le synthétiseur de fréquence indirect (IFS) [49].

➤ **Synthétiseur de fréquence direct (DFS)**

Le synthétiseur direct de fréquence (DFS) est un type de synthétiseur de fréquence qui utilise des opérations de multiplication, de division et d'addition pour produire une fréquence de sortie.

La figure 2-27 montre le fonctionnement d'un Synthétiseur de fréquence direct. Qu'il est adopté pour les synthétiseurs numériques directs (DDS) qui est la partie critique d'un système FHSS, responsable de la génération rapide des fréquences de saut. Il permet de changer rapidement la fréquence porteuse entre les différents sauts.

L'entrée du DFS est une fréquence initiale (f_0) qui est divisée par un nombre qui est une puissance de 2, puis mélangée à l'une des 2^k fréquences possibles produites par un générateur de spectre. Le générateur de spectre est contrôlé par un ensemble de k bits qui proviennent généralement d'un générateur de séquences. La sortie du mélangeur est filtrée et transmise à l'étape suivante où l'opération est répétée. S'il y a n'étapes et 2^k fréquences par étapes, le nombre total de fréquences produites par le DFS est donné par la formule suivante [49]:

$$M=(2^k)^n=2^{kn} \quad (2.33)$$

Où :

- M est le nombre total de fréquences produites
- K est le nombre de fréquences possibles produites par le générateur de spectre
- N est le nombre d'étages du DDS

La sortie de la deuxième étape sera à nouveau de m fréquences de sortie pour chacune des fréquences d'entrée. Puisqu'il y a m fréquences d'entrée possibles, il y aura

maintenant $M'=2^m$ fréquences de sortie possibles. Celles-ci sont obtenues en prenant chacune des fréquences d'entrée, en la divisant par m et en y ajoutant l'une des fréquences du générateur de spectre[49].

- La largeur de bande totale de la deuxième étape est donnée par :

$$B_s = M' \times f' \quad (2.34)$$

Où :

f' : La séparation entre les fréquences de la sortie de la deuxième étape.

M' : Fréquences de sortie possibles.

La séparation dans l'ensemble final de fréquences peut être exprimée comme suit :

$$f'' = \frac{\Delta f}{2^{k(n-1)}} \quad (2.35)$$

La largeur de bande éventuelle :

$$B = M \times f'' = 2^{kn} \times \frac{\Delta f}{2^{k(n-1)}} = 2^k \times \Delta f \quad (2.36)$$

Δf : La séparation des fréquences dans le générateur de spectre[50].

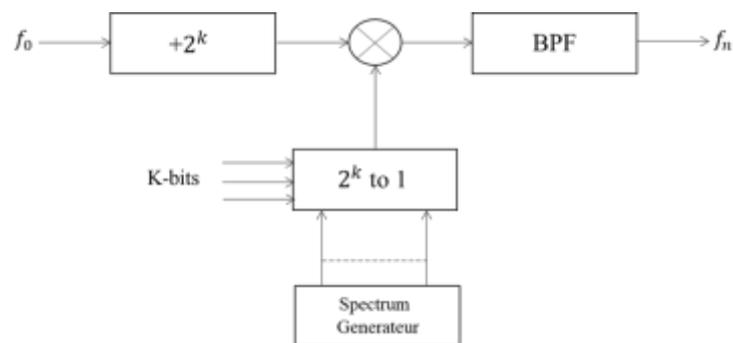


Figure 2- 27: Synthétiseur de fréquence direct (DFS).

➤ Synthétiseur de fréquence indirect (IFS)

Le synthétiseur indirect de fréquence (IFS) utilise une boucle à verrouillage de phase (PLL) pour générer les fréquences de sortie comme le montre la figure 2-28. Ce type de

synthétiseur peut produire un large éventail de fréquences espacées de manière précise. La rétroaction est assurée jusqu'à une valeur prédéterminée. Un quantificateur génère un signal en escalier pour ajuster la fréquence de sortie de l'oscillateur contrôlé en tension (VCO). Il est évident que ce type de synthétiseur a une conception beaucoup plus simple que le type (DFS). Cependant, ce type de synthétiseur donne un taux de saut plus lent puisque la boucle doit être déverrouillée à chaque saut[49].

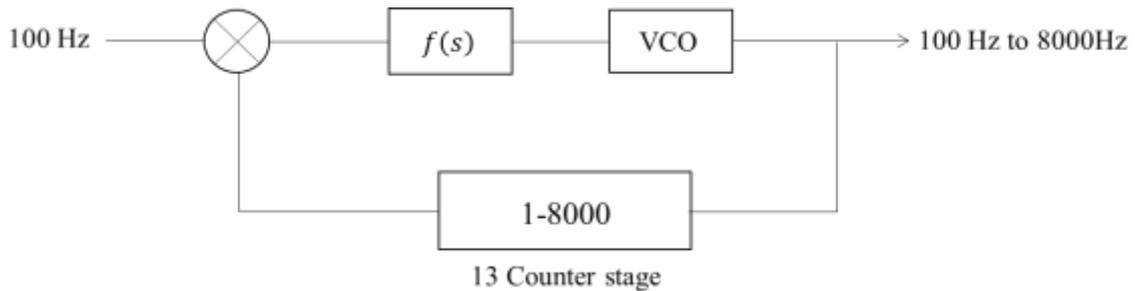


Figure 2- 28: Synthétiseur de fréquence indirect (IFS) [49]

2.12 Synchronisation

La synchronisation est cruciale pour les systèmes à étalement du spectre. Elle consiste à régler le récepteur pour qu'il soit précisément synchronisé avec l'émetteur en termes de code PN (Pseudo Noise) et de débit de symboles (chip-rate). La synchronisation des codes est essentielle pour extraire le signal d'information (signal porteur) et éliminer les signaux indésirables. La perte de synchronisation entre l'émetteur et le récepteur est souvent due à des ambiguïtés de phase de codage et de fréquence porteuse, causées principalement par l'effet Doppler et les retards pendant la transmission et le traitement. La synchronisation doit être rétablie en deux phases : l'acquisition initiale et le suivi continu[49].

➤ Synchronisation initiale (acquisition)

La synchronisation initiale, ou acquisition, se fait souvent avec un corrélateur coulissant. Ce dispositif compare le code reçu avec celui du récepteur pour trouver une correspondance, marquant ainsi la synchronisation.

La corrélation croisée générée par le corrélateur coulissant crée du bruit au niveau du récepteur. Pour réduire ce bruit, un filtre IF pré démodulateur est utilisé. Il est crucial que le corrélateur coulissant fonctionne à une vitesse proche de celle de l'émetteur pour minimiser le bruit et améliorer la synchronisation[49].

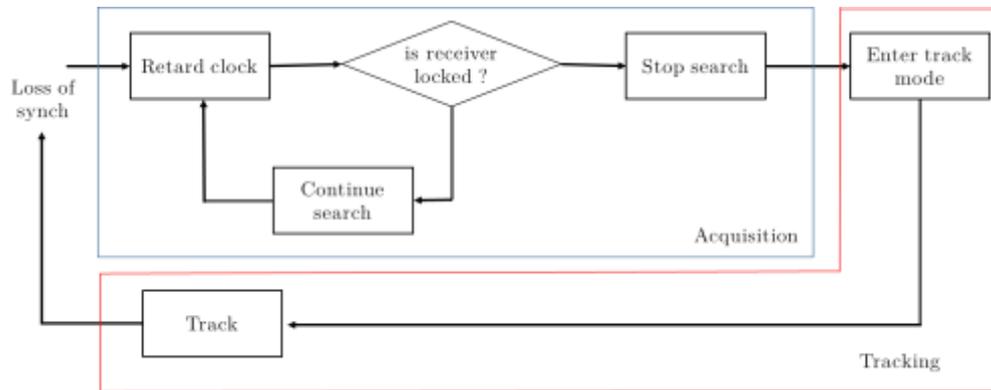


Figure 2- 29: le processus de corrélation coulissante [49]

Pour améliorer la synchronisation, le corrélateur doit fonctionner à une vitesse proche de celle de l'émetteur. Un code de préambule peut accélérer la synchronisation, mais il risque de provoquer des fausses synchronisations et d'être brouillé. Pour éviter cela, le préambule peut être atténué pour le rendre moins détectable par les écouteurs non autorisés[49].

Le principal avantage de cette méthode est sa simplicité de conception, consistant simplement à faire glisser un code avec un autre. Cependant, elle présente des inconvénients, notamment un temps de synchronisation plus long si le code pseudo-noise (PN) est long ou si le degré d'ambiguïté est élevé[49].

➤ Suivi (tracking)

Une fois la synchronisation initiale atteinte, le récepteur doit continuer à suivre le signal entrant pour maintenir cette synchronisation. Pour les systèmes à saut de fréquence (Frequency Hopping ou FH), la technique de suivi Split-bit est utilisée. Cette technique se base sur les changements de forme de l'enveloppe à la sortie du corrélateur du récepteur FH pour décider du suivi[49].

- Si le récepteur est en avance sur l'émetteur, la sortie du corrélateur sera élevée pendant la première partie de la période de saut et faible pendant la seconde.

- Si le récepteur est en retard, la sortie du corrélateur sera faible pendant la première partie et élevée pendant la seconde.

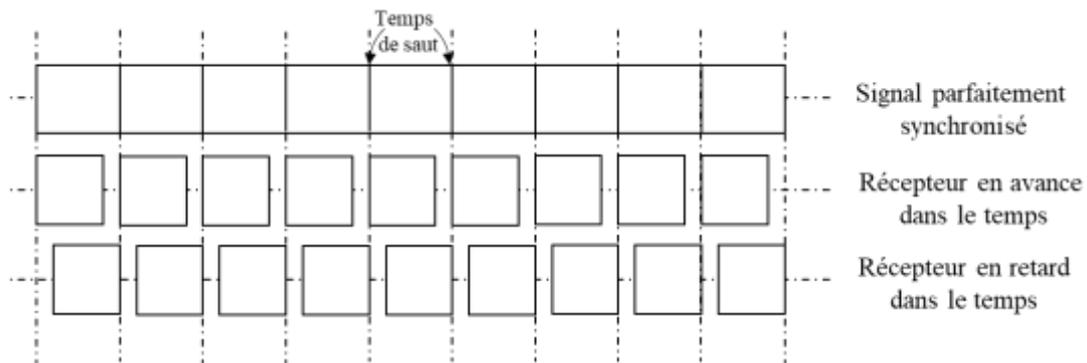


Figure 2- 30 : Illustration de la boucle de suivi Split-Bit

Pour aligner le signal correctement, les deux moitiés du temps de saut sont intégrées et leur contenu énergétique est vérifié. Une boucle ajuste alors le timing du code PN pour que l'énergie soit égale dans les deux moitiés du temps de saut. Ainsi, le récepteur FH maintient la synchronisation avec le signal entrant[49].

2.13 Principe de fonctionnement de FHSS

Le principe de l'étalement de spectre par saut de fréquence (FHSS) repose sur la modulation d'un signal source en utilisant une série de fréquences porteuses f_c différentes. La figure 2-31 fournit une explication du fonctionnement de cette technique, où les fréquences changent de manière pseudo-aléatoire grâce à un générateur PRNG.

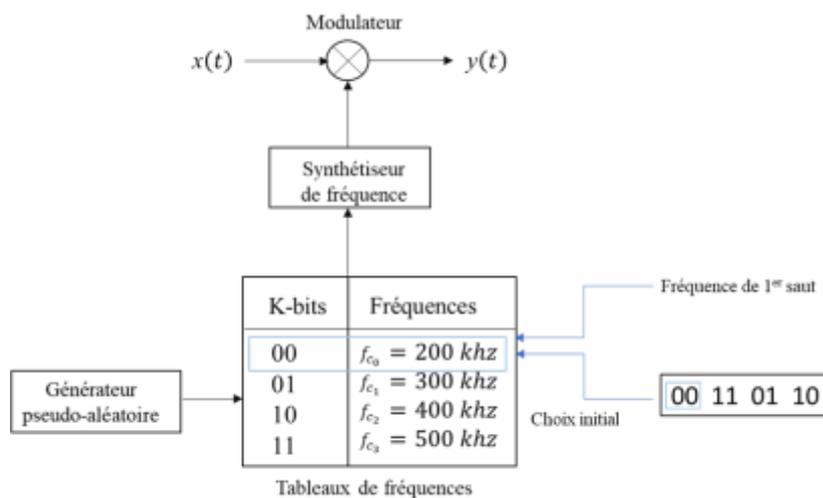


Figure 2- 31: Fonctionnement des Générateurs Pseudo-Aléatoires

Une large bande de fréquences est divisée en plusieurs sous canaux, servant de fréquences porteuses pour la transmission des données. Après chaque période de transmission, l'émetteur saute à la fréquence porteuse suivante selon cette séquence. Ce processus se répète en utilisant toutes les fréquences porteuses définies dans la séquence pseudo-aléatoire. En sautant de manière pseudo-aléatoire entre différentes fréquences, la vitesse de saut de fréquence dans un système FHSS (saut de fréquence à spectre étalé) détermine le type de FHSS et influence ses caractéristiques.

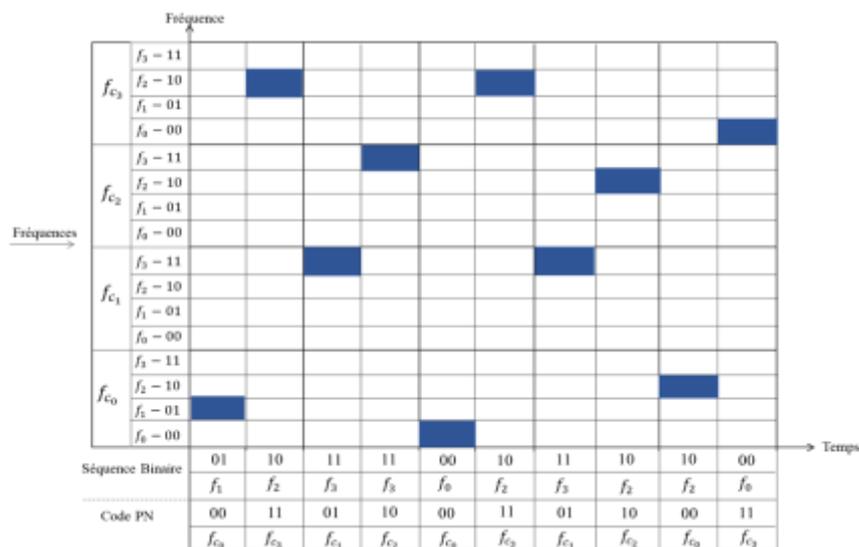


Figure 2- 32: Fonctionnement de sauts de fréquences

2.14 Types de la technique d'étalement du spectre FHSS

Dans la technique d'étalement du spectre FHSS, on distingue généralement deux types principaux en fonction de la vitesse de changement de fréquence, tels que le FHSS lent et le FHSS rapide.

➤ Saut de fréquence lent

Le FHSS lent (saut de fréquence à spectre étalé lent) se distingue par des changements de fréquence entre les sauts effectués sur des intervalles de temps plus longs, se traduit par un débit de puce (f_c) inférieur au débit d'information (f_b) en bande de base.

$$T_c = n \cdot T_b \tag{2.37}$$

avec $n = 1,2,3,4, \dots$

Où :

T_b : la durée d'un bit d'information.

T_c : la durée du chip.

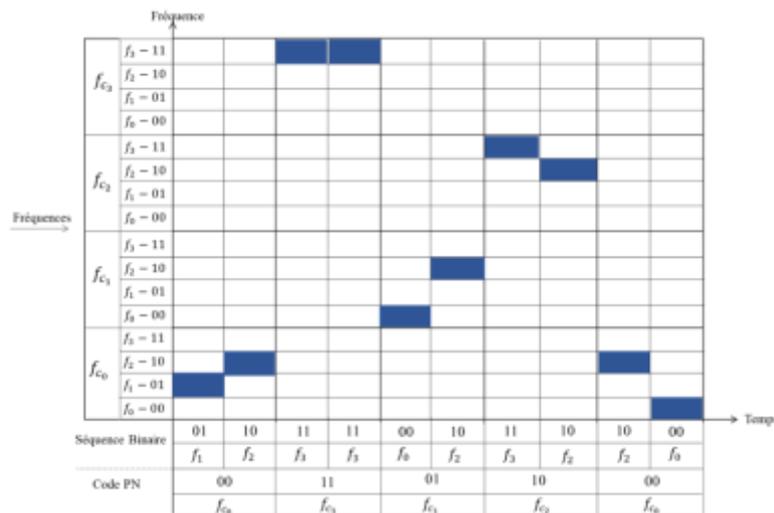


Figure 2- 33: Fonctionnement de FHSS lent.

➤ Saut de fréquence rapide

Le FHSS rapide (saut de fréquence à spectre étalé rapide) se distingue par des changements de fréquence entre les sauts effectués sur des intervalles de temps plus courts que dans le cas du FHSS lent, se traduit par un débit de puce (f_c) supérieur au débit d'information (f_b) en bande de base.

$$T_c = \frac{1}{n} \cdot T_b \tag{2.38}$$

avec $n = 1,2,3,4, \dots$

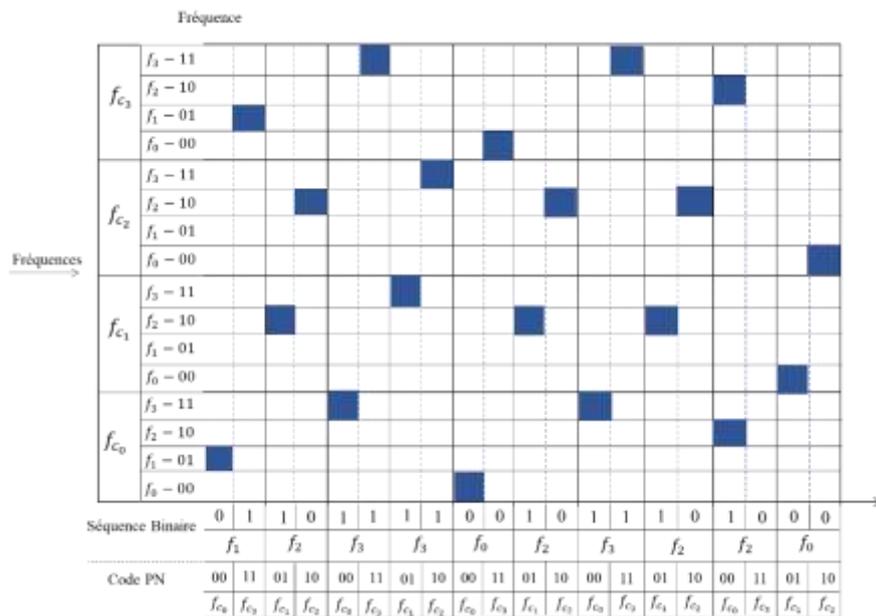


Figure 2- 34: Fonctionnement de FHSS rapide

2.15 Avantages et Inconvénients du FHSS

➤ Avantage du FHSS :

- Robustesse face aux interférences grâce à son large bande passante.
- Adaptabilité en point à multipoint
- Compatibilité avec les réseaux sans fils, permettant plusieurs points d'accès sans interférences.
- Sécurité renforcée grâce à la confidentialité des codes PN.

➤ Inconvénients du FHSS :

- Débit de données plus faible par rapport à d'autres techniques.
- Plage de couverture réduite en raison des exigences élevées en SNR.
- Interférences entre transmissions FHSS dans des environnements chargés réduisent l'efficacité et la fiabilité de la communication.

2.16 Conclusion

En utilisant le FHSS, les risques d'interférences et d'interceptions malveillantes sont significativement réduits, ce qui garantit une transmission de données fiable et sécurisée entre le drone et sa station de contrôle. En simulant l'utilisation du FHSS dans divers environnements, il est possible d'évaluer sa capacité à maintenir une connexion stable même en présence de perturbations, ce qui est crucial pour optimiser les performances opérationnelles des drones. Ces simulations fourniront des observations précieuses pour le développement de systèmes de communication sans fil plus robustes.

Chapitre 3

Simulation et Résultats

3.1 Introduction

Ce chapitre explore l'utilisation du saut de fréquence étalé pour améliorer la résilience aux interférences et renforcer la sécurité des systèmes de communication. En distribuant la transmission sur plusieurs fréquences en utilisant les deux types de FHSS (lent et rapide), L'objectif principal est d'optimiser des paramètres clés tels que le taux de saut et le rapport signal sur bruit (SNR) pour maximiser le débit, la fiabilité et la qualité de la transmission. Ces paramètres sont étudiés pour déterminer leur impact sur les performances du système, notamment en termes de réduction des erreurs de transmission (BER) et de capacité à maintenir une communication stable et sécurisée.

3.2 Configurations de la simulation

➤ Description de l'environnement python

Python est un langage interprété, ce qui signifie qu'il nécessite un programme appelé interpréteur pour exécuter les instructions écrites en Python en les traduisant en langage machine compréhensible par l'ordinateur, de manière dynamique et en temps réel.

➤ Bibliothèques utilisé

Pour la simulation de la sécurisation des systèmes de transmission des drones, plusieurs outils et bibliothèques Python sont utilisés. Le tableau 3.1 présente une brève description de chaque outil et bibliothèque.

NumPy	Utilisée pour les calculs mathématiques et la manipulation des tableaux de données.
SciPy	Utilisée pour les fonctions mathématiques avancées, notamment les fonctions spéciales comme « erfc ».
Matplotlib	Utilisée pour la visualisation des données et la création de graphiques.
PIL	Utilisée pour manipuler et afficher des images.
Pickle	Utilisée pour la sérialisation et la désérialisation des objets Python, facilitant ainsi la transmission des données via le réseau.
Socket	Utilisée pour la communication réseau via le protocole TCP/IP.

Tableau 3- 1 : description des outils et bibliothèques Python

➤ Configuration de matériel

La simulation a été effectuée en utilisant deux ordinateurs communiquant entre eux via le protocole TCP/IP. La bibliothèque socket en Python a été utilisée pour établir cette communication, tandis que pickle a été utilisé pour sérialiser les données à transmettre.

- **Ordinateur Émetteur** : Cet ordinateur génère et transmet les signaux pour les systèmes de commande et de télémétrie. Il utilise les bibliothèques mentionnées pour moduler le signal, appliquer le saut de fréquence et transmettre les données.
- **Ordinateur Récepteur** : Cet ordinateur reçoit les signaux, applique les filtres pour supprimer le bruit, effectue le distalement, la démodulation et reconstruit les données originales.

Afin que les deux ordinateurs puissent communiquer l'ordinateur récepteur écoute sur une adresse IP et un port spécifique pour recevoir les connexions entrantes et traiter les données, tandis que l'ordinateur émetteur se connecte à cette adresse IP et ce port pour envoyer les données au serveur.

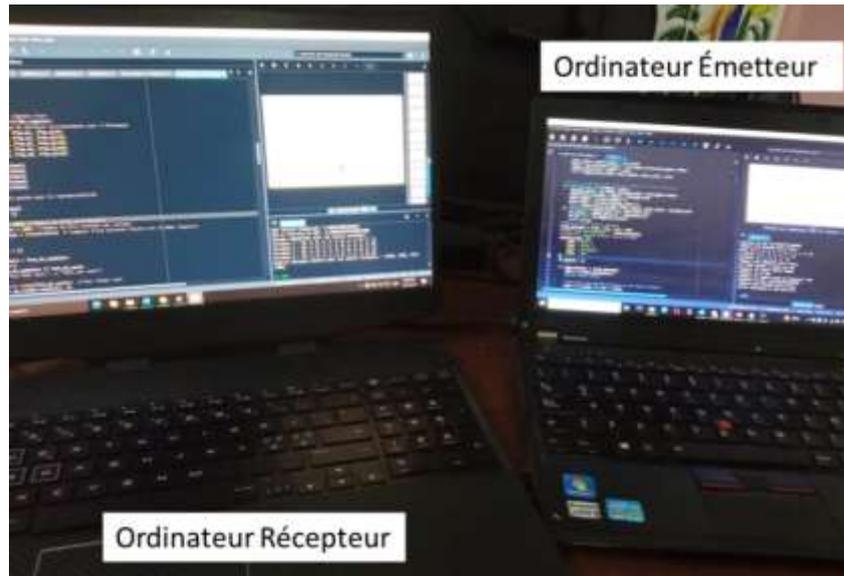


Figure 3- 1 : matériel utiliser

3.3 Génération du signal de base

- Système de données de contrôle

Le système de données de contrôle du drone utilise quatre valeurs décimales pour transmettre les instructions. Ces valeurs, allant de 1000 à 2000, ont été déterminées et validées lors de notre stage pratique. Chaque valeur correspond à une commande spécifique de vol du drone qui sont les suivants : tangage(pitch), roulis (roll), lacet (yaw) et gaz (Throttle). La figure 3.2 représente plusieurs valeurs que l'on peut utiliser pour illustrer les différentes commandes et leur impact sur le comportement du drone.

	A	B	C	D
1	Roll	Pitch	Throttle	Yaw
2	1499	1502	1504	1499
3	1499	1502	1504	1499
4	1499	1502	1517.5	1500
5	1499	1502	1515	1500
6	1498	1502	1641	1500
7	1499	1502	1738.5	1500
8	1498	1502	1770.5	1500
9	1499	1502	1792.5	1500
10	1499	1502	1798.5	1500

Figure 3- 2 : Différentes valeurs des commandes de vol

La figure 3-3 présente quatre valeurs parmi les données précédents, afin d'appliquer la sécurisation des transmissions des commandes en utilisant la technique FHSS.

```

Console 1/A x
Liste des commandes : [1499, 1502, 1515, 1500]
Value: 1499, Name: Roll
Value: 1502, Name: Pitch
Value: 1515, Name: Throttlet
Value: 1500, Name: Yaw
In [4]: |
    
```

Figure 3- 3 : Valeurs des commandes de vol utiliser

Afin de transmettre ces valeurs, il faut les convertir en binaire comme illustre la figure 3-4. La figure 3-5 visualiser les signaux de base en binaire pour le système de commande et leur représentation dans le domaine fréquentiel.

```

Console 1/A x
data: [0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1], Commande: Roll
data: [0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0], Commande: Pitch
data: [0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1], Commande: Throttle
data: [0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0], Commande: Yaw
In [40]: |
    
```

Figure 3- 4 : conversion en binaire

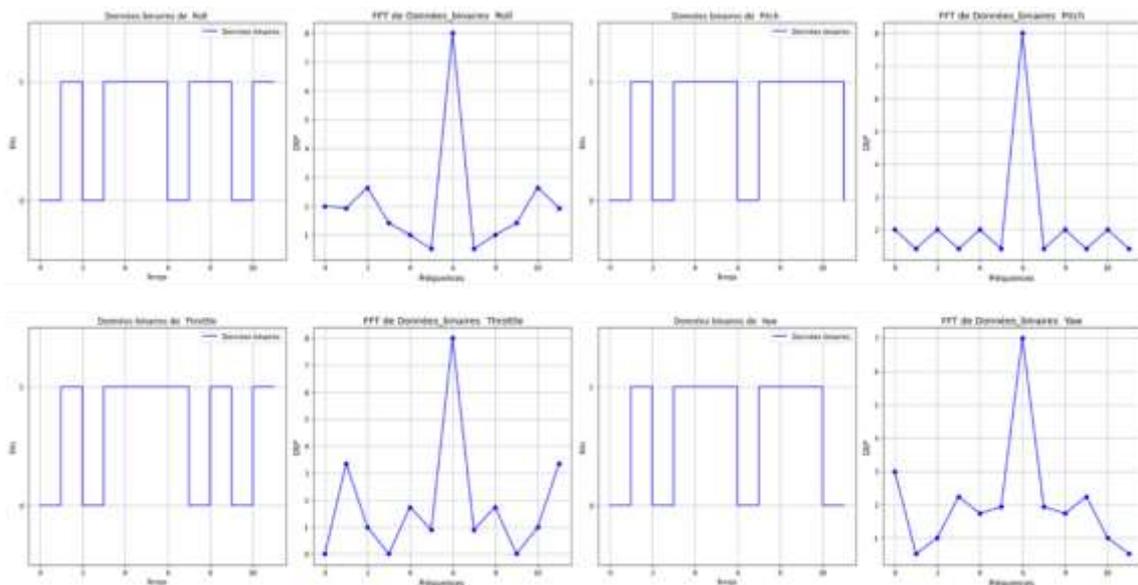


Figure 3- 5 : Représentation Temporelle et Fréquentielle des signaux des commandes

- Système de télémétrie

Le système de télémétrie transmet les données capturées par le drone. Pour simplifier la simulation, nous utiliserons une image qui est montrée dans la figure 3-6 pour représenter ce système et appliquer la sécurisation des transmissions en utilisant la technique FHSS.



Figure 3- 6 : Image transmis

La conversion des pixels d'une image en une forme binaire est essentielle pour la transmission de l'image. Elle permet de représenter chaque pixel par une séquence de bits, facilitant ainsi la transmission, le stockage et le traitement des données d'image. La figure 3-7 illustre cette conversion en montrant les pixels de l'image et leur représentation binaire, se concentrant sur les premiers 32 bits de la séquence pour démontrer le processus d'une manière concise.

```
Console 1/A X
...: print("Premiers 32 bits:", first_32_bits)
Les pixels de l image : [[ 91  83  82 ... 102 101 107]
 [ 90  82  80 ... 107 100 107]
 [ 86  80  79 ... 107 102 107]
 ...
 [ 73  69  66 ... 106 109 108]
 [ 76  72  69 ... 104 108 108]
 [ 79  78  74 ... 104 109 112]]
Premiers 32 bits: [0 1 0 1 1 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 1 1 0 0 1 0 1]
```

Figure 3- 7 : Pixels de l'image et leur forme binaire

La figure 3-8 vise à illustrer comment le signal binaire représentant l'image et l'analyser à la fois dans le domaine temporel (signal binaire) et dans le domaine fréquentiel (spectre de fréquences). Cette représentation est essentielle pour comprendre le processus de transmission.

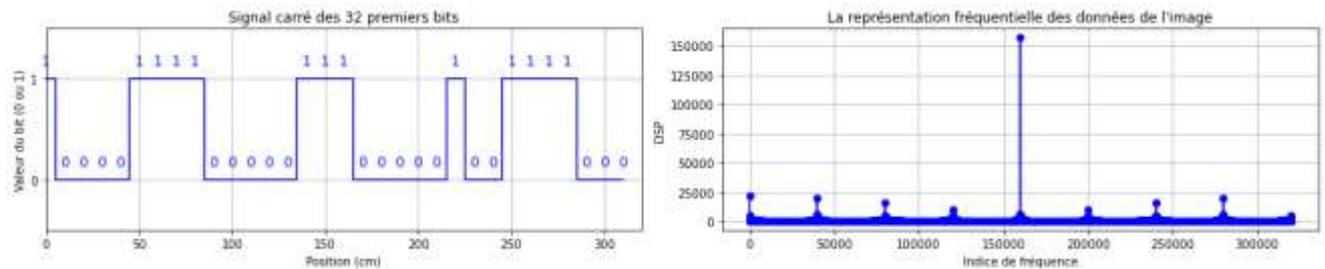


Figure 3- 8 : Représentation Temporelle et Fréquentielle de l'Image

3.4 Modulation du signal

Après avoir généré et converti les signaux de base en binaire, nous allons les moduler en utilisant la technique de modulation QPSK (Quadrature Phase Shift Keying). Cette étape est cruciale pour préparer les données à être transmises via le système de saut de fréquence étalé (FHSS). Pour gérer deux systèmes distincts, tels qu'un système de données de contrôle et un système de télémétrie, tout en utilisant la modulation QPSK, il y a plusieurs étapes à suivre :

➤ Conversion en NRZ

Convertissez les données en NRZ (Non-Return to Zero), où chaque bit est représenté par un niveau de tension constant sans retour à zéro entre les bits. Chaque système aura sa propre séquence de bits représentant ses informations spécifiques.

Pour le système de données de contrôle, la Figure 3-9 représente les commandes sous forme de données en NRZ.

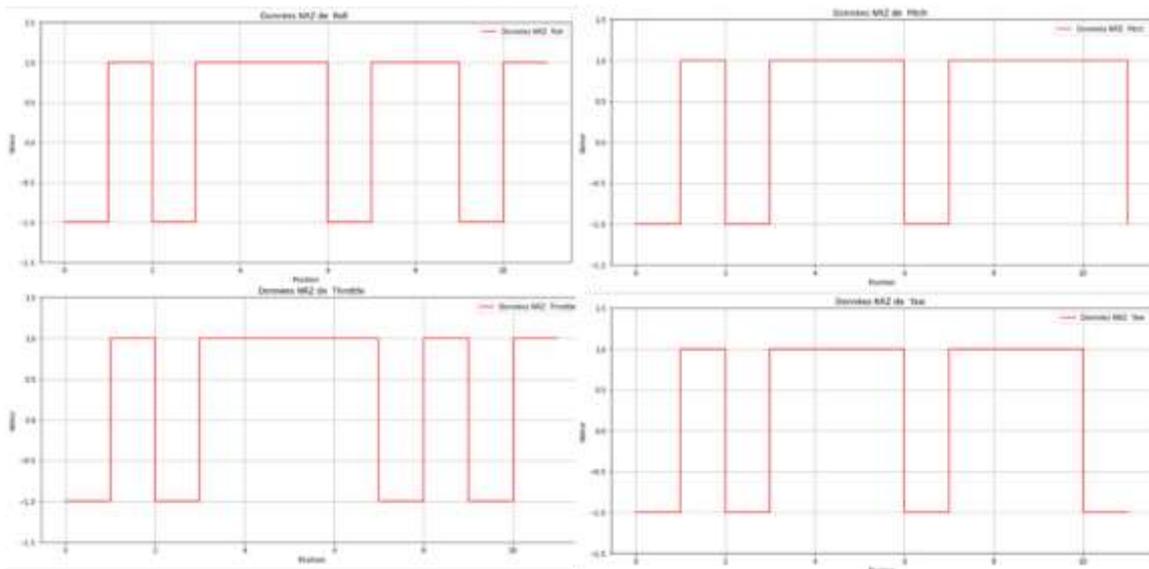


Figure 3- 9 : Représentation des données en NRZ

- Pour le système de télémétrie, la Figure 3-10 représente les données sous forme de bits en NRZ.

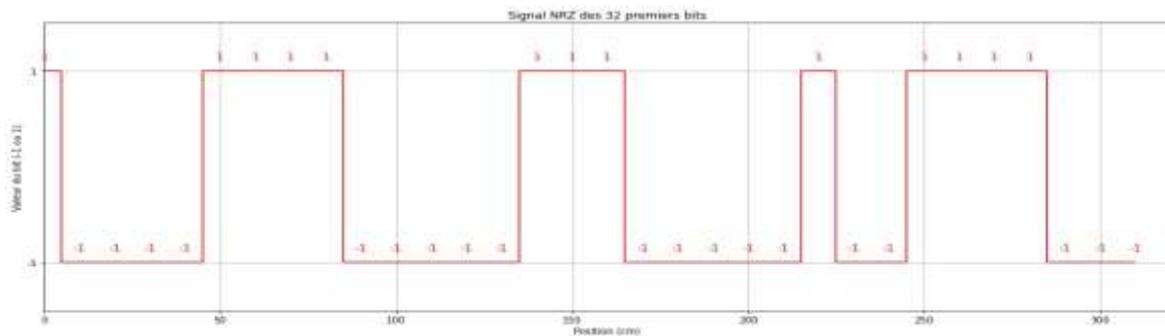


Figure 3- 10 : Représentation des bits de l'image en NRZ

➤ Regroupement des bits pour QPSK

La modulation QPSK consiste à regrouper les bits par paires pour moduler des symboles QPSK, chacun représentant une combinaison spécifique de phases dans le domaine complexe. Cette technique permet une transmission efficace des données binaires en utilisant un nombre limité de symboles, optimisant ainsi l'utilisation du canal de communication.

La figure 3-8 illustre le regroupement des données en NRZ par paires pour chaque système. Ce processus est crucial pour la modulation ultérieure en QPSK.

```

Console 1/A x
... print(m_z_pairs, [m_z_pairs], Commande: [occurrences[0] occurrences]) /
nrz_pairs: [array([-1, 1]), array([-1, 1]), array([1, 1]), array([-1, 1]),
array([1, 1]), array([-1, -1])], Commande: Yaw
In [57]: |

Console 1/A x
Premières 16 paires NRZ: [(-1, 1), (-1, 1), (1, -1), (1, 1), (-1, 1), (-1, 1), (-1,
-1), (1, 1), (-1, 1), (-1, 1), (-1, -1), (1, -1), (-1, 1), (1, -1), (-1, 1), (-1,
1)]
In [60]: |
    
```

Figure 3- 11 : Représentation des paires de NRZ

➤ Modulation QPSK

Dans le système de données de contrôle et de télémétrie, le signal modulé est généré en Combinant les composants réels et imaginaires pour chaque symbole QPSK. Ce signal est alors prêt à être transmis par le système de communication. Les figures suivantes Représentent la modulation de chaque commande et de l'image dans les domaines Temporel et fréquentiel.

- Dans le domaine temporel

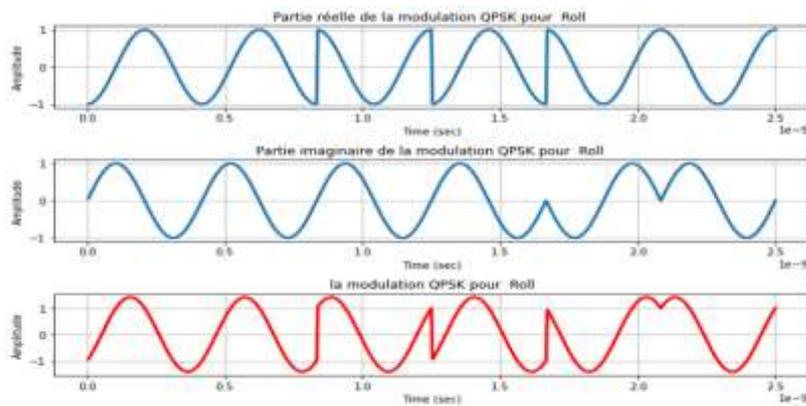


Figure 3- 12 : Modulation QPSK de la commande Roll

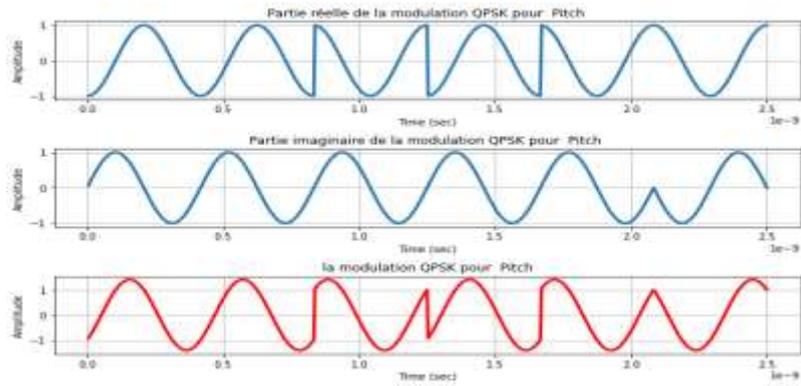


Figure 3- 13 : Modulation QPSK de la commande pitch

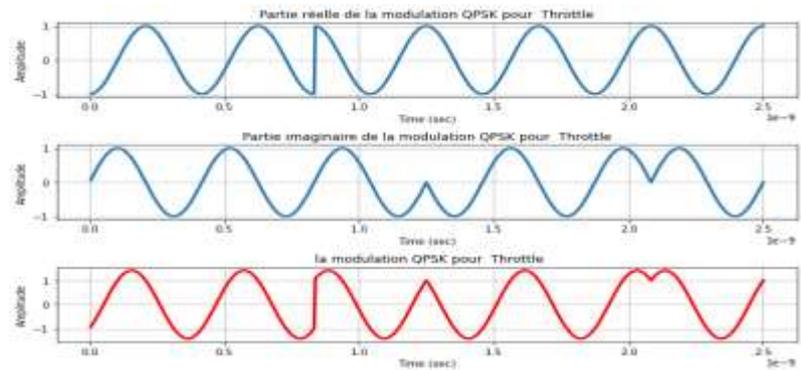


Figure 3- 14 : Modulation QPSK de la commande throttle

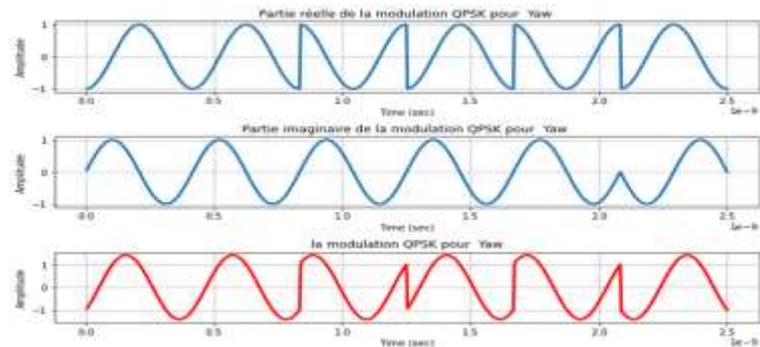


Figure 3- 15 : Modulation QPSK de la commande Yaw

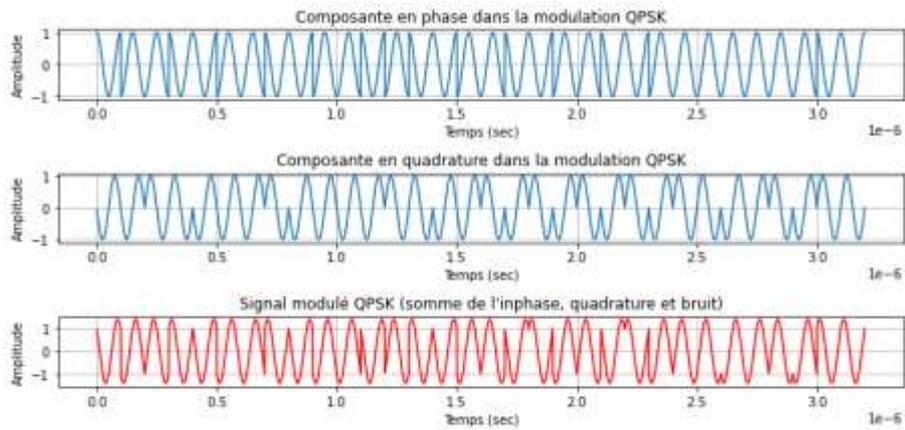


Figure 3- 16 : Modulation QPSK de l'image

- Dans le domaine fréquentiel

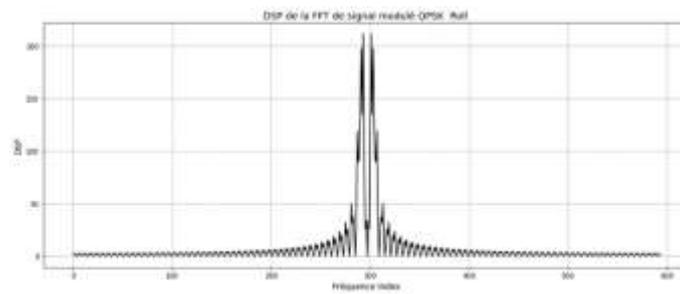


Figure 3- 17 : Modulation QPSK de roll dans le domaine fréquentiel

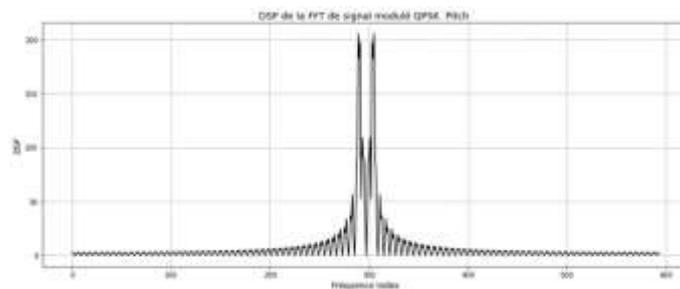


Figure 3- 18 : Modulation QPSK de pitch dans le domaine fréquentiel

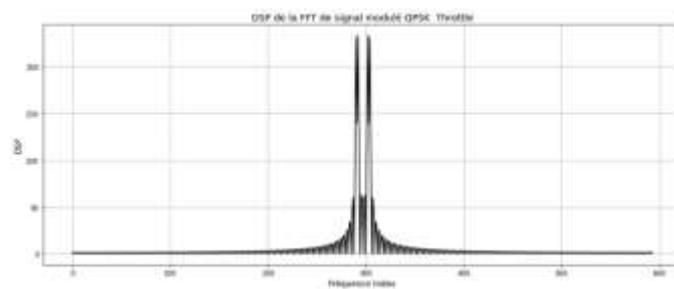


Figure 3- 19 : Modulation QPSK de throttle dans le domaine fréquentiel

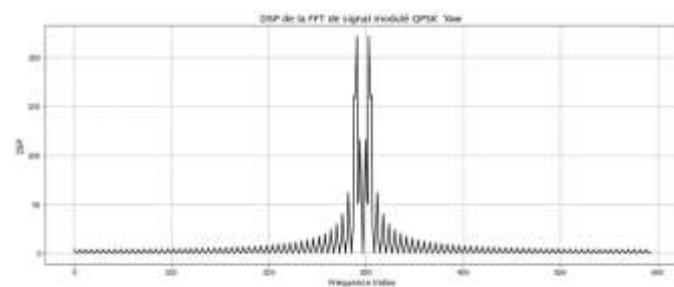


Figure 3- 20 : Modulation QPSK de yaw dans le domaine fréquentiel

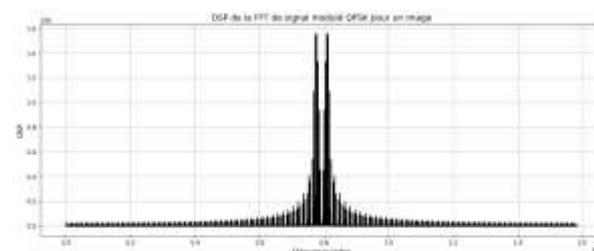


Figure 3- 21 : Modulation QPSK de l'image dans le domaine fréquentiel

3.5 Mise en œuvre du saut de fréquence

Le saut de fréquence consiste à changer fréquemment la fréquence porteuse selon une séquence pseudo-aléatoire connue de l'émetteur et du récepteur. Dans notre cas, nous avons sélectionné cinq fréquences distinctes réparties sur un intervalle de temps de $[0, 99]$. Pour générer les signaux de porteuse, nous avons utilisé le cosinus des vecteurs de temps correspondants. Ces signaux de porteuse sont des ondes cosinus dont les fréquences sont définies par les intervalles de temps calculés auparavant.

➤ Génération de la séquence de sauts

Un générateur pseudo-aléatoire est utilisé pour mélanger ces 5 fréquences, produisant ainsi une séquence pseudo-aléatoire qui représente le code d'étalement. Cette séquence détermine l'ordre et le moment où chaque fréquence est utilisée, en fonction du type d'étalement choisi.

• Etalement de spectre avec FHSS Lent (Slow FHSS)

Dans le cas de FHSS lent, le taux de saut de fréquence étant inférieur ou égal au taux de symboles, cela signifie que plusieurs symboles peuvent être transmis sur une même fréquence avant de passer à une autre. Dans notre configuration : n est calculé comme le nombre de bits par sauts ($\frac{\text{Taux_de_symboles}}{\text{Taux_de_sauts}}$). Par exemple un taux de sauts = 500 et un taux de symboles = 1000, nous trouvons dans le cas où le saut de fréquence est lent, ce qui correspond à $n=2$ bits/saut, comme illustré dans la figure 3-22.

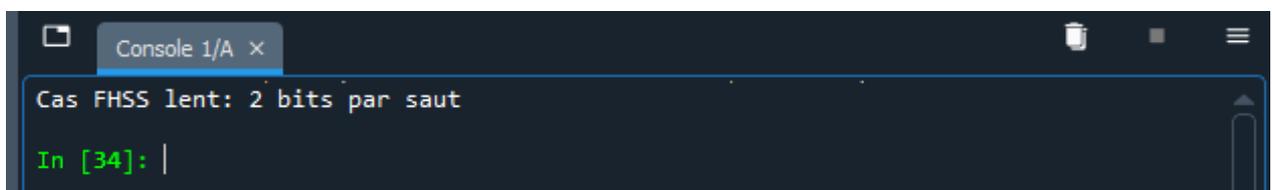


Figure 3- 22 : Le cas de type FHSS lent

La séquence d'étalement consiste à transmettre chaque segment de plusieurs bits sur une même porteuse avant de passer à la suivante. Pour illustrer ce processus, nous allons tracer la séquence d'étalement dans les figures 3-23 et 3-24, montrant comment les porteuses sont sélectionnées pour chaque saut de fréquence dans le mode FHSS lent.

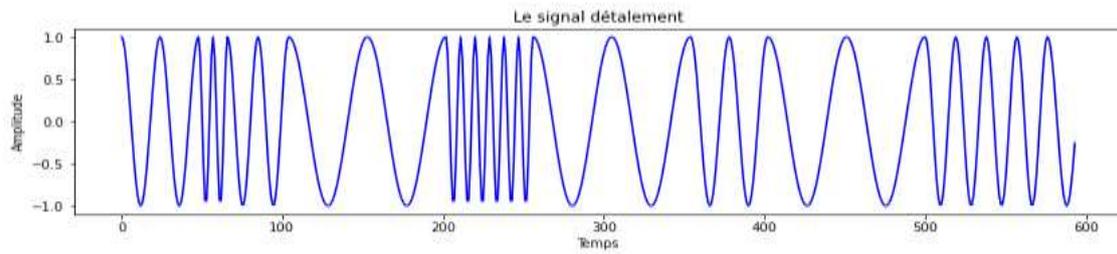


Figure 3- 23 : Signal d'étalement lent pour les commandes

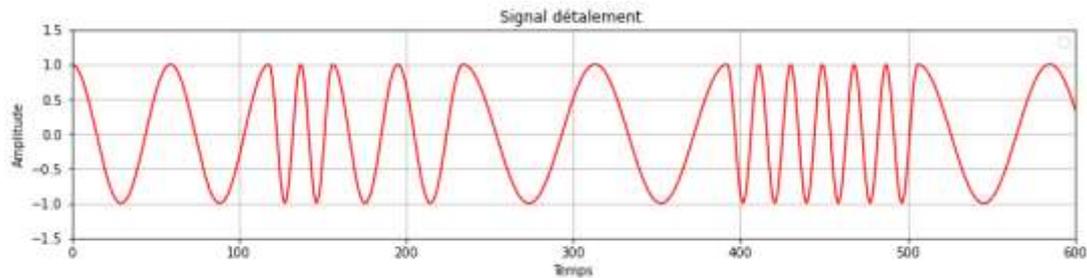


Figure 3- 24 : Signal d'étalement lent pour l'image

Après avoir modulé le signal et réalisé l'étalement de spectre, nous avons obtenu le signal étalé pour les deux systèmes (système de données de contrôle et télémétrie), comme illustré dans les figures suivantes. Ces figures montrent comment les fréquences du signal sont étalées sur différentes porteuses dans le cadre du saut de fréquence (FHSS)

➤ Le système de données de contrôle

Représentation de l'étalement de spectre par sauts de fréquence dans les domaines temporel et fréquentiel.

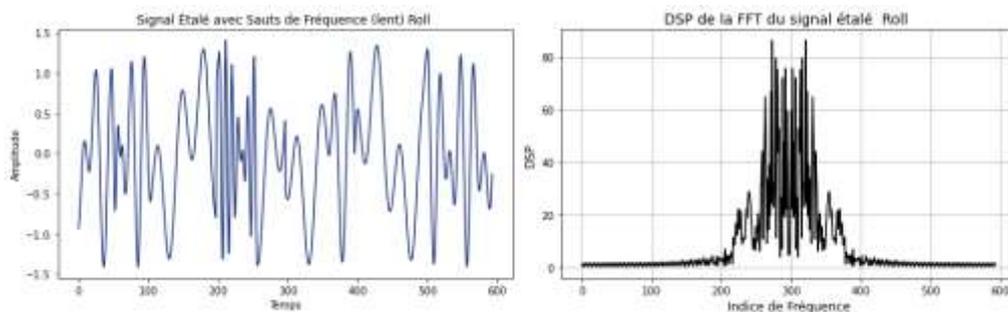


Figure 3- 25 : Signal étalé lent de la commande Roll

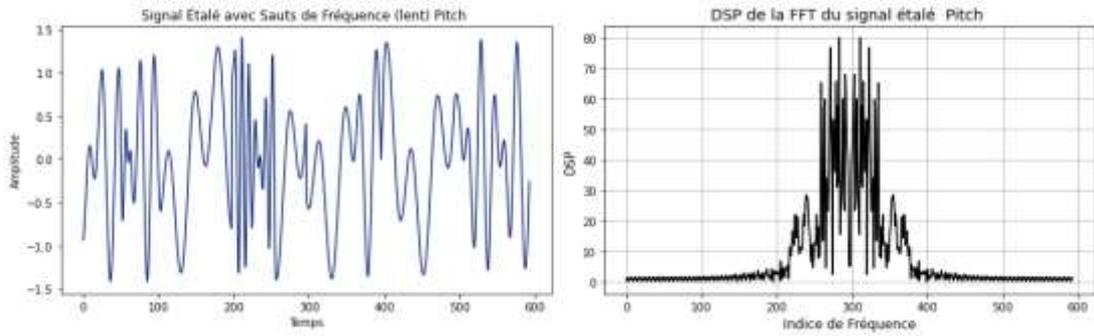


Figure 3- 26 : Signal étalé lent de la commande Pitch

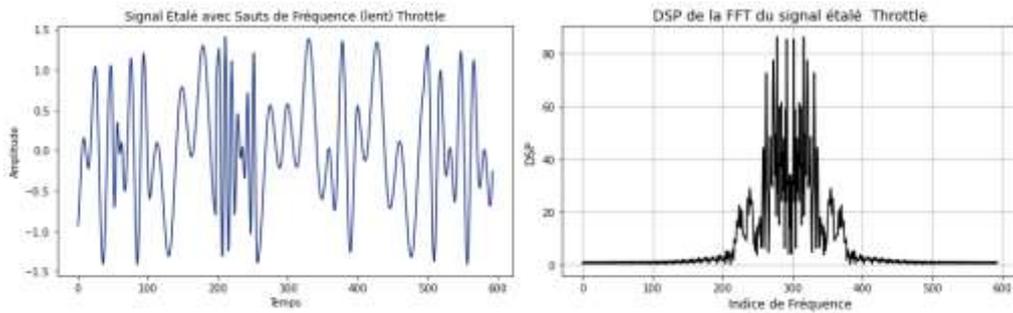


Figure 3- 27 : Signal étalé lent de la commande Throttle

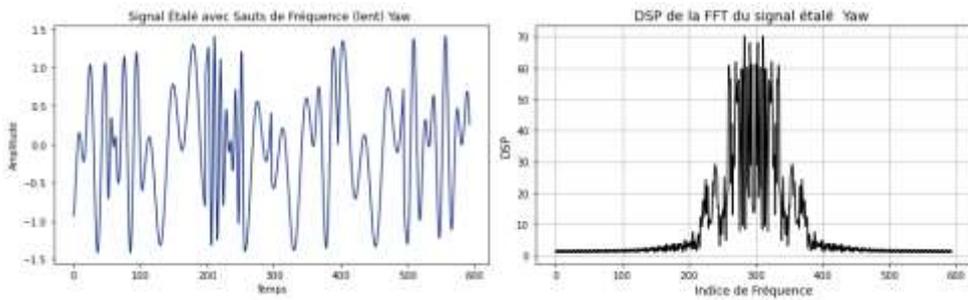


Figure 3- 28: Signal étalé lent de la commande Yaw

➤ Système de télémétrie

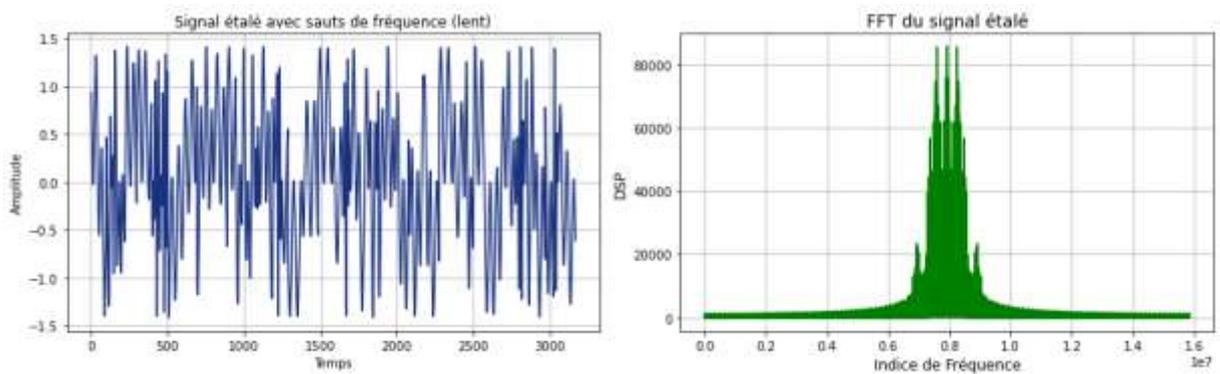


Figure 3- 29 : Signal étalé lent de l'image

- **Etalement de spectre avec FHSS Rapide (Fast FHSS)**

Dans le cas d'un FHSS rapide, où le taux de saut de fréquence est supérieur ou égal au taux de symboles, cela signifie qu'un seul symbole peut être transmis sur n fréquences. Dans notre configuration, n est calculé avec $(\frac{\text{Taux de sauts}}{\text{Taux de symboles}})$, par exemple, avec un taux de sauts de 5000 et un taux de symboles de 1000, nous trouvons que $n=5$ sauts par bit, comme illustré dans la figure 3-30.

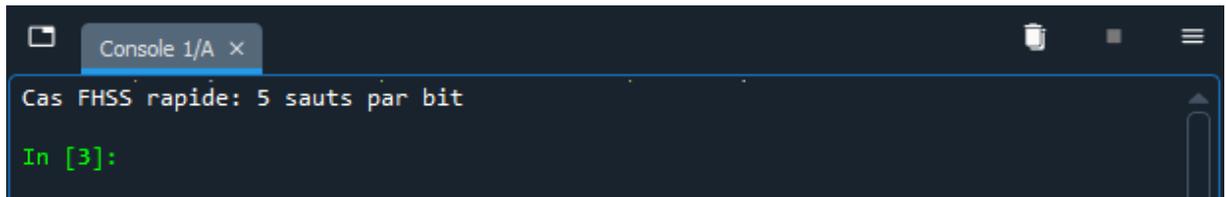


Figure 3- 30: Le cas de type FHSS rapide

La séquence d'étalement consiste à transmettre chaque bit sur plusieurs porteuses. Pour illustrer ce processus, nous allons tracer la séquence d'étalement du FHSS rapide dans la figure 3-29, montrant comment les porteuses sont sélectionnées pour chaque bit transmis sur plusieurs fréquences.

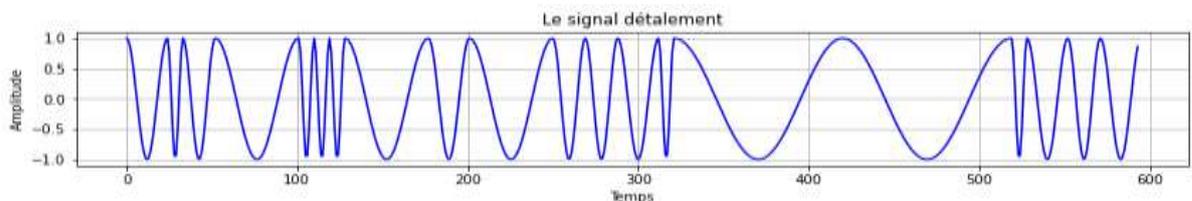


Figure 3- 31: Signal d'étalement rapide pour les commandes

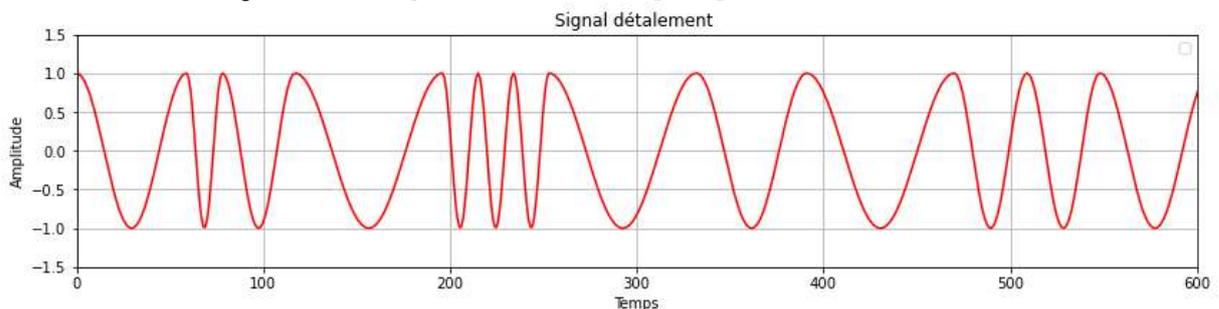


Figure 3- 32 : Signal d'étalement rapide pour image

Le signal étalé pour les deux systèmes (système de données de contrôle et télémétrie), comme illustré dans les figures suivantes :

➤ Le système de données de contrôle

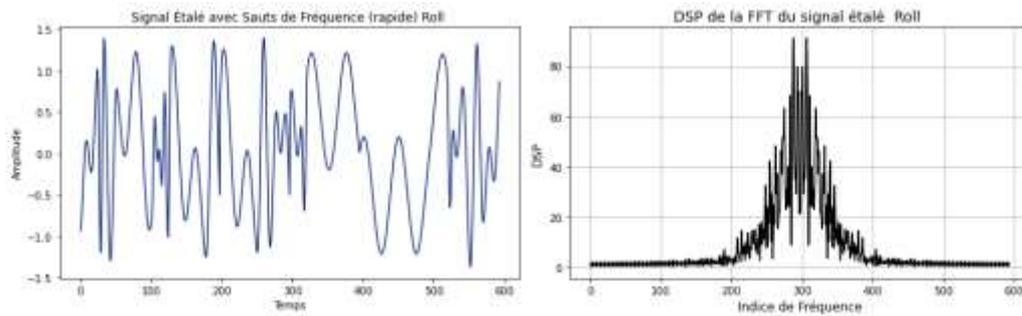


Figure 3- 33 : Signal étalé rapide de la commande Roll

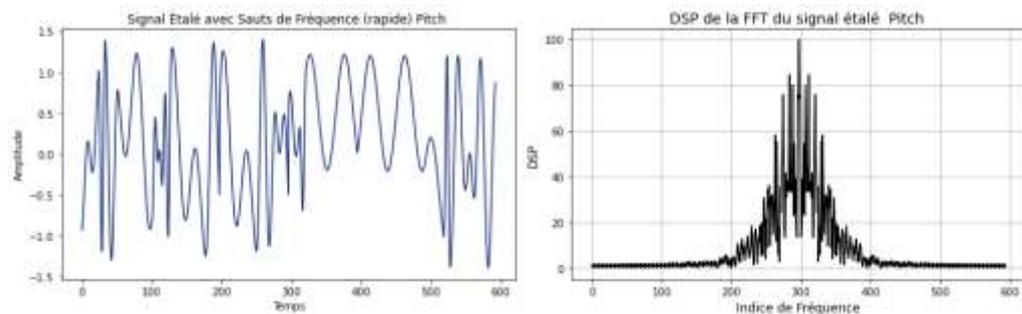


Figure 3- 34: Signal étalé rapide de la commande Pitch

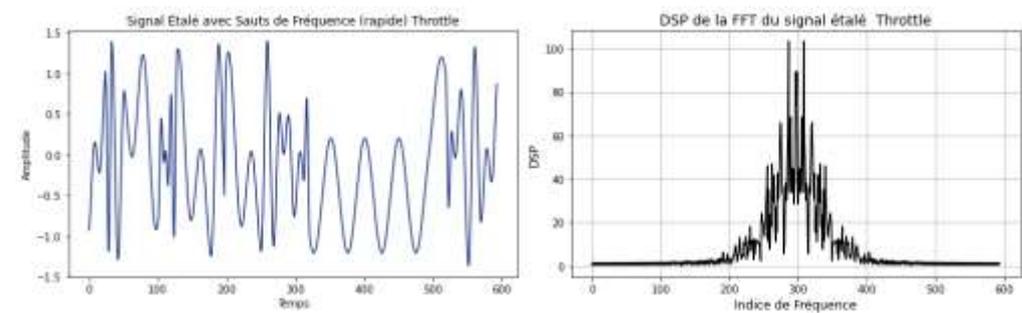


Figure 3- 35 : Signal étalé rapide de la commande Throttle

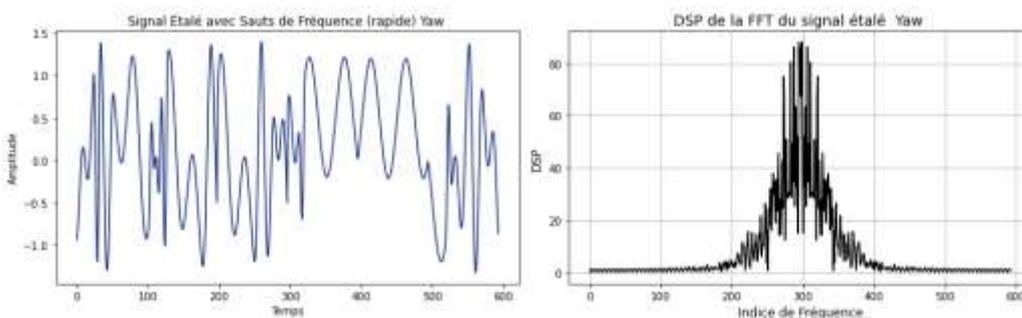


Figure 3- 36 : Signal étalé rapide de la commande Yaw

➤ Système de télémétrie

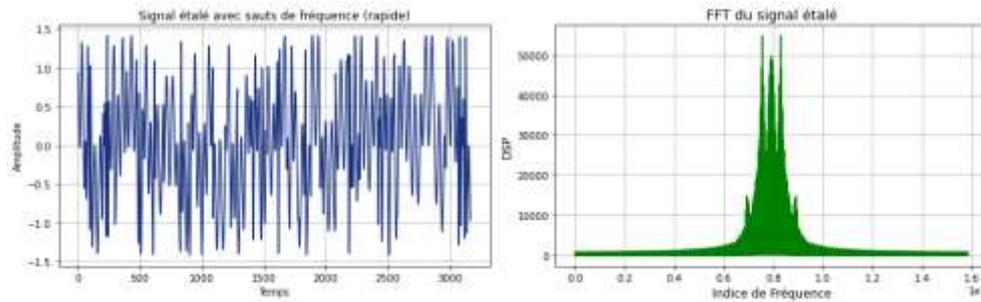


Figure 3- 37: Signal étalé rapide d'image

3.6 La transmission dans le canal

La transmission dans le canal est un processus de transfert de données d'un émetteur à un récepteur à travers un canal de communication sans fil. Cela implique le codage, la modulation et l'étalement des signaux pour garantir la fiabilité et l'intégrité des données malgré les interférences et le bruit.

➤ Utilisation du Protocole TCP/IP pour la Transmission

Le protocole TCP/IP est utilisé pour établir une connexion fiable entre les deux extrémités de la communication, garantissant ainsi la livraison ordonnée et sans erreur des paquets de données. Après que le signal est généré, module et étale, le processus de transmission utilise le protocole TCP/IP pour assurer une communication fiable entre l'émetteur et le récepteur. L'émetteur commence par établir une connexion avec le récepteur, une fois connecte, il envoie les données au récepteur. La figure 3-38 illustre que la connexion a été établie les données.

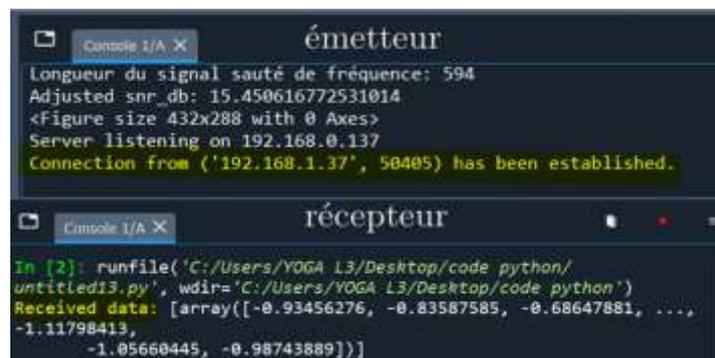


Figure 3- 38 : Établissement de la connexion TCP/IP entre l'émetteur et le récepteur

➤ Introduction du Bruit dans le Canal de Transmission

- **AWGN (Additive White Gaussian Noise)** : Modèle de bruit thermique ajoute au signal transmis, simulant les perturbations aléatoires présentes dans les canaux de communication réels.
- **Canal Rayleigh** : modèle de propagation sans ligne de visée, souvent utilise pour simuler des environnements de communication sans fil ou les signaux se propagent à travers des multiples trajets.

La figure 3-39 illustre graphiquement l'introduction de ces bruits, mettant en évidence leur nature aléatoire et leur impact sur le canal de communication dans le domaine temporel et fréquentiel.

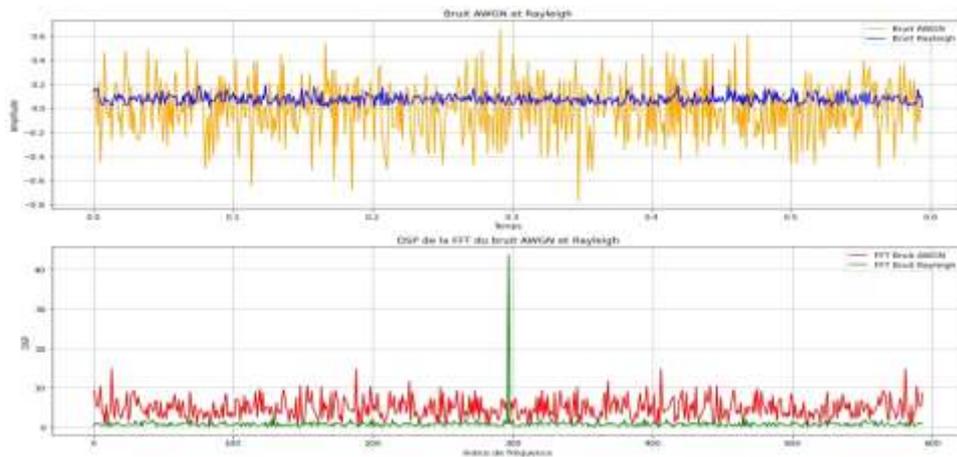


Figure 3- 39 : Bruit AWGN et Rayleigh

Le bruit AWGN et le modèle de canal Rayleigh permettent de tester et d'évaluer les performances des systèmes de communication des drones dans des conditions réalistes, assurant ainsi leur robustesse et fiabilité face à diverses perturbations et environnements de propagation. Les Figure 3-40 et 3-41 présente le signal étales après l'incorporation du bruit AWGN et le modelé de canal Rayleigh dans le domaine temporel et fréquentiel. Cette représentation graphique permet de visualiser l'effet de ces perturbations sur le signal transmis, montrant comment ils peuvent affecter la qualité et la précision de la communication entre l'émetteur et le récepteur de drone.

- Le système de données de contrôle

Cette représentation graphique permet de visualiser l'effet de ces perturbations sur le signal transmis FHSS lent et rapide, montrant comment ils peuvent affecter la qualité et la précision de la communication entre l'émetteur et le récepteur de drone.

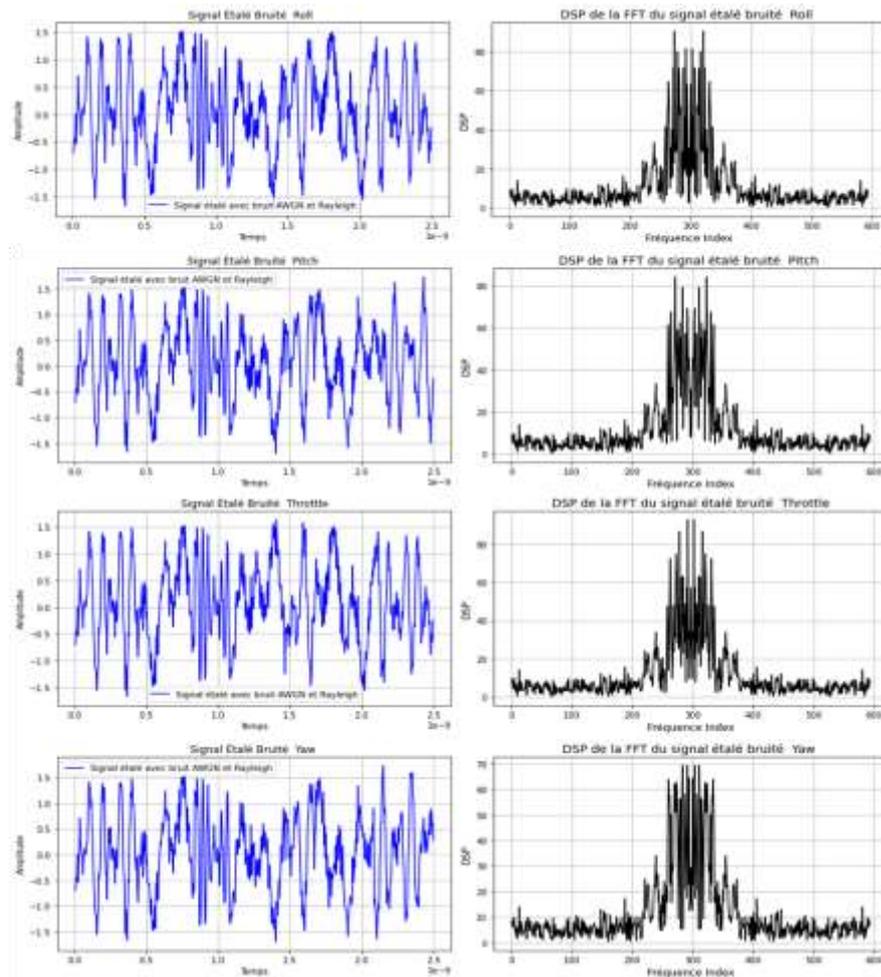


Figure 3- 40 : Signaux étalés bruités lents pour les commandes

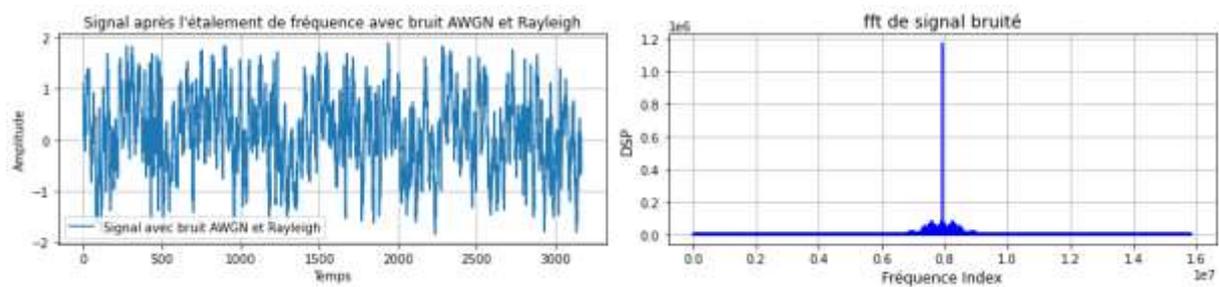


Figure 3- 41 : Signal étalé bruité lent pour l'image

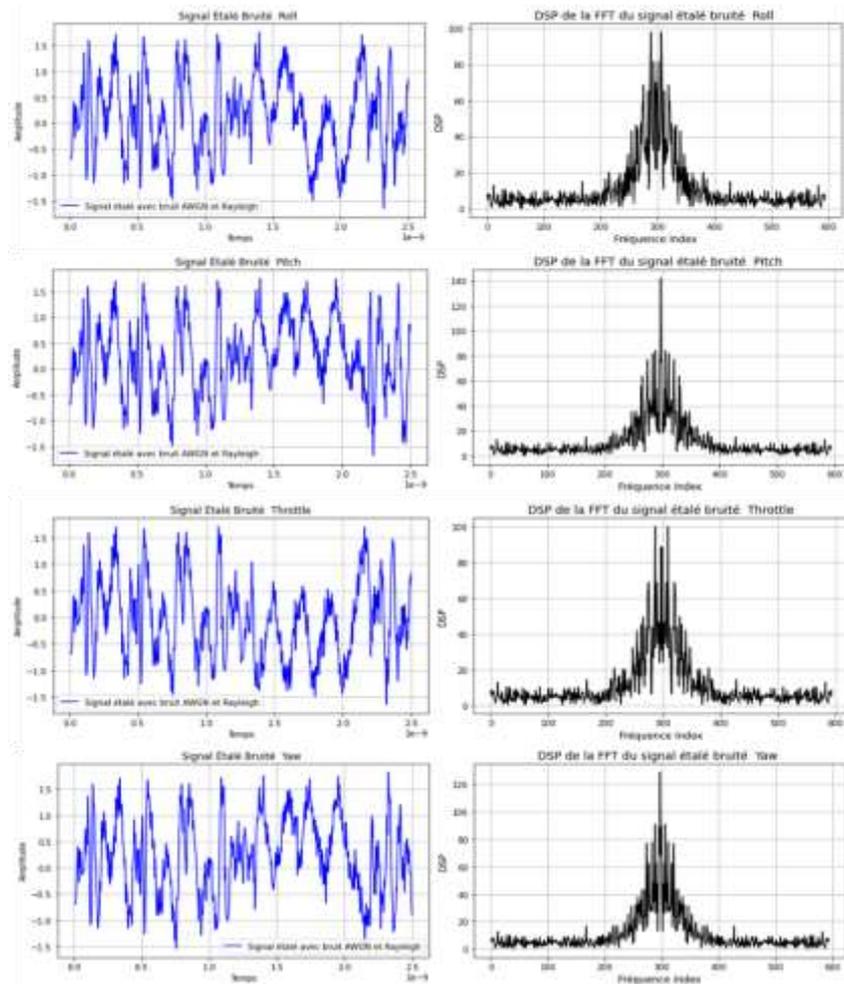


Figure 3- 42 : Signaux étalés bruités rapides pour les commandes

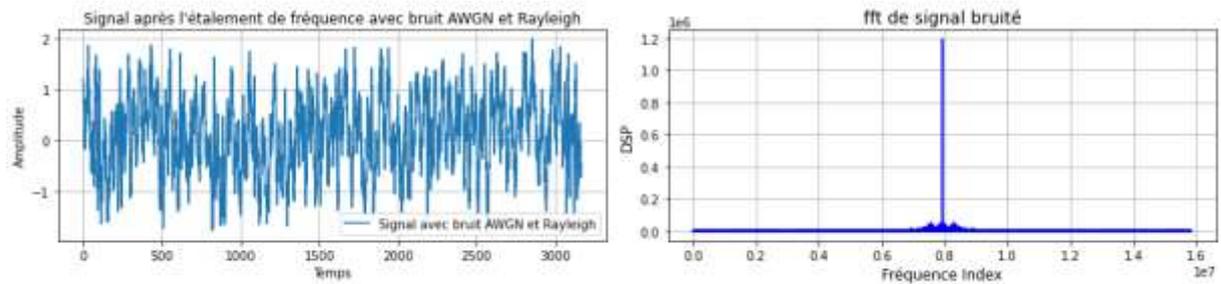


Figure 3- 43 : Signal étalé bruité rapide pour l'image

- Effet Doppler

L'intégration de l'effet Doppler dans la simulation est cruciale pour simuler des scénarios réalistes où les mouvements relatifs entre les drones et les stations de contrôle affectent la transmission des signaux. La figure 3-44 et 3-45 illustre un exemple spécifique où la vitesse du drone est de 20 m/s. Elle montre le signal modulé avec l'effet Doppler et bruité, mettant en évidence l'impact significatif de la variation de fréquence

due au déplacement rapide de drone. Cette visualisation permet de comprendre visuellement comment l'effet Doppler affecte la qualité du signal transmis dans les systèmes de commande ou de télémétrie des drones.

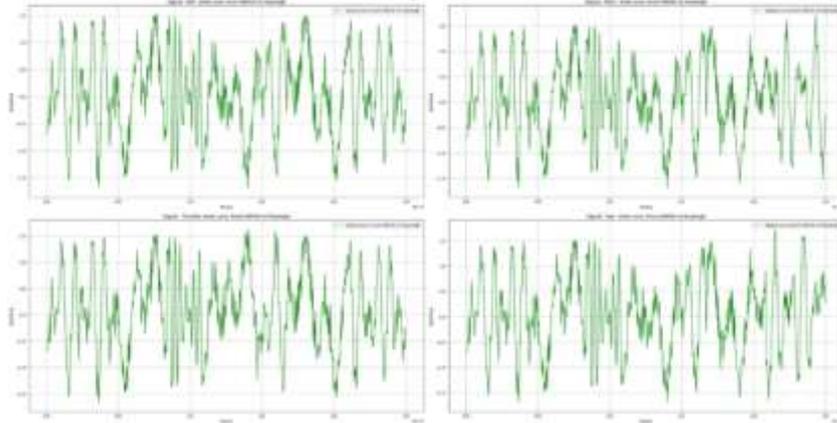


Figure 3- 44 : Signaux étalés bruités des commandes avec bruit et effet doppler

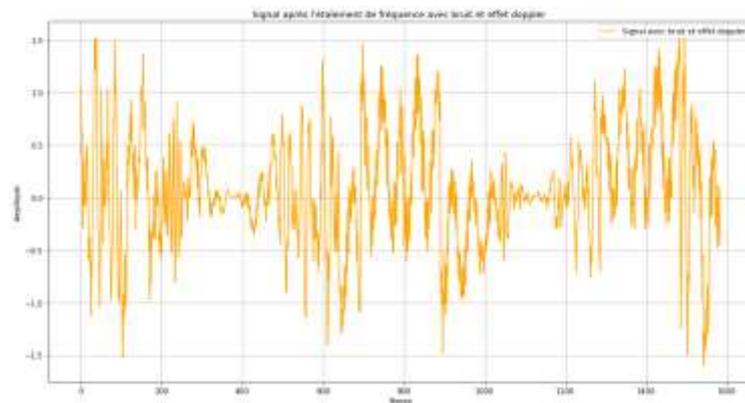


Figure 3- 45 : Signal étalé de l'image avec bruit et effet doppler

3.7 Réception et démodulation

➤ Application de filtre

L'application de filtres dans un système de FHSS est essentielle pour améliorer la qualité de la transmission en minimisant les interférences et en atténuant le bruit AWGN ainsi que le modèle de canal Rayleigh avant la réception des signaux. Un exemple courant est l'utilisation du filtre passe-bas, qui permet d'atténuer les hautes fréquences du signal reçu. Les figures suivantes représentent les signaux récupérés dans la partie récepteur sans bruit.

Nous avons récupéré les signaux sans bruit dans FHSS lent et rapide comme suit :

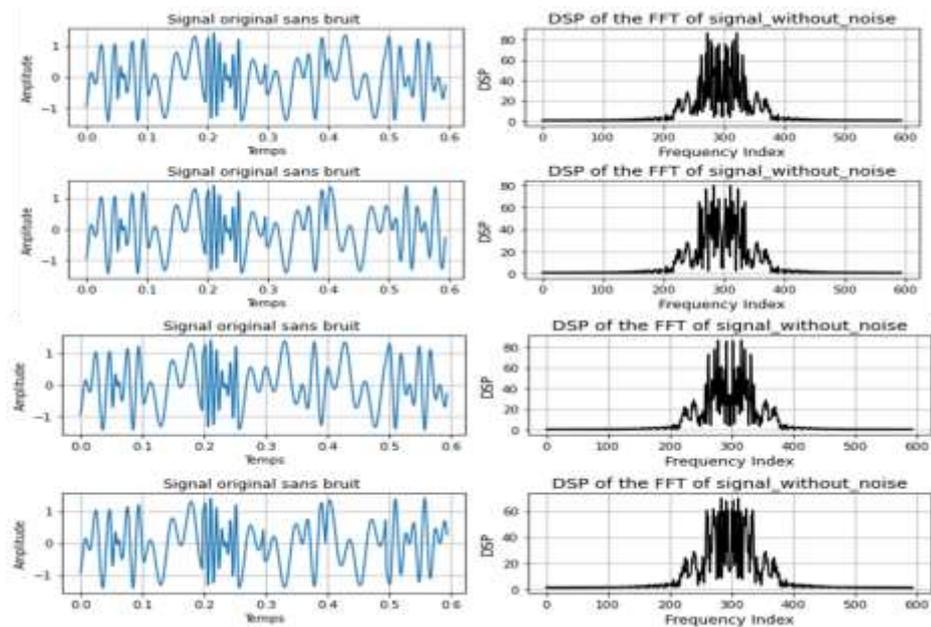


Figure 3- 46 : Signaux récupérés dans FHSS lent sans bruits pour les commandes

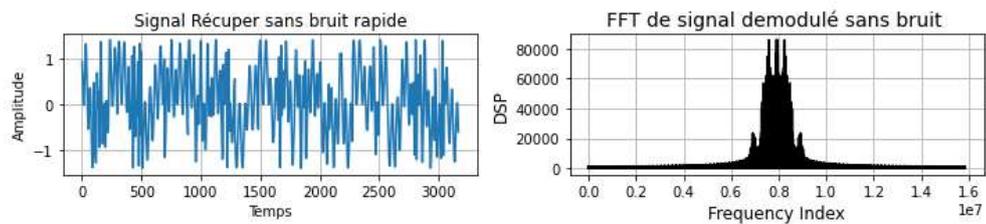


Figure 3- 47 : signal récupéré dans FHSS lent sans bruits pour l'image

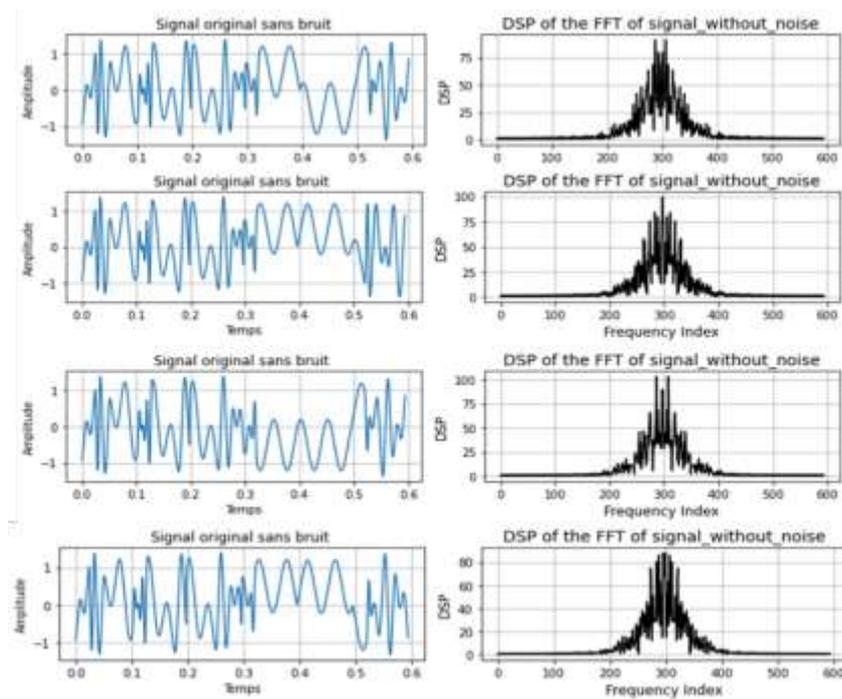


Figure 3- 48: Signaux récupérés dans FHSS rapide sans bruits pour les commandes

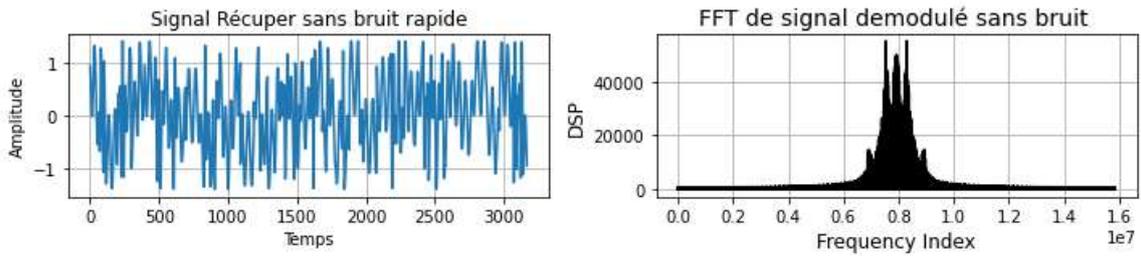


Figure 3- 49: signal récupéré dans FHSS lent sans bruits pour l'image

➤ Désétalement

Le désétalement est essentiel pour récupérer le signal original modulé dans les systèmes à étalement de spectre avec un séquence de désétalement, nécessitant une synchronisation précise entre l'émetteur et le récepteur ainsi qu'une application inverse de la séquence d'étalement pour chaque partie de signal reçu, Les figures suivantes représentent les séquences d'étalement pour les deux systèmes de communications des drones et pour les deux types d'étalement FHSS lent et rapide.

- Le système de données de contrôle

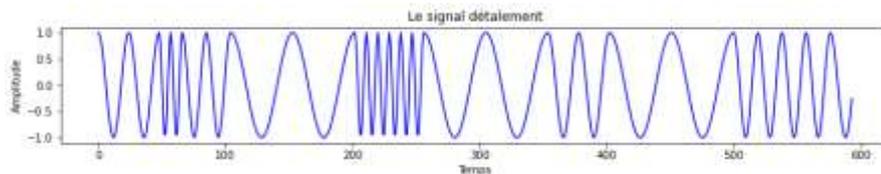


Figure 3- 50 : Le signal de désétalement des commandes pour FHSS Lent

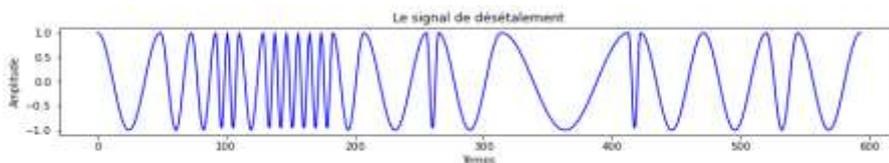


Figure 3- 51 : Le signal de désétalement de l'image pour FHSS rapide

- Le système de télémétrie

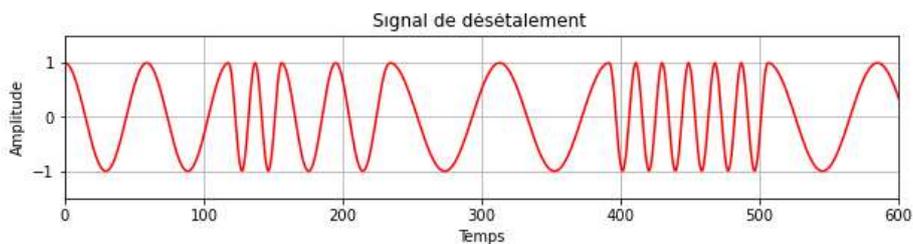


Figure 3- 52 : Le signal de désétalement de l'image pour FHSS lent

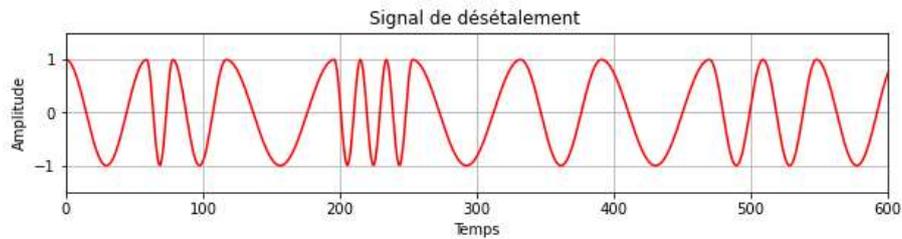


Figure 3- 53 : Le signal de désétalement de l'image pour FHSS rapide

Une fois que le récepteur a effectué le processus de désétalement, il obtient une série de segments de signal qui ont été dispersés sur différentes fréquences pendant la transmission. Chaque segment de signal correspond à une partie du signal original, mais étendu sur une bande de fréquence plus large. Après avoir appliqué l'inverse de la séquence d'étalement et avoir combiné ces segments de signal, le récepteur reconstruit le signal modulé original. Les figures suivantes montrent les signaux d'origine.

- Pour le système de données de contrôle

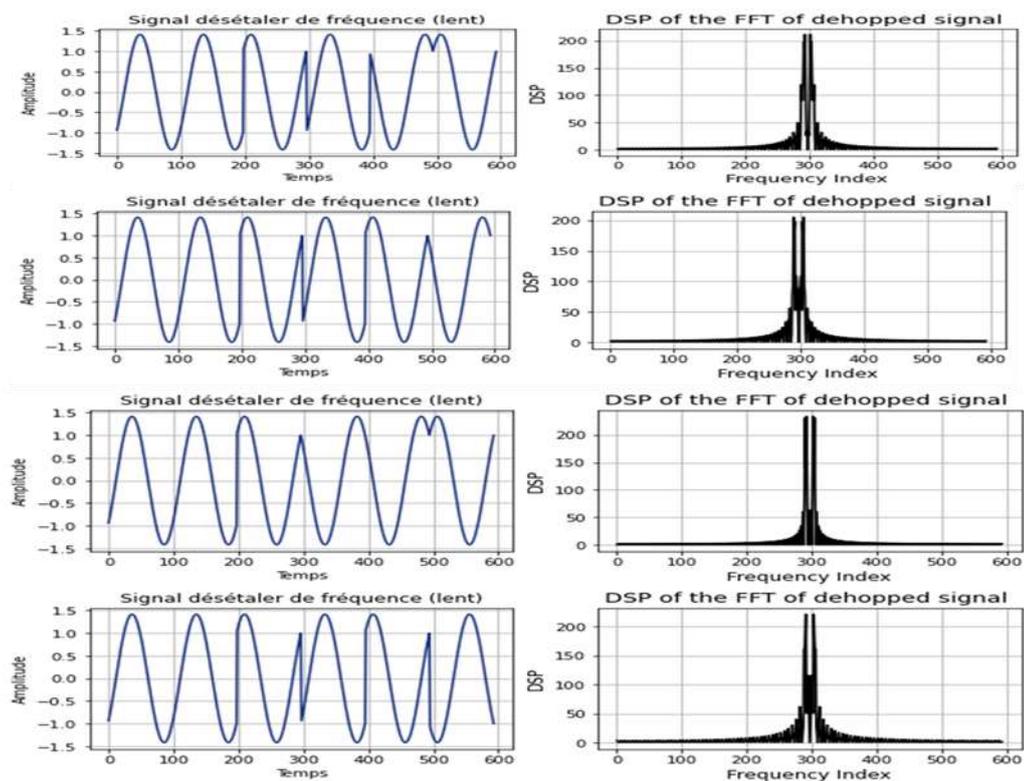


Figure 3- 54: Signaux désétalement pour des commandes de FHSS lent

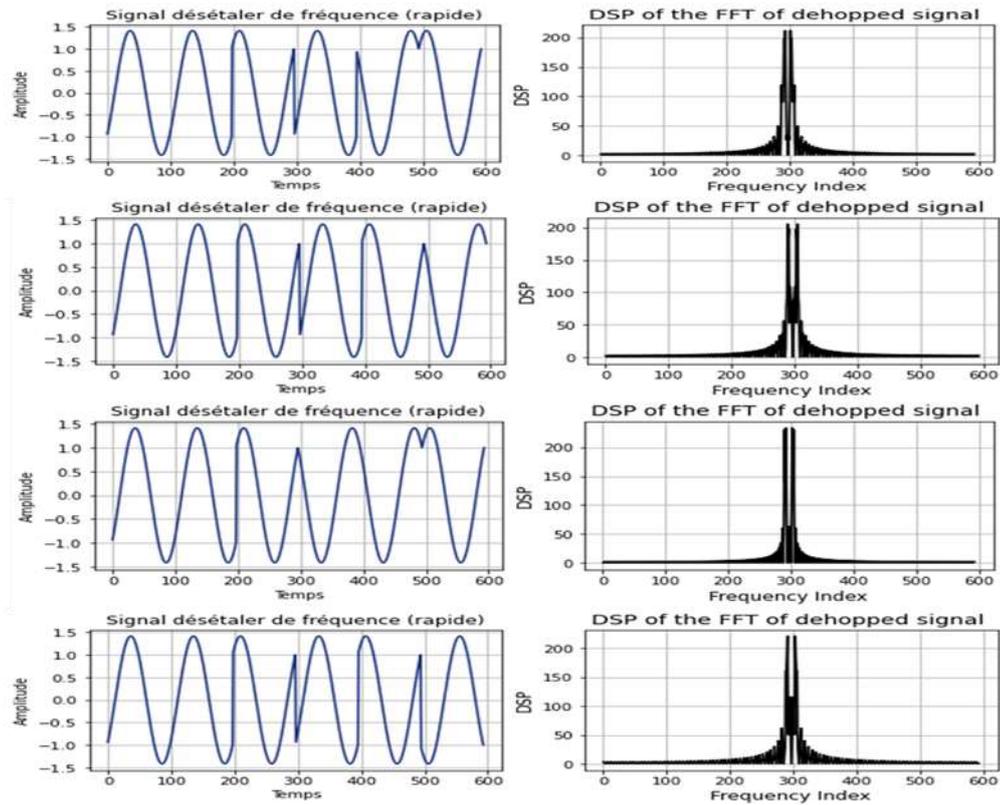


Figure 3- 55: Signaux désétaler pour des commandes de FHSS rapide

- Pour le système de télémétrie

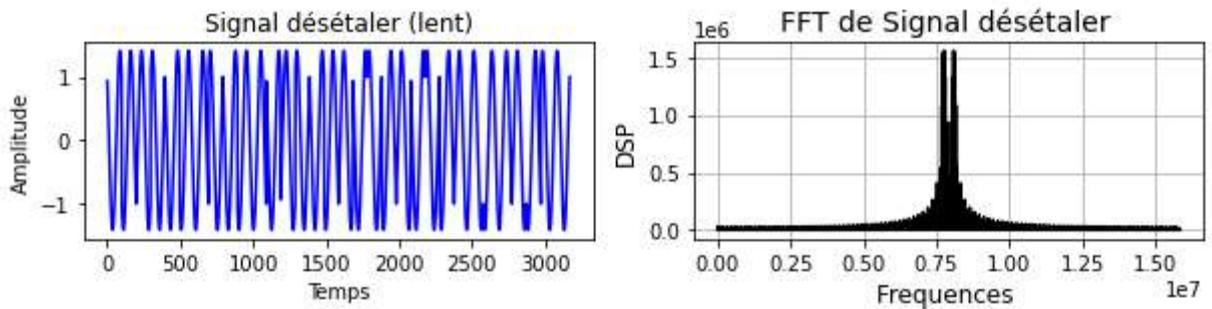


Figure 3- 56: Signal désétaler pour l'image de FHSS lent

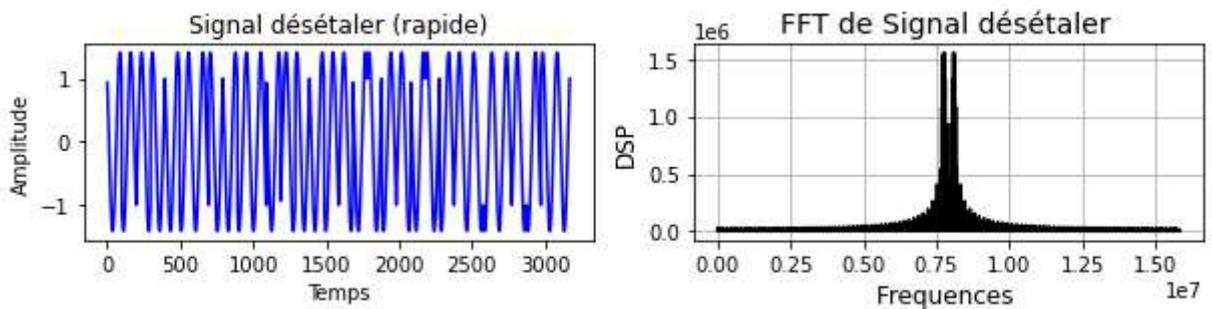


Figure 3- 57: Signal désétaler pour l'image de FHSS rapide

➤ La démodulation QPSK

La démodulation QPSK consiste d'abord à décomposer le signal reçu en ses composantes en phase (I) et en quadrature (Q) en multipliant par des signaux cosinus et sinus de la fréquence porteuse. Ensuite, les valeurs I et Q sont comparées à des seuils prédéfinis pour déterminer quel symbole QPSK (00, 01, 10, 11) a été transmis. Cette méthode permet de récupérer efficacement les données binaires transmises dans le système de données de contrôle et de télémétrie.

- Pour le système de données de contrôle

```
Données démodulées pour les quatre variables :
Variable 1 : [0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1]
Variable 2 : [0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0]
Variable 3 : [0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1]
Variable 4 : [0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0]
```

Figure 3- 58 : Les données récupérées du système de commandes

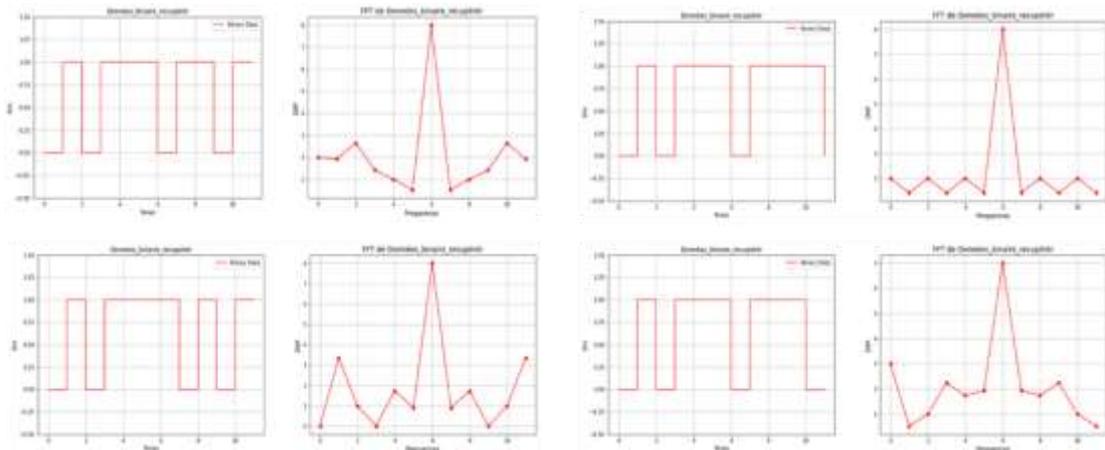


Figure 3- 59 : Représentation binaires des données récupérées du système de commandes

- Pour le système de télémétrie

```
Premiers 4 octets binaires reconstruits: [[1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1], [1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1], [1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0], [0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0]]
Premiers 4 pixels reconstruits: [135, 131, 130, 120]
```

Figure 3- 60 : Les données récupérées du système de télémétrie

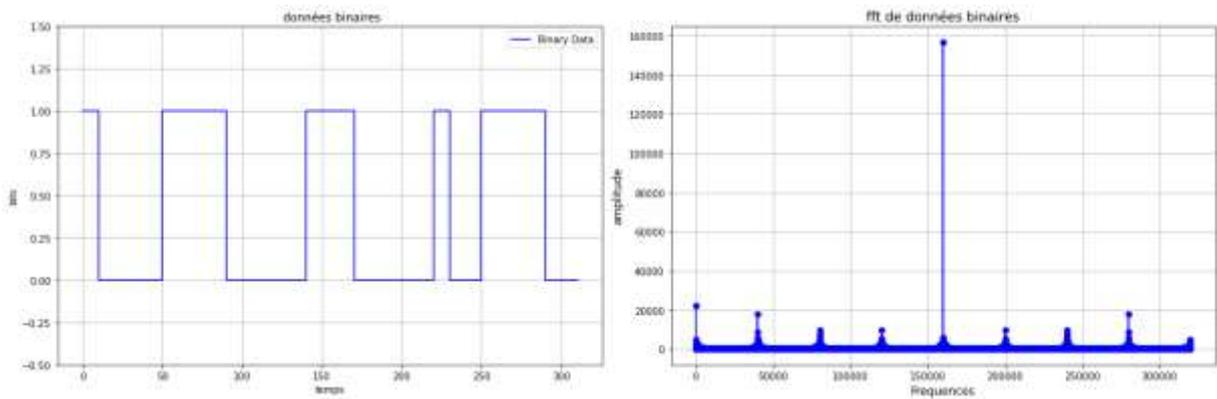


Figure 3- 61 : Représentation binaires des données récupérées du système de télémétrie

➤ Reconstruction des données récupérer

D'après la récupération des données binaires pour les deux systèmes, la reconstruction des commandes consiste à convertir les valeurs binaires en nombres décimaux, chaque nombre décimal représentant une commande comme illustré dans la figure 3- 62. Pour le système de télémétrie, les données binaires sont converties en pixels, et les pixels sont ensuite transformés en une image, comme montré dans la figure 3- 63.

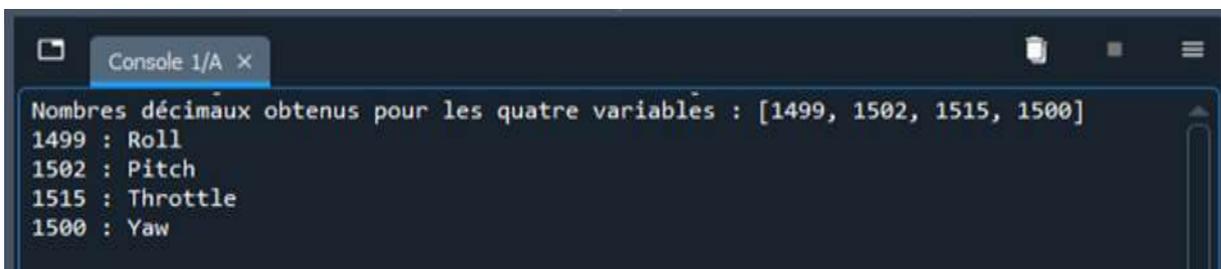


Figure 3- 62 : Conversion des données binaires en commandes décimales



Figure 3- 63 : Transformation des données binaires en image de télémétrie

3.8 Analyses des résultats

Nous avons évalué les performances des systèmes de commande et de télémétrie des drones en utilisant deux techniques FHSS : le saut de fréquence rapide et le saut de fréquence lent. La simulation compare le taux d'erreur binaire (BER) en fonction du rapport signal sur bruit (SNR) et la capacité de canal pour ces deux méthodes. Les résultats obtenus dépendent des types utilisés, ils permettent d'illustrer comment FHSS lent et FHSS rapide se comportent dans un contexte pratique de communication sans fil.

➤ Le BER en fonction de SNR

Le BER représente la proportion de bits incorrects par rapport au nombre total de bits transmis, tandis que le SNR mesure la qualité du signal par rapport au niveau de bruit présent dans le canal de transmission. Les figures suivantes montrent les valeurs du taux d'erreur binaire (BER) en fonction du rapport signal sur bruit (SNR) pour les deux types de FHSS : lent et rapide.

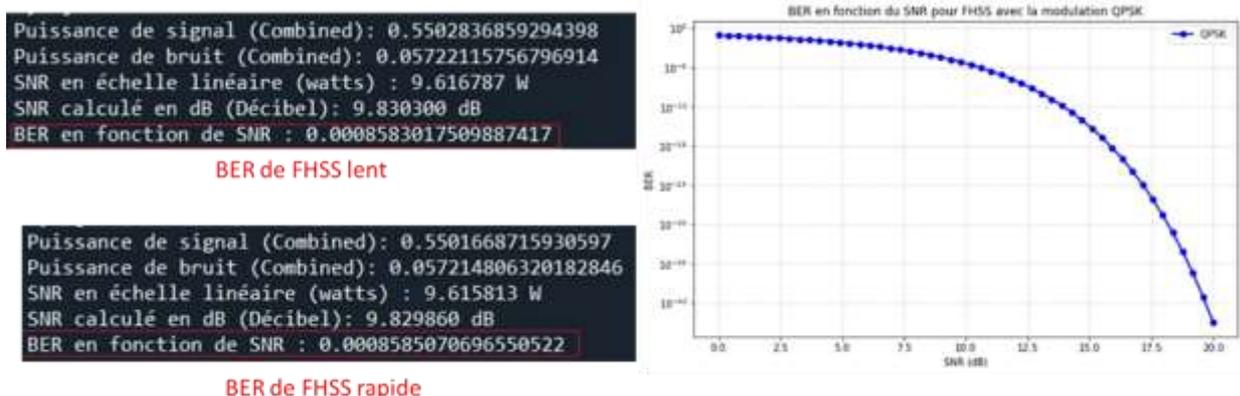


Figure 3- 64 : BER/SNR pour FHSS lent et rapide

Après avoir calculé le taux d'erreur binaire (BER) en fonction du rapport signal sur bruit (SNR), nous avons observé que la technique FHSS lent est plus efficace que FHSS rapide. En effet, le BER associé à FHSS lent est inférieur à celui de FHSS rapide.

Le tableau 3- 1 présente une comparaison entre les techniques FHSS lent et FHSS rapide.

	FHSS lent	FHSS rapide
Efficacité	Plus complexe	Moins complexe
Taux de saut	Plus efficace	Moins efficace
Bande passante	Plus élevée	Moins élevée
Sécurité	Améliorée	Moins sécurisé

Tableau 3- 2 : Comparaison de FHSS lent et rapide

➤ **La capacité de canal**

La capacité de canal est calculée afin de déterminer la quantité maximale d'information pouvant être transmise avec une probabilité d'erreur négligeable.

```

Capacité du canal pour QPSK : 8.29 Gbps
Capacité de canal FHSS lent : 16.59 Gbps

Capacité du canal pour QPSK : 8.20 Gbps
Capacité de canal FHSS rapide : 41.00 Gbps

In [58]:
    
```

Figure 3- 65 : Capacité de canal pour FHSS lent rapide

3.9 Conclusion

En conclusion, l'étude approfondie du FHSS dans des scénarios de transmission réalistes offre des perspectives prometteuses pour le développement de systèmes de communication plus robustes et adaptés aux exigences complexes des technologies modernes. Ces résultats ouvrent la voie à de nouvelles avancées dans le domaine, en consolidant le rôle du FHSS comme une solution fiable pour les communications sécurisées et résilientes aux interférences.

Conclusion générale

Dans cette conclusion, nous explorons en détail l'importance croissante du saut de fréquence étalé (FHSS) dans le renforcement de la fiabilité et de la sécurité des systèmes de communication, en particulier dans les environnements confrontés à des interférences et à des brouillages importants. Les applications des drones en constituent un exemple concret, où la stabilité et la sécurité des communications sont primordiales pour des missions critiques.

Le FHSS se distingue par sa capacité à répartir la transmission sur un large spectre de fréquences, plutôt que de se concentrer sur une seule fréquence fixe. Cette approche ingénieuse permet de minimiser considérablement l'impact des interférences et du brouillage, qui peuvent perturber et même interrompre les communications traditionnelles. En effet, en changeant fréquemment de fréquence selon un schéma prédéfini, le FHSS réduit la probabilité qu'un signal soit affecté par des interférences à un moment donné.

L'efficacité du FHSS repose sur l'optimisation de paramètres clés tels que le taux de saut et le rapport signal sur bruit (SNR). Le taux de saut détermine la fréquence à laquelle les changements de fréquence se produisent, tandis que le SNR mesure la qualité du signal par rapport au bruit de fond. En ajustant ces paramètres en fonction des exigences spécifiques de l'application, il est possible de maximiser le débit, d'améliorer la qualité de la transmission et de minimiser les erreurs de transmission (BER et SER).

Des recherches et simulations approfondies menées dans ce domaine ont réaffirmé le statut du FHSS comme solution robuste et efficace pour garantir une communication stable et sécurisée. Des études ont démontré que le FHSS peut considérablement améliorer les performances des communications en environnements perturbés, en

comparaison avec des techniques de transmission à fréquence unique plus traditionnelles.

Le potentiel du FHSS ne se limite pas aux applications critiques comme les drones. Cette technologie prometteuse ouvre des perspectives intéressantes pour le développement de systèmes de communication adaptés aux exigences complexes des technologies modernes, telles que l'Internet des objets (IoT), les réseaux de capteurs sans fil et les communications véhicule-à-tout (V2X). En offrant une meilleure résilience aux perturbations externes, le FHSS permet de créer des réseaux plus fiables et sécurisés, capables de répondre aux défis croissants de la communication sans fil dans un environnement électromagnétique de plus en plus complexe.

Finalement, l'étude du FHSS dans ce contexte confirme son rôle crucial dans l'amélioration des performances des communications, contribuant ainsi à la création de réseaux plus fiables et sécurisés pour les applications critiques et les technologies modernes. Le FHSS se positionne ainsi comme un élément clé pour répondre aux défis croissants de la communication sans fil et façonner l'avenir des réseaux de communication.

Bibliographie

- [1] « DJI Mavic 2 Zoom - Drone - LDLC | Muséericorde ». Consulté le : 24 juin 2024. <https://www.ldlc.com/fr-lu/fiche/PB00256487.html>
- [2] « DJI RoboMaster S1 », Professional-Multirotors.com. Consulté le: 24 juin 2024. <https://www.professional-multirotors.com/product/dji-robomaster-s1/>
- [3] B. Custers, Éd., *The Future of Drone Use*, vol. 27. in Information Technology and Law Series, vol. 27. The Hague: T.M.C. Asser Press, 2016. doi: 10.1007/978-94-6265-132-6.
- [4] « Les différents types de drones », Air plaisir. Consulté le: 24 juin 2024. <https://air-plaisir.com/les-differents-types-de-drones/>
- [5] G. Lamour, « AoA Drone voilure Fixe ». Consulté le: 24 juin 2024. <https://siberriavi.artstation.com/projects/ad5G9>
- [6] I. D. DA SILVA, « Optimization of UAVs deployment and coordination for exploration and monitoring applications », 2023.
- [7] « DJI Mavic 3 Thermal Enterprise With Care Plus Warranty ». Consulté le: 24 juin 2024. <https://www.dronerds.com/products/dji-mavic-3-thermal-na-sp-care-plus>
- [8] « Amewi - hélicoptère télécommandé électrique monorotor buzzard f45 pro 2.4 ghz rtf - Modèle réduit - Achat & prix | fnac ». Consulté le: 24 juin 2024. <https://www.fnac.com/mp43391912/helicoptere-telecommande-electrique-monorotor-buzzard-f45-pro-2-4-ghz-rtf-amewi/w-4>
- [9] « OMPHOBBY ZMO VTOL Aircraft FPV Drone avec Algeria | Ubuy », Ubuy Algeria. Consulté le : 24 juin 2024. <https://www.algeria.ubuy.com/fr/product/560MVOGPM-omphobby-zmo-vtol-aircraft-fpv-drone-with-hd-transmission-60mins-flying-time-plane-one-key-return-rc-airplane-compatible-with-dji-goggles>
- [10] M. Nunes Bento, « Unmanned aerial vehicles: an overview. », vol. 3, p. 9, 2008.
- [11] « Des drones de livraison pour les Marines - AVION DE CHASSE ». Consulté le: 24 juin 2024. <https://www.avion-chasse.fr/des-drones-de-livraison-pour-les-marines/>
- [12] S. Biget, « Les drones de surveillance autonomes pour les sites sensibles arrivent », Futura. Consulté le: 24 juin 2024. <https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/drone-drones-surveillance-autonomes-sites-sensibles-arrivent-74904/>
- [13] Les Frontaliers, « Vers des drones pour remplacer le facteur ». Consulté le: 24 juin 2024. <https://www.lesfrontaliers.lu/societe/vers-des-drones-pour-remplacer-le-facteur/>

- [14] AFE Drones, « Les Drones Pour une Agriculture Durable ». Consulté le: 24 juin 2024. <https://afe-drone.com/les-drones-pour-une-agriculture-durable/>
- [15] « Hanoï promeut l'utilisation des drones dans la production agricole », *lecourrier.vn*. Consulté le: 24 juin 2024. <https://lecourrier.vn/hanoi-promeut-utilisation-des-drones-dans-la-production-agricole/1167499.html>
- [16] « Actualités | Les drones au service de la topographie moderne », ATGTSM - Association de topographes géomètres techniciens d'études sud méditerranée - Cabinet de géomètres experts. Consulté le : 24 juin 2024. <https://www.atgtsm.fr/actualite/les-drones-au-service-de-la-topographie-moderne-2>
- [17] C. Dusséaux, « Drone chez les sapeurs pompiers: un outil essentiel », Drone University. Consulté le: 24 juin 2024. <https://www.droneu.fr/le-drone-chez-les-sapeurs-pompiers/>
- [18] G. ouadah. K. mohamed rafik, « MEMOIRE DE FIN D'ETUDES Contrôle intelligent d'un drone ». 2022.
- [19] Iobodol, « Réalisation d'un drone à base d'Arduino - Chapitre 2 ». Consulté le: 24 juin 2024. <https://www.firediy.fr/article/realisation-d-un-drone-a-base-d-arduino-chapitre-2>
- [20] D. Nyamuhungu, « The Design and Manufacture of A VTOL UAV », 2022, doi: 10.13140/RG.2.2.20558.74564.
- [21] « DT26 Open Payload - Drone industriel by DELAIR-TECH | AeroExpo ». Consulté le: 24 juin 2024. <https://www.aeroexpo.online/fr/prod/delair-tech/product-169628-60325.html>
- [22] « Moteur Extron Brushless EXTRON 2814/12 (1300KV) / X4015 • EUR 48,99 », PicClick FR. Consulté le: 24 juin 2024. <https://picclick.fr/Moteur-Extron-Brushless-EXTRON-2814-12-1300KV-X4015-292943907281.html>
- [23] « FG-100TS - Moteur thermique pour drone by UkrspecsysteMS | DirectIndustry ». Consulté le: 24 juin 2024. <https://www.directindustry.fr/prod/ukrspeCSysteMS/product-180961-2417551.html>
- [24] R. Jobard, *Les drones: fonctionnement, télépilotage, applications, réglementation*, 3e éd. in Serial Makers. Paris: Eyrolles, 2017.
- [25] « Les Composants du Drones ». Consulté le: 24 juin 2024. <http://blewando.fr/elv/Promo2020/th1/pag2.html?fbclid=IwAR2IMhOrE1C7U9fxo2mdL8IySWWEyBjR6cSymds1QpqwnmQgNI9NG6IWPRg>
- [26] M. A. LAMRI, Sofiane, « Mémoire de fin d'étude - Contribution à l'étude et réalisation d'un Quadrotor hybride UAV/UGV ». 2020.
- [27] M. D. LAIB Khaled, « Commande d'un quadrirotor ». 2011.
- [28] Y. Mekdad *et al.*, « A Survey on Security and Privacy Issues of UAVs ». arXiv, 5 octobre 2021. Consulté le: 24 juin 2024. <http://arxiv.org/abs/2109.14442>
- [29] M. Zohra, M. Tahar, M. Abdelmajid, et M. Tahar, « Amélioration des modèles de mobilité pour les drones de surveillance ».

- [30] P. Eline, « Procédé de transmission de commandes et d'un flux vidéo entre un drone et une télécommande par une liaison de type réseau sans fil ». 5 septembre 2012.
- [31] « Telemetry list - 7.7 ». Consulté le: 25 juin 2024. https://developer.parrot.com/docs/airsdk/telemetry/telemetry_list.html
- [32] M. Beltran, « Le Rôle Essentiel des Liens C2 Dans les Drones », EU Drone Port™ EU. Consulté le: 25 juin 2024. <https://eudroneport.com/fr/blog-fr/le-role-essentiel-des-liens-c2-dans-les-drones/>
- [33] A. Koubaa, A. Allouch, M. Alajlan, Y. Javed, A. Belghith, et M. Khalgui, « Micro Air Vehicle Link (MAVLink) in a Nutshell: A Survey ». arXiv, 22 juin 2019. Consulté le: 25 juin 2024. <http://arxiv.org/abs/1906.10641>
- [34] Y. ZOHRA et S. ANIA, « L'étude des protocoles IP, application à l'établissement d'une connexion entre le softswitch de Tizi ouzou et le media Gateway de Boumerdes. »
- [35] V. Ristić, B. Todorović, et N. Stojanović, « Frequency hopping spread spectrum: History, principles and applications », *Vojnoteh. Glas.*, vol. 70, n° 4, p. 856-876, 2022, doi: 10.5937/vojtehg70-38342.
- [36] M. Joindot et A. Glavieux, *Introduction aux communications numériques*. in Sciences sup. Paris: Dunod, 2007.
- [37] M. M. Hafssil et M. S. Bouhoun, « Codage de canal : Application des Turbocodes dans un canal satellitaire ».
- [38] O. M. Khadidja, « Étude et simulation d'une chaîne de transmissions MIIc ».
- [39] S. SAIDANI, « Sur l'égalisation adaptative dans les systèmes de communications numériques ». 7 septembre 2020.
- [40] A. Boyer, « CANAUX DE TRANSMISSIONS BRUITES », 2010.
- [41] M. Viswanathan, *Digital modulations using Matlab: building simulation models from scratch*, Black&White edition. Place of publication not identified: publisher not identified, 2017.
- [42] A. ATTATRA et B. CHERIFI, « Étude et analyse de l'estimation des canaux multi-trajets dans un système OFDM ».
- [43] K. HADJ MEKHACHE et R. REGUIBI, « ETUDE ET IMPLEMENTATION DES MODULATIONS MULTIPORTEUSES POUR LA 5G ».
- [44] « memoire master.pdf ».
- [45] R. TEKFI et A. SAAD, « Etude des techniques à étalement de spectre Application à la CDMA et simulation sous Matlab ». 2009.
- [46] AuthorCadence System Analysis, « Comparing FHSS vs. DSSS ». Consulté le: 25 juin 2024. <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2022-comparing-fhss-vs-dsss>
- [47] B. A. Schweller, « Frequency hopping spread spectrum systems using linear frequency modulation ».

- [48]M. Soucarros, « Analyse des générateurs de nombres aléatoires dans des conditions anormales d'utilisation ».
- [49]A. M. Alfadhel, « Design and Implementation of a Frequency Hopping Spread Spectrum System based on FPGA », 2019, doi: 10.13140/RG.2.2.10459.92961.
- [50]A. M. Alfadhel, « Design and Implementation of a Frequency Hopping Spread Spectrum System based on FPGA », 2019, doi: 10.13140/RG.2.2.10459.92961.