

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE JIJEL
FACULTE : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE



Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en
Télécommunication

Option : Systèmes des Télécommunications

Thème

Amélioration des performances des transmissions OFDM
par le chaos

Encadré par :
Dr. Messadi Manel

Présentée par :
Boutaleb Amir
Bouraoui Nazim

2020/2021

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du Département des Sciences Technologiques de l'UNIVERSITE DE JIJEL.

En premier lieu, nous remercions Allah soubhanouhou wa taala de nous avoir donné la volonté, pour terminer ce travail dans les meilleures conditions.

Nous remercions notre encadreur Mme : Messadi Manel de nous avoir apporté ses valeureux conseils et soutiens durant la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons ensuite à remercier les professeurs H.Bouridah et K.KEMIH qui m'ont honoré en acceptant d'être jury et pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.

Enfin, nous associons à ces remerciements tous ceux qui ont contribué à réaliser ce travail.

Merci à tous.

Dédicaces

A nos Parents

A nos Familles

A nos amis

A tous les universitaires

Amélioration des performances des transmissions OFDM par le chaos

Résumé

La transmission des signaux numériques hauts débits dans les réseaux de télécommunication présente un intérêt croissant avec la découverte des modulations multiporteuses OFDM. L'avantage porte principalement sur la robustesse et la taille spectrale optimale du signal par rapport au canal multi-trajet avec évanouissement. Malgré les avantages de l'OFDM, elle présente aussi un certain nombre d'inconvénients : d'une part, l'intervalle de garde induit une perte d'efficacité spectrale. Cette perte d'efficacité spectrale est modérée si on utilise des symboles de durée importante, et d'autre part le taux de sécurité qui est plutôt faible. Dans ce travail, on propose un système OFDM qui est capable d'offrir une meilleure qualité de transmission tout en assurant une sécurité maximale des données. Cette nouvelle approche repose sur l'utilisation du chaos pour la génération d'une modulation chaotique très efficace. Les résultats de simulation montrent l'efficacité de l'approche proposée par rapport à la modulation M-PSK.

Improved performance of OFDM transmissions by chaos

Abstract

The transmission of high speed digital signals in telecommunications networks is of increasing interest with the discovery of OFDM multicarrier modulations. The advantage mainly relates to the robustness and the optimal spectral size of the signal compared to the multipath channel with fading. Despite the advantages of OFDM, it also has a number of disadvantages: on the one hand, the guard interval induces a loss of spectral efficiency. This loss of spectral efficiency is moderate if one uses symbols of long duration, and on the other hand the safety rate which is rather low. In this work, we propose an OFDM system which is able to offer better transmission quality while ensuring maximum data security. This new approach relies on the use of chaos for the generation of a very efficient chaotic modulation. The simulation results show the effectiveness of the proposed approach compared to M-PSK modulation

تحسين أداء عمليات الإرسال OFDM من خلال الفوضى

ملخص

يحظى إرسال الإشارات الرقمية عالية السرعة في شبكات الاتصالات باهتمام متزايد مع اكتشاف تشكلات تعدد الموجات الحاملة OFDM. تتعلق الميزة بشكل أساسي بالمتانة والحجم الطيفي الأمثل للإشارة مقارنة بالقناة (multi-trajet avec évanouissement). على الرغم من مزايا تعدد الإرسال بتقسيم تعامدي للتردد (OFDM)، فإن له أيضًا عددًا من العيوب: فمن ناحية، يؤدي (Intervalle de garde) إلى فقدان الكفاءة الطيفية. تكون هذه الخسارة في الكفاءة الطيفية معتدلة إذا استخدمنا رمزًا مدتها طويلة، ومن ناحية أخرى، يكون معدل الأمان منخفضًا إلى حد ما. في هذا العمل، نقترح نظام OFDM قادر على تقديم جودة نقل أفضل مع ضمان أقصى قدر من أمان البيانات. يعتمد هذا النهج الجديد على استخدام (chaos) لتوليد (modulation chaotique) فعالة للغاية. تظهر نتائج المحاكاة فعالية النهج المقترح مقارنة بتعديل M-PSK.

Table Des Matières

Introduction Général	1
Chapitre I : Etat de l'art sur les Canaux des Transmissions	4
I.1 Introduction.....	4
I.2 Environnement sans fil.....	5
I.3 Environnement mobile	5
I.4 Catégories des réseaux sans fil.....	5
I.5 Canal de propagation sans fil	6
I.6 Modèles de canaux de communication sans fil	6
I.6.1 Propagation en espace libre	7
I.6.2 Canal propagation par trajets multiples	7
I.6.2.1 Mécanismes de propagation	9
I.6.2.2 Principales dégradations de la propagation	11
I.6.2.3 Les variations du canal de propagation	11
I.6.3 Canal à bruit blanc additif gaussien (AWGN)	15
I.7 Les effets des conditions de propagation	15
I.7.1 L'effet Doppler	15
I.7.2 L'effet trajets multiples et ses conséquences	16
I.8. Conclusion	16
Chapitre II : Etude des transmissions OFDM.....	17
II.1 Introduction.....	17
II.2 Technique OFDM	18
II.3 Orthogonalité	18
II.3.1 Rappel mathématique	19
II.3.2 Application au procédé OFDM : L'orthogonalité temporelle	19
II.3.3 Application au procédé OFDM : l'orthogonalité fréquentielle	20

II.4. Le problème d'interférence	21
II.4.1 Interférences entre symboles IES	21
II.4.2 Interférence entre sous porteuse	22
II.4.3 Intervalle de garde	22
II.4.3.1 Préfixe cyclique	23
II.4.3.2. Zero Padding (ZP)	24
II.5 Modulation et Démodulation OFDM	24
II.5.1 Modulation OFDM	24
II.5.2 Démodulation OFDM	25
II.6 Implantation numérique	26
II.6.1 Implantation numérique du modulateur	26
II.6.2 Implantation numérique du démodulateur	27
II.7. Conversion série parallèle	27
II.8 Le passage du domaine fréquentiel au domaine temporel	28
II.9 Critère de comparaison des performances	28
II.9.1. La probabilité d'erreur (P_e)	28
II.9.2. BER ou TEB (Taux d'erreur binaire)	29
II.9.3. Rapport signal sur bruit (SNR)	29
II.10 Domaine d'application OFDM	29
II.11 Avantages et inconvénients de l'OFDM	29
II.11.1 Avantages	29
II.11.2 Inconvénient de l'OFDM	30
II.12. Conclusion	30
Chapitre III : Etudes de la modulation chaotique	31
III.1 Introduction	31
III.1 Chaos	31
III.3 Les systèmes chaotiques et les télécommunications	32
III.3.1 Les systèmes dynamiques	32
III.3.2 La notion de système dynamique	32
III.3.3 Les types des systèmes dynamiques	32
III.3.4 Propriétés des systèmes chaotiques	32
Non-linéarité	33

Déterminisme	33
Aspect aléatoire	33
Sensibilité au conditions initiales	34
III.4. Notion d'attracteur	35
III.5. Exposant de Lyapunov	35
III.6. Exemples de systèmes chaotiques	36
III.6.1. Systèmes à temps continu	36
Système de Lorenz	36
Système de Chen	38
III.6.2. Systèmes à temps discret	39
Suite logistique (Logistic Map)	39
Système de Hénon	40
III.7. Domaine d'application chaos	41
III.8. Modulation chaotique	42
III.8.1 Théorie du fonctionnement de la modulation chaotique	42
III.8.2 Méthodes de modulation chaotique	42
III.8.2.1 Masquage chaotique	42
III.8.2.2 Chaos Shift Keying, CSK	43
III.8.2.3 Modulation paramétrique	43
III.8.2.4 Modulation par inclusion	44
III.9. Avantages et inconvénients des transmissions par chaos	45
III.10. Conclusion	45
Chapitre IV : Simulation des résultats et discussions	46
IV.1 Introduction	46
IV.2 Évaluation des performances des différentes modulations (BPSK, QPSK, 8-PSK)	47
IV.3 Principe de la modulation chaotique utilisé	48
▪ La modulation	48
▪ La démodulation	48
IV.4 Comparaison entre la modulation chaotique et la modulation BPSK	48
IV.5 Comparaison entre OFDM-chaos et OFDM-psk	49
▪ Système de communication OFDM avec modulation PSK	49
▪ Système de communication OFDM avec modulation CHAOTIQUE	50

▪ Résultats de la simulation	50
IV.6 Conclusion	51

Table Des Figures

Figure I.1 : Classification des communications sans fil	6
Figure I.2 : Schéma synoptique d'une chaîne de communication	6
Figure I.3 : Propagation par multi-trajets dans un environnement	8
Figure I.4 : Propagation multi-trajets NLOS : Canal de Rayleigh	8
Figure I.5 : Propagation multi-trajets LOS : Canal de Rice	9
Figure I.6 : Principaux phénomènes de propagation	11
Figure I.7 : Les variations de la puissance reçue en fonction de la distance parcourue	12
Figure I.8 : Représentation de distribution de Nakagami-m	14
Figure II.1 : Représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM	18
Figure II.2 : Exemple d'une base orthogonale	19
Figure II.3 : Exemple d'une base orthogonale dans le domaine temporel	20
Figure II.4 :(a) spectre d'une sous porteuse (b) spectre d'un signal OFDM	21
Figure II.5 : exemple d'une base orthogonale dans le domaine fréquentiel	21
Figure II.6 : effets du canal a trajets multiples sur des symboles reçus dans le cas (a) Monoporteuse (b) Multiporteuse	22
Figure II.7 : illustration de l'effet de l'intervalle de garde précédent chaque symbole OFDM... 23	23
Figure II.8 : Le temps de garde	23
Figure II.9 : schéma principe d'un modulateur	24
Figure II.10 : spectre de sortie de modulateur OFDM	25
Figure II.11 : Schéma de principe du démodulateur OFDM	25
Figure II.12 : schéma principe d'un modulateur	26
Figure II.13 : Modulateur OFDM numérique	27
Figure II.14 : Démodulateur OFDM numérique	27
Figure II.15 : Conversion série-parallèle	28
Figure III.1 : Evolution dans le temps d'un système chaotique, comparé à une sinusoïde ...	33
Figure III.2 : Illustration de la propriété de sensibilité aux conditions initiales sur l'état x_1	34
Figure III.3 : Divergence de deux trajectoires dans le plan de phase	36

Figure III.4 : Attracteur de Lorenz	37
Figure III.5 : (a) La première coordonnée, x	37
Figure III.6 : (b) Attracteur chaotique de Lorenz	38
Figure III.7 : Attracteur de Chen	38
Figure III.8 : Etude du comportement dynamique pour la fonction logistique (eq :1.4)	39
Figure III.9 : Trajectoire de la fonction logistique	40
Figure III.10 : Application logistique pour $r = 4$	40
Figure III.11 : Attracteur de Hénon	41
Figure III.12 : schéma synoptique de la modulation chaotique	42
Figure III.13 : Système de communication par masquage chaotique	43
Figure III.14 : Principe du chiffrement chaotique par commutation	43
Figure III.15 : Schéma représentatif de la modulation paramétrique	44
Figure III.16 : Schéma représentatif de la modulation par inclusion	44
Figure IV.1 : variation de BER en fonction SNR pour différents états de modulation	47
Figure IV.2 : schéma synoptique de la modulation chaotique	48
Figure IV.3 : variation de BER en fonction SNR pour la modulation chaotique et la modulation BPSK	49
Figure IV.4 : schéma synoptique de la transmission OFDM-PSK	49
Figure IV.5 : schéma synoptique de la transmission OFDM-chaos	50
Figure IV.6 : variation de BER en fonction SNR pour la transmission OFDM-psk et OFDM-chaos	50

Liste des tableaux

Tableau IV.1 : Les paramètres utilisés dans la simulation.....47

Glossaires

WPAN (Wireless Personal Area Networks)

WMAN Wireless metropolitan area network

WLAN Wireless Local Area Network

WWAN Wireless Wide Area Network

NLOS None Line Of Sight

LOS Line Of Sight

AWGN Additive White Gaussian Noise

OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

WI-MAX :Worldwide Interoperability for Microwave Access

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers)

LTE: Long Term Evolution

5G : fifth generation

FDM : Frequency-division multiplexing

MCM :multi-carrier modulation

FFT :Fast Fourier Transform

CP : Cyclic Prefix

ISI : Inter-symbol Interference

HDTV : High definition television

DAB : Digital Audio Broadcasting

ICI : Intercarrier interference

IFFT : Inverse Fast Fourier Transform

QAM : Quadrature Amplitude Modulation

S / P : Série /Parallèle

E_b/N₀ : Rapport énergie par bit sur densité spectrale de bruit

(Bit energy-to-noise density ratio)

BER : Bit Error Rate

Pe : probabilité d'erreur

TEB: Taux d'erreur binaire

SNR : Signal to Noise Ratio

Introduction générale

Au cours des dernières décennies, le monde des télécommunications a connu des progrès considérables. Le développement de l'informatique a réalisé la numérisation de l'information, permettant la transmission de différents types de données : voix, image, vidéo, Internet, etc. [1].

La communication sans fil utilise un canal radio comme moyen de transmission (ce sont les ondes électromagnétiques qui transportent les informations à transmettre). Cependant, ceci fait l'objet d'un grand nombre de sources d'interférence du signal émis et réduit fortement la qualité du signal. Comme il existe plusieurs chemins dans cet environnement, un évanouissement rapide entraînera des fluctuations de puissance instantanées au niveau du détecteur, ce qui affecte directement la qualité de transmission et la capacité de la liaison. Le signal atteignant le détecteur ne sera jamais constitué d'une seule onde, mais d'une superposition d'un grand nombre d'ondes générées par interaction avec l'environnement (réflexion, diffraction, propagation d'obstacles). En fait, la capacité de transmission de données est également liée aux limitations du système de transmission, à la technologie appropriée pour le partage des ressources entre utilisateurs et au traitement du signal reçu.[2]

L'augmentation rapide de la voix, des images et des communications de données sur Internet et sans fil par la téléphonie mobile nécessite une recherche et un développement intensifs pour définir la prochaine génération de systèmes de communication où les réseaux fixes traditionnels. Internet et les réseaux mobiles fusionneront pour former un système de communication sans fil à large bande.[3]

La transmission d'informations par ondes électromagnétiques dans l'air présente l'inconvénient d'être affectée par le milieu de propagation. Les obstacles tels que les bâtiments, les voitures et bien sûr la topographie du milieu absorberont et refléteront un certain pourcentage d'ondes radio. Ensuite, le canal de propagation radio est caractérisé par trois phénomènes physiques qui interfèrent avec la nature du signal d'information, à savoir l'atténuation avec la distance parcourue, l'effet de masque (shadowing), et l'évanouissement multi-trajets (fading). Ensuite, diverses techniques (y compris une modulation plus avancée)

doivent être utilisées pour compenser ces distorsions de signal dans le canal de propagation radio mobile afin de récupérer efficacement les informations.[4]

Il existe deux méthodes de transmission de données : la première est appelée type série, dans laquelle différents symboles sont envoyés les uns après les autres. Pour cette méthode, dans un environnement à trajets multiples, les performances de ces systèmes sont parfois sévèrement limitées, et ils doivent utiliser des circuits d'égalisation complexes pour résister aux interférences entre symboles (IES). Dans ce cas, la capacité du système d'égalisation limite le débit binaire. Pour la deuxième méthode (appelée système parallèle), les données seront transmises à un débit binaire faible, mais sur un grand nombre de porteuses, ce qui est différent de la première méthode où la transmission se fait sur une seule porteuse à haut débit.

Depuis les années 50, les systèmes parallèles ont fait l'objet de nombreuses études. La plupart des recommandations nécessitent l'utilisation simultanée de plusieurs méthodes de modulation sur différentes fréquences. Étant donné que la technologie existante ne pouvait pas minimiser la complexité de ces systèmes, presque toutes les recherches pour ce type de transmission ont été abandonnées au profit des systèmes série plus simples. À partir des années 80, les systèmes parallèles se retrouvent de plus en plus dans différentes applications grâce au développement des technologies numériques de traitement de signal et aux progrès récents des circuits électroniques et des technologies à haute densité d'intégration.[5][6]

Les systèmes de communication d'aujourd'hui ont plusieurs caractéristiques. L'une de ces caractéristiques est le débit de transfert des données, qui change et augmente généralement en fonction de la nature des données et de l'application. Une de ces applications est la norme d'accès Internet à large bande ADSL ("Asymmetric Digital Subscriber Line").

Plusieurs techniques et plusieurs technologies sont utilisées pour atteindre un débit élevé. Un exemple de ces techniques est la modulation multi-porteuse dite OFDM. Comme toutes les autres technologies, la modulation multi-porteuse présente des avantages et des inconvénients. L'avantage porte principalement sur la robustesse et la taille spectrale optimale du signal par rapport au canal multi-trajet avec évanouissement.[7]

Malgré les avantages de l'OFDM, elle présente aussi un certain nombre d'inconvénients : d'une part, l'intervalle de garde induit une perte d'efficacité spectrale. Cette perte d'efficacité spectrale est modérée si on utilise des symboles de durée importante, et d'autre part le taux de sécurité qui est plutôt faible.

La transmission OFDM consiste à répartir l'information sur un grand nombre de sous porteuses, créant ainsi des sous-canaux très étroits. Elle convient à des types de propagations par trajets multiples. La répartition des symboles sur plusieurs sous porteuse est la propriété la

plus attrayante de la transmission OFDM. Cette dernière est robuste relativement au délai d'étalement et par conséquent réduit le taux de transmission par sous-porteuse.[8]

Dans le cadre de notre travail de fin d'études, nous allons proposer une nouvelle approche pour les transmissions OFDM, l'objectif de cette approche est double, crypter l'information transmise et augmenter la qualité de transmission. Pour cela, on propose l'application du chaos pour la génération d'une modulation dite ("modulation chaotique au lieu d'une modulation classique telle que M-PSK").

Le présent manuscrit est structuré en quatre chapitres plus une introduction générale et une conclusion générale :

Le chapitre 01 : État de l'art sur les canaux des Transmissions

Le chapitre 02 : Etude des transmissions OFDM.

Le chapitre 03 : Etudes de la modulation chaotique.

Le chapitre 04 : Simulation des résultats et discussions.

Chapitre 1 : Etat de l'art sur les Canaux des Transmissions

I.1. Introduction :

La communication sans fil dans des environnements sévères tels que les environnements industriels nécessitent une étude approfondie du canal de propagation afin de pouvoir prédire la qualité et la fiabilité de la liaison radio. Dans un environnement industriel, la propagation des ondes dépend dans une large mesure de la structure des bâtiments, des objets, des machines et des personnes. Les ondes porteuses de signaux sont affectées par des phénomènes physiques existants dans leur environnement de propagation, tels que l'atténuation, la réflexion, la réfraction et l'absorption. Par conséquent, la puissance du signal transmis sera affaiblie, et parfois même complètement absorbée. Pour estimer le canal de propagation, il existe plusieurs méthodes basées sur la mesure ou la modélisation mathématique. De manière générale, les méthodes basées sur la mesure sont coûteuses et complexes à mettre en œuvre. Par conséquent, le modèle de propagation est préétabli afin de fournir une alternative à moindre coût. L'étude du canal de propagation en milieu industriel permettra de proposer des stratégies d'émission/réception de données qui rendent l'échange d'information le plus fiable possible.

On observe une croissance constante des débits de transmission ainsi que le besoin de se libérer des câbles afin de permettre aux utilisateurs de se déplacer dans de grands bâtiments tout en maintenant une qualité acceptable des communications. La qualité des communications d'intérieur sans fil dépend principalement du canal. En général, le canal d'intérieur sans fil est un canal à trajets multiples qui varie continuellement dans le temps.

C'est pour cela il est nécessaire de développer l'utilisation de la technique du multiplexage par division de fréquences orthogonales OFDM, nous ferons l'étude d'une nouvelle technique OFDM fiable et sécurisée dans le chapitre 4.

I.2. Environnement sans fil : [9]

Comme son nom l'indique, un réseau sans fil est un réseau dans lequel différentes stations ou systèmes peuvent communiquer entre eux via des ondes radio. Grâce aux réseaux sans fil, il est possible pour les utilisateurs de rester connectés tout en se déplaçant dans une zone géographique plus ou moins étendue, c'est pourquoi on entend parfois « mobilité ».

I.3. Environnement mobile : [10]

L'environnement mobile est un système de nœuds mobiles qui permet aux utilisateurs d'accéder aux informations en communiquant à l'aide d'ondes radio au lieu d'une infrastructure filaire, quelle que soit leur situation géographique. En raison de leur facilité de déploiement et de leur coût relativement faible, les réseaux sans fil sont de plus en plus utilisés. L'environnement mobile offre une grande souplesse d'utilisation. En particulier ils permettent notamment la mise en réseau de sites trop coûteux à réaliser, voire impossibles à réaliser.

L'environnement sans fil présente de nombreux avantages par rapport à l'environnement filaire traditionnel. Cependant, en raison des nouvelles fonctionnalités du système, de nouveaux problèmes peuvent survenir (par exemple : problèmes de routage).

I.4. Catégories des réseaux sans fil : [11]

Un réseau sans fil est un réseau où deux ou plusieurs nœuds peuvent communiquer sans aucune connexion filaire. Ces réseaux de communication permettent aux utilisateurs de profiter de tous les services réseau traditionnels, quelle que soit leur situation géographique. Les réseaux sans fil peuvent être classés selon deux normes. Le premier est la zone Couverture du réseau. Au vu de cette norme, il existe quatre catégories : Réseaux personnels WPAN (Wireless Personal Area Networks), WLAN (Wireless Local Area Networks), le réseau métropolitain WMAN (Wireless Metropolitan Area Networks) et les réseaux étendus WWAN (Wireless Wide Area Networks), le deuxième critère est l'infrastructure et le modèle utilisé. Par rapport à cette norme, les réseaux sans fil peuvent être divisés en : Réseaux d'infrastructure, réseaux hors infrastructure et réseaux hybrides comme on le voit dans l'illustration de la **Figure I.1** :

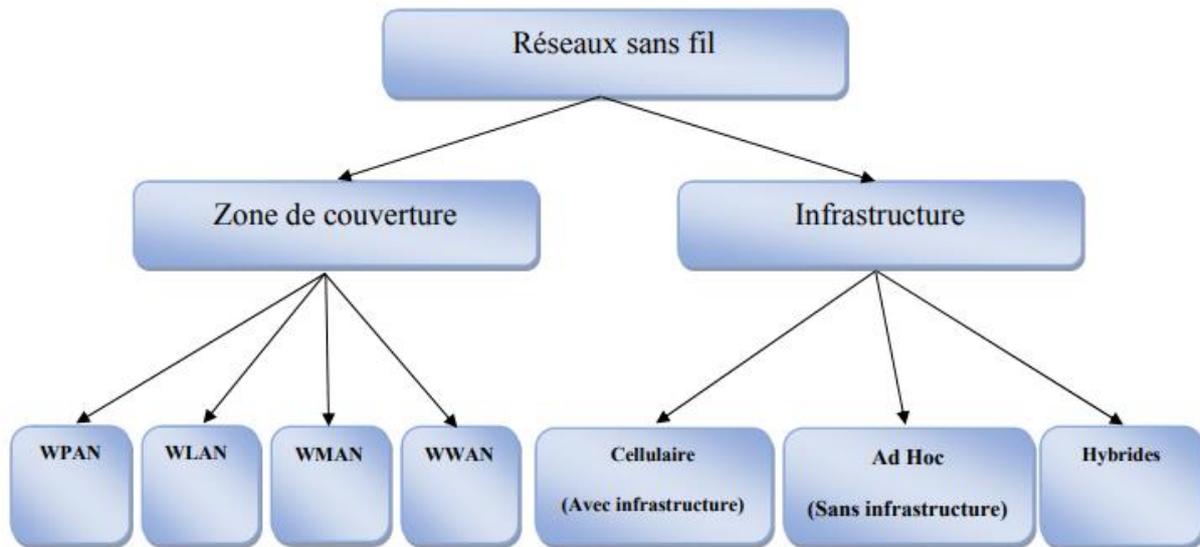


Figure I.1 : Classification des communications sans fil

I.5. Canal de propagation sans fil :

Le canal de propagation est le support de transmission qui véhicule les ondes électromagnétiques lors de leur propagation. Généralement, ce support de propagation a une influence sur l'onde électromagnétique émise et va dépendre de la présence ou absence des obstacles dans cet environnement. [12]

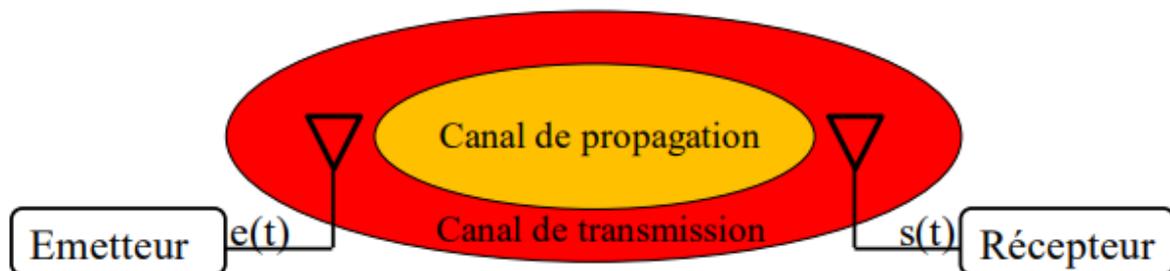


Figure I.2 : Schéma synoptique d'une chaîne de communication

I.6. Modèles de canaux de communication sans fil :

Dans la conception des systèmes de communications, il est nécessaire de construire les modèles mathématiques qui caractérisent le milieu de propagation. Les modèles les plus connus dans les communications sans fil sont donnés dans la suite :

I.6.1. Propagation en espace libre : [13]

Généralement, l'environnement de propagation a une influence sur l'onde électromagnétique émise. En espace libre (qui est caractérisé par l'absence d'obstacles), cette onde se propage de l'émetteur jusqu'au récepteur en ligne directe. La puissance reçue s'exprime en fonction du gain de l'émetteur et du récepteur et, de leur distance de propagation d et de la longueur d'onde. D'après l'équation de transmission de FRIIS, la puissance reçue s'écrit de la manière suivante :

$$P_r = P_e G_e G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \text{ (watt)} \quad (\text{I.1})$$

I.6.2. Canal propagation par trajets multiples

Dans un système sans fil, l'environnement du système de transmission interfère avec l'onde transmise selon différents mécanismes. Le récepteur peut recevoir le même signal de plusieurs trajets différents puisque les signaux transmis peuvent se réfléchir sur une surface comme le sol, les bâtiments ... etc. Dans la pratique, il est fréquent que deux ou plusieurs phénomènes s'appliquent simultanément au trajet d'un signal. Cet effet est appelé propagation par trajets multiples. En effet, il existe cinq phénomènes principaux la réflexion, la réfraction, la diffraction, la diffusion le guidage d'onde qui ont un impact direct sur la propagation du signal.

Les ondes émises lors de la communication radio subissent généralement une combinaison de ces phénomènes. Le signal reçu est une somme de tous les trajets arrivant au récepteur et cette somme peut être constructive ou bien destructive. Les obstacles peuvent être considérés comme un avantage ou un inconvénient.

Dans la propagation par trajets multiples, on distingue généralement deux situations de propagation [14] :

Le premier cas est désigné par le terme NLOS (None Line Of Sight), où il n'y a pas de ligne de vue entre l'émetteur et le récepteur. Dans ce cas, la densité de probabilité de l'amplitude totale d'évanouissement du signal reçu suit la loi de Rayleigh (**Figure I.4**)

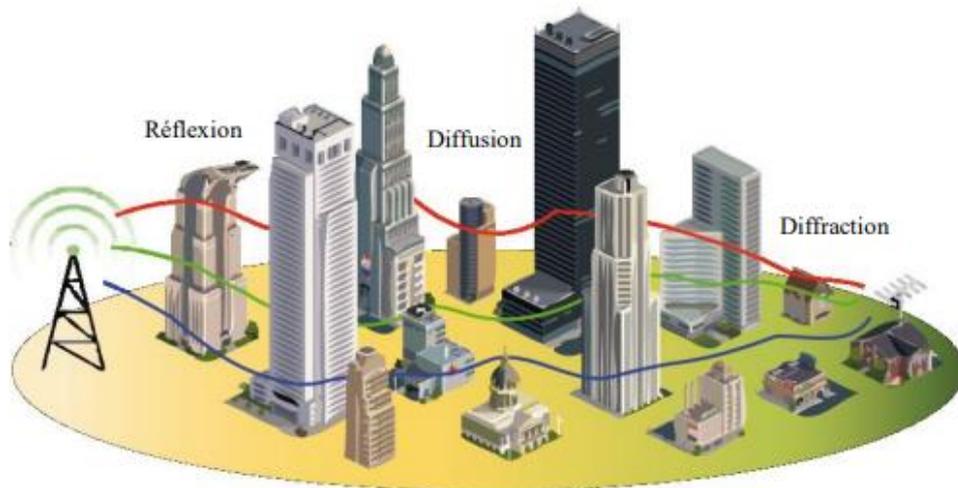


Figure I.3 Propagation par multi-trajets dans un environnement

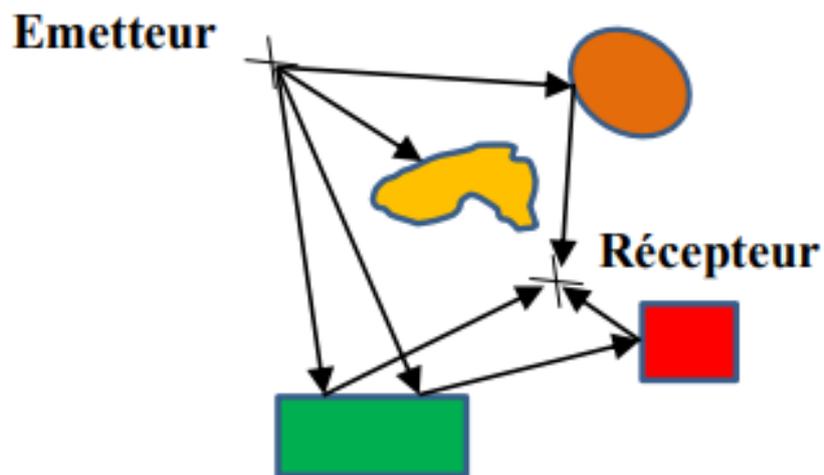


Figure I.4 : Propagation multi-trajets NLOS : Canal de Rayleigh

Le deuxième cas apparaîtra lorsqu'il y a un chemin direct dominant (Line Of Sight, LOS) (**Figure I.5**), de sorte que l'amplitude d'évanouissement a une caractéristique de distribution de Rice.

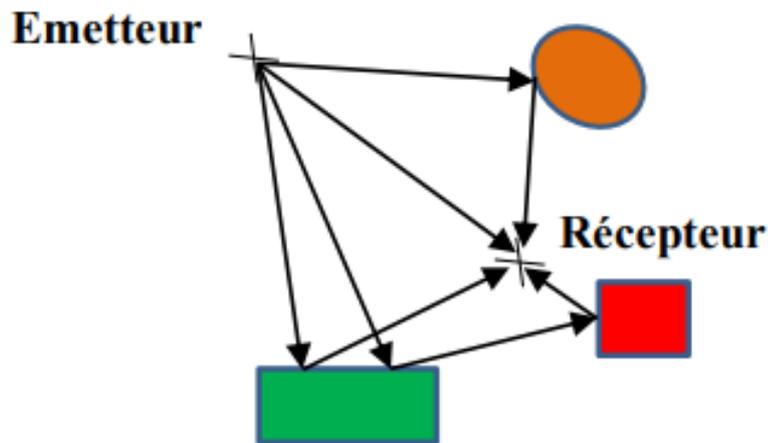


Figure I.5 : Propagation multi-trajets LOS : Canal de Rice

Selon la nature des objets rencontrés durant le parcours des trajets multiples, divers phénomènes électromagnétiques sont dégagés tels que : la réflexion, la diffraction et la diffusion sur des obstacles. [14] [15]

I.6.2.1. Mécanismes de propagation [16] [17]

Les principaux mécanismes de propagation illustrés dans la **Figure I.6** sont :

- **La réflexion** : la réflexion intervient lorsque l'onde rencontre une surface lisse, il apparaît alors la réflexion qui peut être spéculaire ou diffuse. La réflexion spéculaire apparaît lorsque deux milieux différents sont séparés par une surface de dimensions très supérieures à la longueur d'onde et dont les irrégularités sont très petites par rapport à la longueur d'onde. Dans le cas particulier où la surface de l'obstacle présente une certaine rugosité par rapport à la longueur d'onde, une onde incidente peut être réfléchiée dans plusieurs directions et la réflexion devient diffuse.
- **La réfraction** : La réfraction est observée lorsque les ondes traversent des murs, des cloisons, etc. Les ondes qui traversent ces obstacles subissent une réduction de puissance et tournent dans une autre direction. La plupart des modèles de propagation radio mobile ne prennent pas en compte l'absorption des corps humains et des arbres. Dans le cas de la propagation des ondes millimétriques, ces effets deviennent importants.
- **La transmission** : si le milieu où intervient la réflexion n'est pas totalement radio-opaque, une partie de l'onde incidente traverse le matériau selon un mécanisme de transmission. Pour la plupart des matériaux de construction présents dans les environnements intérieurs, l'onde transmise subit alors un affaiblissement qui peut être important. On peut noter que pour un

matériau donné, l'affaiblissement et la direction du signal transmis dépendent de la longueur d'onde, en raison de la variation de la permittivité diélectrique du matériau. Enfin, dans un élément de type cloison, des réflexions multiples peuvent se produire à l'intérieur de la cloison.

- **La diffraction** : ce phénomène a lieu lorsqu'une onde rencontre une surface ou une arrête de dimensions grandes par rapport à la longueur d'onde ou sur des obstacles dont certaines dimensions sont de l'ordre de la longueur d'onde. L'onde ne sera pas entièrement arrêtée par cet obstacle, mais une partie de son énergie électromagnétique contournera l'obstacle. Il y a changement de direction de la propagation. La diffraction apparaît lorsque la liaison entre l'émetteur et le récepteur est gênée par une surface qui a des parties anguleuses. L'énergie transmise par ces sources permet au signal de se propager dans les zones d'ombre, expliquant ainsi que les ondes radio arrivent au niveau du récepteur en l'absence de visibilité directe ou de l'intervention d'autres types d'interaction.

- **La diffusion** : la diffusion a lieu quand une onde se propage vers des surfaces de dimensions du même ordre de grandeur ou plus petites que la longueur d'onde, ou avec des irrégularités plus petites que la longueur d'onde. Chaque irrégularité va créer une onde diffractée. Dans ce cas, l'onde est redistribuée dans toutes les directions avec différentes atténuations. Nous pouvons par exemple trouver ce phénomène de propagation des ondes en présence d'arbres placés au milieu du trajet de transmission.

- **Les effets des ondes guidées** : l'effet de guidage apparaît dans un couloir et dans un tunnel par exemple. Dans ce cas, l'onde se propage en direction du récepteur. La réflexion continue sur deux obstacles parallèles provoque le déplacement global de l'onde électromagnétique dans la direction de guidage. La structure métallique du véhicule et le sol peuvent également former un guide d'ondes, ce que nous verrons plus loin.

- **L'absorption** [22]

Un objet ou un support, selon sa matière de fabrication, peut absorber tout ou partie des ondes qui l'atteignent. L'absorption totale de l'onde par l'objet se traduit par une zone communément appelée « zone d'ombre » dans laquelle le dispositif récepteur ne pourra pas intercepter le signal émis.

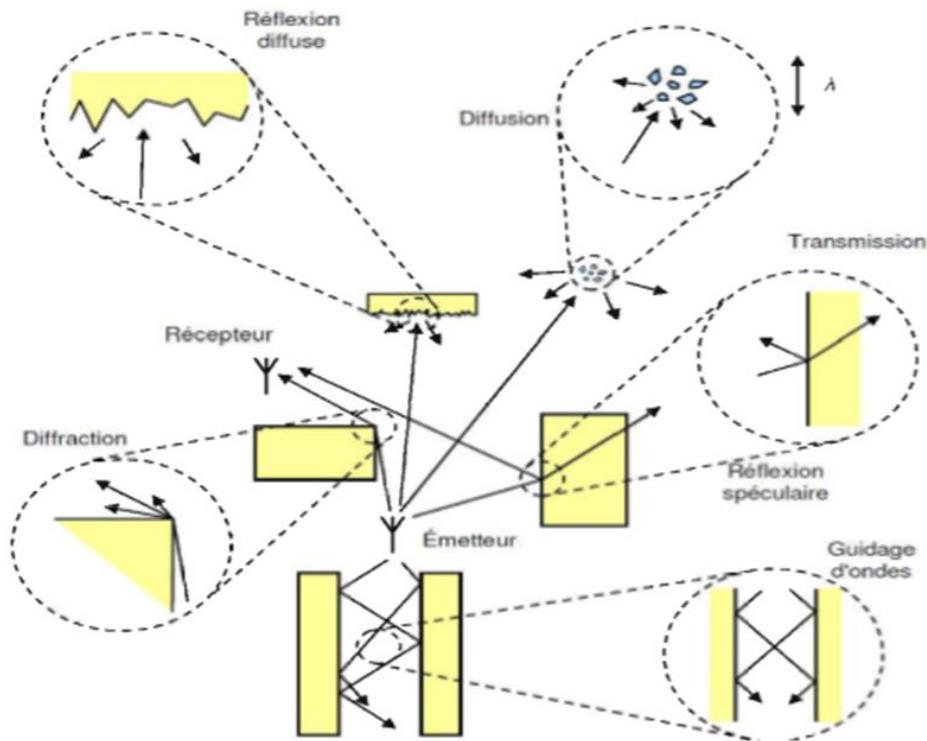


Figure I.6 : Principaux phénomènes de propagation [17]

I.6.2.2. Principales dégradations de la propagation : [13]

Si on analyse la puissance du signal reçu en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur, on distingue trois types de variations de la puissance reçue :

- **Affaiblissement de parcours (path loss) :** dû à la distance, il peut se calculer de manière déterministe ou avec un modèle empirique lorsqu'un environnement se complique.
- **L'ombrages ou évanouissement lent (shadowing ou slow fading) :** des variations lentes dues aux atténuations successives produites par de gros obstacles locaux qui causent de la diffraction.
- **Évanouissement rapide ou multi trajets (fast fading ou multipath fading) :** des variations rapides causées par les trajets dus à l'addition constructive ou destructive des signaux qui ne peut être déterministe

I.6.2.3. Les variations du canal de propagation :

Lors de la propagation de l'émetteur au récepteur, les phénomènes électromagnétiques génèrent de multiples copies du signal émis (propagation par trajets multiples).

A la réception, ces répliques arrivent à des instants différents avec une atténuation et un déphasage donné. Par conséquent, il existe trois types de changements dans la puissance reçue, comme le montre **Figure I.7** :

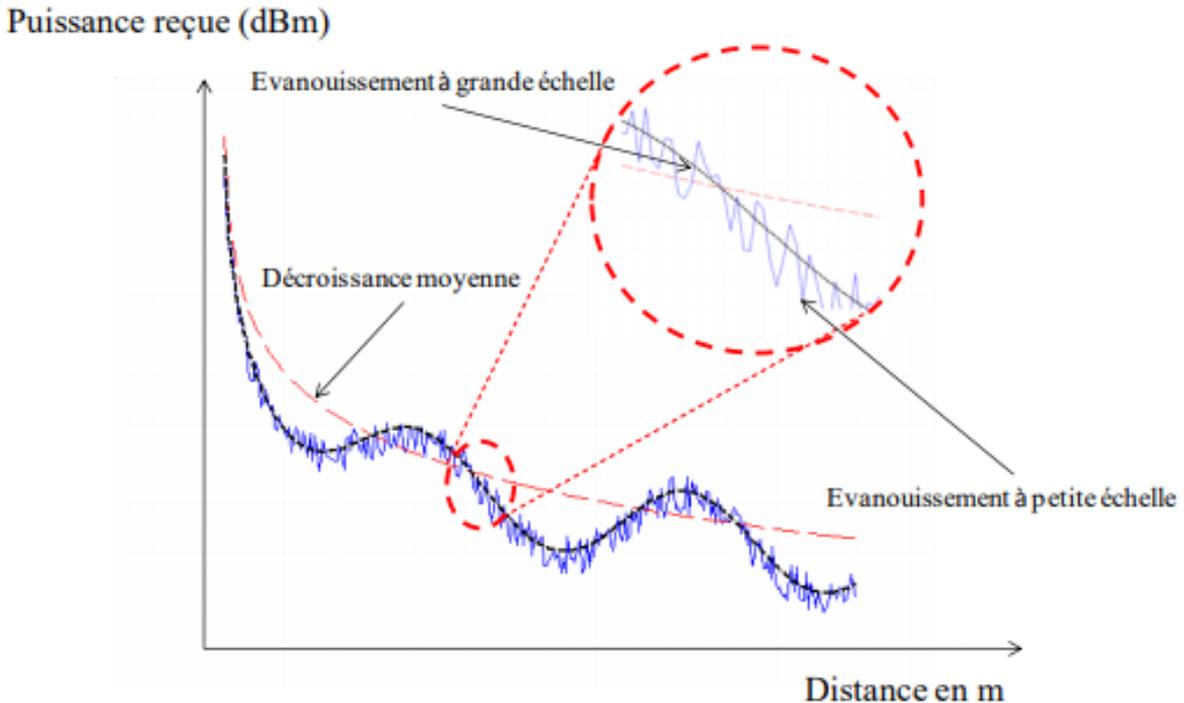


Figure I.7 : Les variations de la puissance reçue en fonction de la distance parcourue

La décroissance moyenne reçue est due à l'augmentation de la distance entre l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice.

L'évanouissement à grande échelle représentant la fluctuation de la puissance moyenne reçue par un déplacement de l'ordre de la dizaine de la longueur d'onde.

L'évanouissement à petite échelle associée à des interférences constructives et destructives entre différentes copies du signal émis par l'antenne de réception.

Le signal total reçu n'est qu'une interférence entre plusieurs chemins, ce qui peut être fait de manière constructive ou destructive. Ce dernier produit des évanouissements profonds en fonction de la phase de chaque signal élémentaire. Ces évanouissements sont appelés « évanouissements de Rayleigh ». Dans ce cas, l'amplitude du signal reçu fluctuant très rapidement sur une très courte distance, une représentation statistique est nécessaire. Les distributions les plus couramment utilisées sont : Rayleigh, Rice et Nakagami-m. [14]

La distribution de Rayleigh :

La distribution de Rayleigh correspond à la situation idéale. Dans ce cas, le signal complexe reçu se compose d'un grand nombre de chemins indirects (NLOS) avec une amplitude et une phase aléatoire, indépendantes et uniformément réparties. L'enveloppe de ce signal suit la loi de Rayleigh définie par l'équation suivante :

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \left(\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \right) \cdot r \geq 0 \quad (\text{I.2})$$

Où r est l'enveloppe du signal complexe reçu, et σ est l'écart type de la partie réelle et la partie imaginaire.

D'autres propriétés utiles de cette distribution sont données par :

- La valeur moyenne :

$$E(r) = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (\text{I.3})$$

- La valeur quadratique moyenne :

$$E(r^2) = 2\sigma^2 \quad (\text{I.4})$$

-La variance :

$$E(r^2) - E(r)^2 = \sigma^2 \left(\frac{4-\pi}{2} \right) \quad (\text{I.5})$$

Distributions de Rice :

Dans d'autres cas, le canal de propagation est caractérisé par plusieurs chemins indirects et un chemin direct (LOS). Par conséquent, la densité de probabilité de l'enveloppe du signal complexe reçu obéit à la distribution de Rice définie comme :

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \left(\exp\left(-\frac{r^2+r_d^2}{2\sigma^2}\right) \right) I_0\left(\frac{rr_d}{\sigma^2}\right); r \text{ et } r_d \geq 0 \quad (\text{I.6})$$

Où r_d est l'amplitude du trajet direct et I_0 représente la fonction de Bessel modifiée de première espèce et d'ordre zéro.

Cette loi possède les caractéristiques suivantes :

-Valeur moyenne :

$$E\{r\} = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\frac{r_d^2}{4\sigma^2}\right) \left[\left(1 + \frac{r_d^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{r_d^2}{4\sigma^2}\right) + \frac{r_d^2}{4\sigma^2} I_1\left(\frac{r_d^2}{4\sigma^2}\right) \right] \quad (\text{I.7})$$

-Valeur quadratique moyenne :

$$E\{r^2\} = 2\sigma^2 + r_d^2 \quad (\text{I.8})$$

-Variance :

$$E\{x^2\} - E\{x\}^2 \quad (\text{I.9})$$

Distribution de Nakagami-m :

Dans la plupart des cas, les distributions de Rayleigh et de Rice sont suffisantes pour caractériser la distribution d'évanouissement du signal reçu dans le canal radio mobile. Cependant, certains canaux ne sont ni des caractéristiques de Rayleigh ni de Rice. Par exemple, si le canal est caractérisé par deux chemins de puissance égale et plus forts que les autres canaux, l'expression statistique du signal reçu ne peut plus être approximée par la distribution de Rice.

Une distribution alternative pour modéliser ce cas de **Figure I.8** est proposée par M.Nakagami, [14] [18] [19].

Cette distribution est désignée par le terme « distribution de Nakagami-m » dont la densité de probabilité est donnée par :

$$P(r) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m r^{2m-1} \exp\left(-\frac{m}{\Omega} r^2\right), r \geq 0, m \geq 0.5 \quad (\text{I.10})$$

$\Gamma(\cdot)$ est la fonction gamma, $\Omega = E\{r^2\}$ est la valeur quadratique moyenne et $m = \frac{E^2\{r^2\}}{\text{Var}\{r^2\}}$ est le paramètre d'évanouissement.

La distribution de Nakagami-m couvre plusieurs types d'évanouissements (figure) Si $m=1$, cette distribution devient de type Rayleigh à condition que ($2\Omega = 2\sigma^2$)

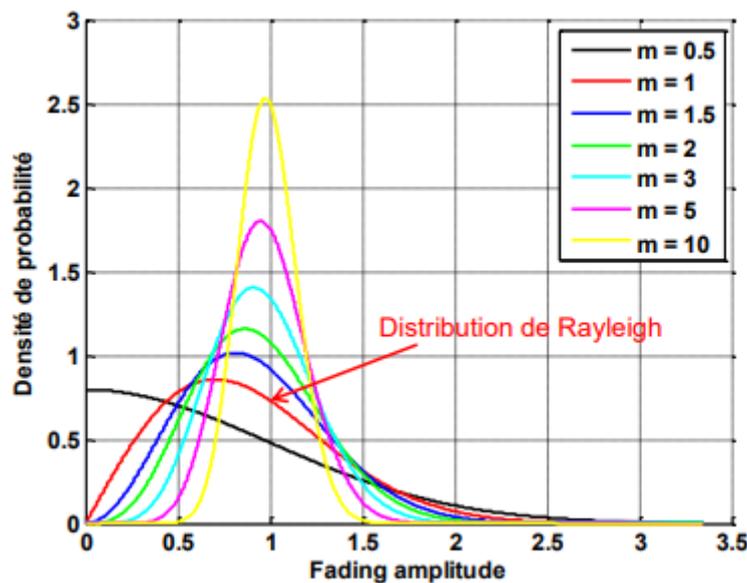


Figure I.8 : distribution de Rayleigh

L'environnement de propagation est affecté par divers phénomènes électromagnétiques provoqués par divers obstacles rencontrés lors de la propagation de l'onde émise. Pour cette raison, de multiples trajets générés par ces phénomènes atteignent l'antenne de réception à

différents angles d'arrivée. Cela affectera les performances du récepteur. Par conséquent, il est nécessaire d'étudier la distribution particulière de ces chemins afin d'évaluer efficacement ces propriétés. [20]

I.6.3. Canal à bruit blanc additif gaussien (AWGN) :

Le modèle de canal le plus couramment utilisé pour la simulation de la transmission numérique est également l'un des plus faciles à générer et à analyser : il s'agit du canal à bruit blanc additif gaussien AWGN (Additive White Gaussian Noise). Ce bruit modélise le bruit interne (bruit thermique dû à des défauts d'équipement, etc.) et le bruit externe (bruit d'antenne, etc.).

Cependant, ce modèle est davantage associé à la transmission filaire, car il représente une transmission presque parfaite de l'émetteur au récepteur.

Le signal reçu s'écrit alors sous la forme :

$$Y(t) = X(t) + b(t) \quad (\text{I.11})$$

Où $b(t)$ représente le bruit AWGN, caractérisé par un processus aléatoire gaussien de moyenne nulle, de variance $\sigma_b^2 = N_0/2$, et de densité spectrale de puissance de bruit N_0 .

La densité de probabilité [21] :

$$P_{y/x} \left(\frac{y}{x} \right) = \sqrt{\frac{1}{2\pi\sigma_b^2}} e^{-\frac{(y-x)^2}{2\sigma_b^2}} \quad (\text{I.12})$$

I.7. Les effets des conditions de propagation [22]

Nous avons vu précédemment quelques phénomènes physiques qui agissent sur les ondes radio. Il y a d'autres effets qui causent des atténuations des ondes radio, qui sont liés à l'état ou à la position des entités communicantes.

I.7.1. L'effet Doppler :

Cet effet agit principalement quand la distance entre les deux entités communicantes varie. Il s'applique par conséquent à toute onde transmise ou reçue par une entité communicante en mouvement. Cette dispersion de fréquence est principalement fonction de la vitesse relative de déplacement. Des travaux ont montré que l'effet Doppler pouvait être observé entre des entités communicantes fixes en raison de mouvements dans l'environnement, de personnes ou d'objets.

I.7.2. L'effet « trajets multiples » et ses conséquences

La dispersion des chemins suivis par chacune des composantes d'un signal génère une variation des durées de propagation et produit deux effets différents et dépendants de l'amplitude de ces variations. Ces effets sont :

- La distorsion d'amplitude,
- La dispersion du délai de propagation.

I.8. Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons donné un aperçu général sur la communication sans fil. Ensuite nous avons vu les différents modèles de canaux de communication sans fil et nous avons présenté le canal radio-mobile à trajets multiples et ses caractéristiques ainsi que les phénomènes de propagation dans un canal à trajets multiples.

Le deuxième chapitre sera consacré aux notions de base de L'OFDM.

L'OFDM puisqu'elle présente plusieurs avantages importants, comme l'efficacité spectrale élevée, la suppression de l'interférence entre symboles (IES) et la robustesse aux environnements sélectifs en fréquence. Ce qui la rend très approprié au canal radio-mobile à trajets multiples.

Chapitre 2 : Etude des transmissions OFDM

II.1. Introduction :

Actuellement la communication numérique fait des grands avancements spectaculaires dans le domaine de communication qui propose des hauts débits et des performances très élevés.

Afin d'avoir des performances élevés une technique OFDM est utilisée, cette technique est basée sur la modulation multi-porteuse, où le bloc d'informations est composé de la Transformée de Fourier. L'OFDM connu un grand succès et une fiabilité ces dernières années dans les différents normes (Wi-MAX, LTE, IEEE802.11a,5G) elle présente un avantage de transformer le canal à trajets multiples large bande en un ensemble de sous-canaux à voie unique et efficace. [23]

L'OFDM est introduit dans les années 50 et 60, mais elle n'a pas fait grand-chose à cette époque.

La technologie OFDM a été utilisée dans les systèmes de Télécommunications et en particulier les systèmes militaires HF à la fin des années 60 [24] [25], D'abord le premier schéma OFDM a été proposé par Chang 1966 et Saitzberg 1967 [26], L'idée est d'utiliser Flux de données parallèle et FDM (multiplexage par répartition en fréquence) permis au spectres de sous-porteuses respectives de se chevaucher pour éviter l'utilisation de l'égalisation et la correction des déformations causées par les trajets multiples aussi bien que pour utiliser entièrement la largeur de bande disponible, MCM le terme de la modulation multicanaux connu dans la télécommunications peut être changé par L'OFDM grâce à la notion de l'orthogonalité entre les sous porteuses, car cette dernière est toujours maintenue en OFDM par contre en MCM donc l'OFDM est une version optimale des arrangements multicanaux. [27]

Weinstein et Ebert en 1971 simplifient la modulation et démodulation OFDM par des techniques de transformée de fourrier discrète a l'émission et la réception, La FFT (transformer de fourrier rapide) peut réduire facilement la complexité des calculs en utilisant des algorithmes de fourrier rapides. [28]

Peled et Ruiz en 1980 ont proposé l'ajout d'un CP (Cyclic Prefix) à la fin du signal OFDM pour le but de résoudre le problème des interférences entre les symboles (IES, ou ISI en anglais : Inter-symbol Interference) causés par plusieurs versions retardées des signaux émis. [28]

Dans les années 90, l'OFDM été utilisée pour les canaux mobiles sans fil à large bande, la radiodiffusion terrestre (HDTV) et la radiodiffusion numérique d'acoustique (DAB)

II.2. Technique OFDM :

Le principe de base de l'OFDM est de moduler les signaux numériques par répartition en fréquences orthogonales est donc de diviser le signal numérique que l'on souhaite transmettre sur un grand nombre de porteuses qui sont orthogonales entre elles et déphasées de 90° , chacune de ces porteuses est modulée indépendamment par une modulation numérique car dans le canal de transmission certaines fréquences peuvent être détruites à cause des trajets multiples et les imperfections, cette méthode de moduler chaque porteuse indépendamment permettre au système de récupérer l'information perdue sur les autres fréquences qui ne seront pas détruites.

La notion de l'orthogonalité résoudre le problème de chevauchement entre les signaux de différentes porteuses.

Ce principe permet de limiter les interférences entre symboles [29].

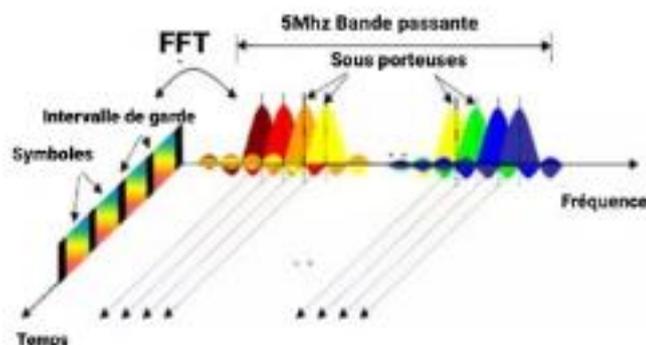


Figure II.1 : Représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM

II.3. Orthogonalité

La technique OFDM autorise un fort recouvrement spectral entre les sous-porteuses ce qui permet d'augmenter sensiblement leur nombre ou d'amoinrir l'encombrement spectrale [30].

II.3.1. Rappel mathématique [31] :

On définit l'orthogonalité de deux fonctions $f(t)$ et $g(t)$ dans l'intervalle $[a,b]$ par la relation suivante :

$$\int_a^b f(t).g(t)dt = 0 \quad (\text{II.1})$$

Cela signifie que ces deux fonctions sont disjointes sur le segment $[a,b]$. Pour réaliser une base orthogonale à M dimensions, il suffit de trouver M fonctions orthogonales deux à deux. Comme le montre la figure II.3, un ensemble de M fenêtres rectangulaires régulièrement espacées d'un intervalle δ sur l'axe des temps constitue une base orthogonale.

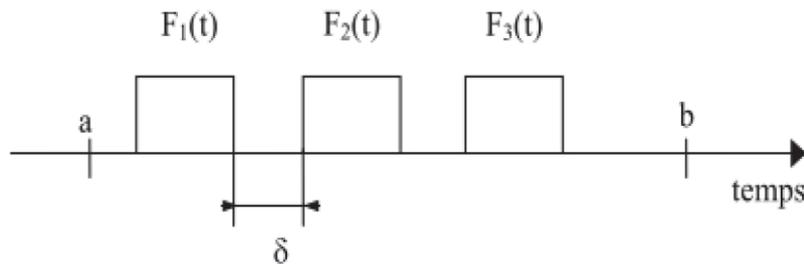


Figure II.2: Exemple d'une base orthogonale.

L'orthogonalité est la propriété de base qui permet à plusieurs signaux d'information d'être transmis dans un seul canal et détectés sans interférence.

II.3.2. Application au procédé OFDM : L'orthogonalité temporelle :

Considérons d'abord le signal continu, il n'a donc pas encore été échantillonné. Dans ce cas, le signal OFDM est constitué de la somme des M sinusoides de chaque fréquence F_k , transmises durant une durée T_0 , k variant de 1 à N , et définie par $F_k = \frac{k}{T_0}$, Cette condition permet d'avoir un nombre entier d'ondes sinusoidales sur chaque sous-porteuse pendant T_0 , Chaque sous-porteuses $S_k(t)$ réelle et non modulée peut se mettre sous la forme :

$$s_k(t) = \begin{cases} \sin\left(\frac{2\pi k}{T_0} t\right) & t < 0 < T_0 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad \text{pour } k \in [1, M] \quad (\text{II.2})$$

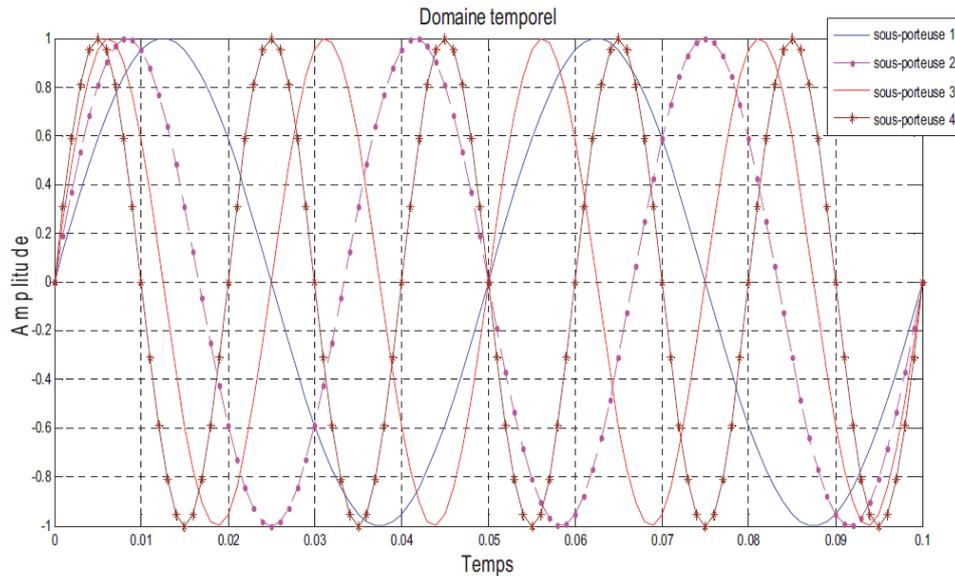


Figure II.3 : Exemple d'une base orthogonale dans le domaine temporel.

II.3.3. Application au procédé OFDM : l'orthogonalité fréquentielle :

On peut aussi percevoir la notion d'orthogonalité du signal OFDM dans le domaine fréquentiel. En effet, si chaque sous-porteuse $S_k(t)$ est transmise pendant la durée T_u , cela revient à appliquer à la sous-porteuse une porte de durée T_u , dont l'enveloppe spectrale est un sinus cardinal qui s'annule aux premières fréquences : $f_k - \frac{1}{T_u}$ et $f_k + \frac{1}{T_u}$, dont ces deux fréquences sont aussi respectivement égales à f_{k-1} et f_{k+1} . On obtient ainsi l'enveloppe spectrale représentée par **Figure II.4**. Le spectre (a) étant celui d'une sous porteuse k , de bande $\Delta f = \frac{1}{T_u}$ et le spectre (b) celui du signal OFDM a $N = 4$ sous-porteuses et qui s'étale sur :

$$B = N \cdot \Delta f = \frac{N}{T_u} \quad (\text{II.3})$$

L'orthogonalité dans le domaine fréquentiel est réalisée puisque le maximum de chaque sous-porteuse correspond à un zéro des autres. Cette condition permet ainsi d'avoir une occupation spectrale idéale et d'éviter les interférences entre sous-porteuses

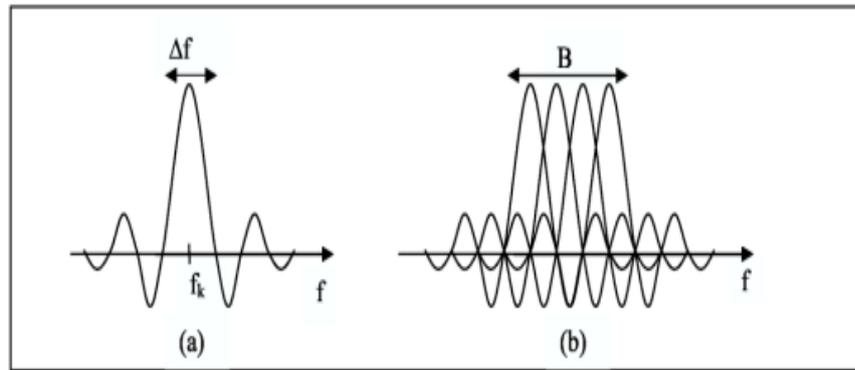


Figure II.4 : (a) spectre d'une sous porteuse (b) spectre d'un signal OFDM

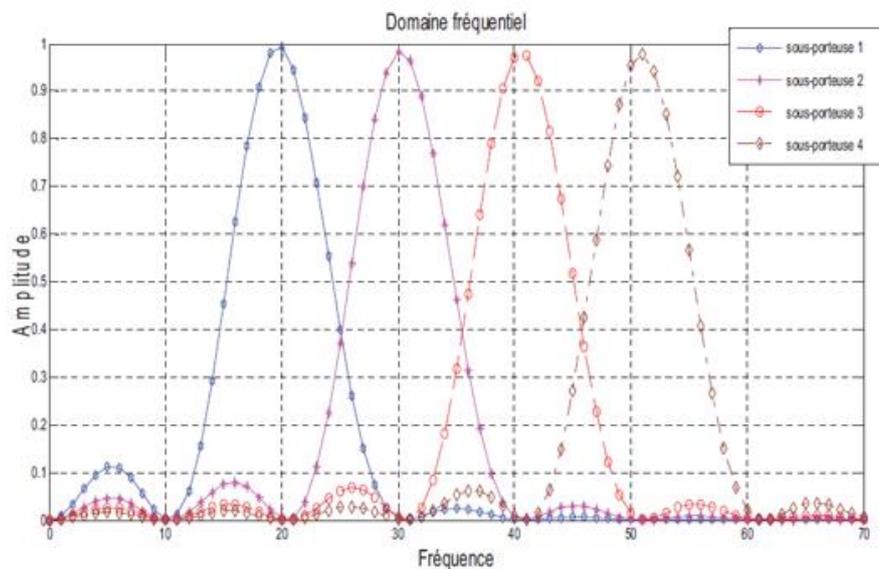


Figure II.5 : exemple d'une base orthogonale dans le domaine fréquentiel

II.4. Le problème d'interférence :

En raison de divers phénomènes physiques, les signaux envoyés par le terminal et la station de base trouvent des trajets multiples, entraînant des retards correspondants vers leurs destinations et provoquant des interférences entre des symboles consécutifs. Ces nombreux phénomènes physiques (réflexion, diffraction, distorsion, perte de puissance, évanouissement, etc.) produiront des erreurs entre le signal de réception et le signal d'origine. Afin de corriger les erreurs, des équipements technologiques et physique sont utilisés pour reconstruire les informations transmises [32].

II.4.1. Interférences entre symboles IES

L'interférence entre les symboles (en anglais, intersymbol interference ou ISI) est un problème destructif causé par le comportement multi-trajets du canal. Les signaux reçus du chemin direct et multi-trajets introduisant un déphasage et des retards. Pour résoudre ce

problème, il faut ajouter un intervalle de garde à l'entête de chaque symbole OFDM (entre deux trames OFDM), la durée de ce dernier doit être supérieure au maximum de retard marqué par les signaux venus des trajets indirects [33].

II.4.2. Interférence entre sous porteuse

Pour les systèmes de communication à multiplexage par répartition en fréquence orthogonale (OFDM), les décalages de fréquence dans les canaux radio mobiles déforment l'orthogonalité entre les sous-porteuses, ce qui entraîne une interférence entre porteuse (En anglais ICI Intercarrier interference). [34]

II.4.3. Intervalle de garde [35]

Dans le cas d'une propagation à travers un canal à trajets multiples, de nombreuses répliques de l'onde émise seront reçues avec des amplitudes et des retards différents. Cela provoque des interférences entre les symboles ISI reçus. La technologie de modulation traditionnelle transmise sur un tel canal est très sensible à ce type d'interférence, et comme la durée du symbole est faible par rapport à l'étalement des retards du canal **Figure II.6 (a)**, ce type d'interférence est plus important. En d'autres termes, si la durée du symbole utile transmis est supérieure à l'étalement maximal du retard de canal, la fiabilité de la transmission est favorable (**Figure II.6 (b)**). Par conséquent, il est nécessaire de trouver un compromis entre le débit lié à la durée des symboles et la fiabilité de la liaison liée aux interférences ISI. La modulation multiporteuse offre une solution intéressante pour optimiser ce compromis.

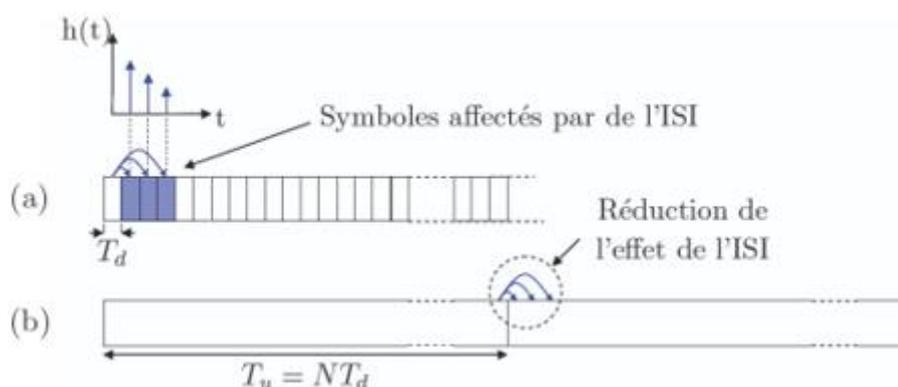


Figure II.6 : effets du canal à trajets multiples sur des symboles reçus dans le cas

(a) Monoprotteuse (b) Multiprotteuse

Avec :

T_u : la durée de la partie utile de chaque symbole OFDM qui n'est pas affectée par l'ISI

$1/T_d$: le débit de la modulation monoprotteuse initiale

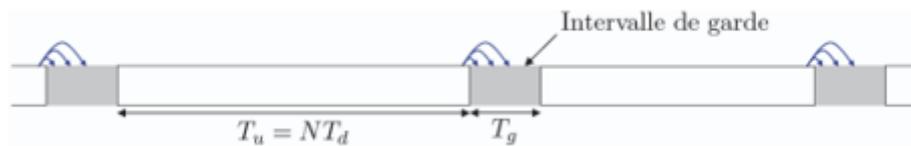


Figure II.7 : illustration de l'effet de l'intervalle de garde précédant chaque symbole OFDM

Avec :

T_g : la durée de l'intervalle de garde

$T_s = T_u + T_g$: la durée de chaque symbole OFDM

II.4.3.1 Préfixe cyclique [36]

Le grand avantage de l'OFDM est sa robustesse vis-à-vis des canaux sélectifs en fréquence. En divisant le flux de données en N sous porteuses, la durée symbole est N fois plus grande, réduisant ainsi le rapport (délai canal / durée symbole) par le même facteur. L'impact de l'interférence entre symboles (ISI) est donc considérablement réduit.

Pour éliminer complètement l'interférence ISI, on introduit un intervalle de garde entre deux symboles OFDM. Donc on, définit le préfixe cyclique comme étant une copie des derniers échantillons provenant de l'IFFT (échantillons temporels du symbole OFDM). Cependant, si le préfixe cyclique est très long, le taux de transmission des données diminuera de manière significative puisque ce préfixe n'emporte pas de données utiles. Ainsi, il est important de choisir le préfixe de durée la plus minimale possible pour assurer une grande efficacité du système.

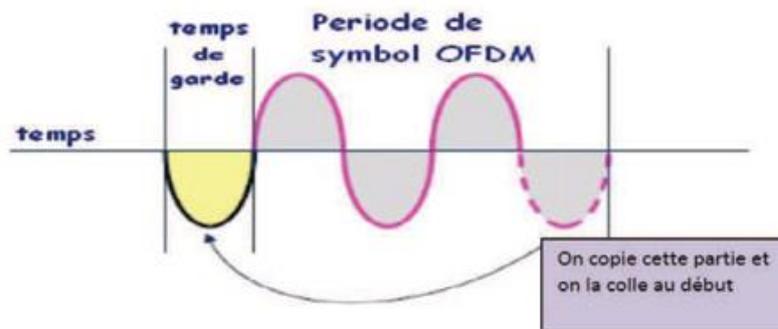


Figure II.8 : Le temps de garde

II.4.3.2. Zero Padding (ZP)

C'est une technique ou l'intervalle de garde ne contient que des zéros [37]

II.5. Modulation et Démodulation OFDM [38]

II.5.1. Modulation OFDM :

Le principe de la modulation OFDM est de grouper les données numériques à transmettre sur un nombre N de paquets, pour cela on groupe les différents symboles c_k par paquets de N.

c_k C'est des nombres complexes définis à partir de la modulation (QAM de 2^q états) par des éléments binaires

On appelle T_s la durée de chaque symbole.

Pour une séquence de N données :

$$c_0 \ c_1 \ c_2 \ c_3 \ \dots \ c_{N-2} \ c_{N-1} \tag{II.4}$$

Chaque donnée c_k de cette séquence module un signal de fréquence f_k

La forme complexe du signal modulé du train s'écrit :

$$s(t) = c_k e^{2j\pi f_k t} \tag{II.5}$$

La somme de l'ensemble de signaux individuels correspondant à toutes les données d'un symbole OFDM ce qui donne un signal total s'écrit sous la forme :

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi f_k t} \tag{II.6}$$

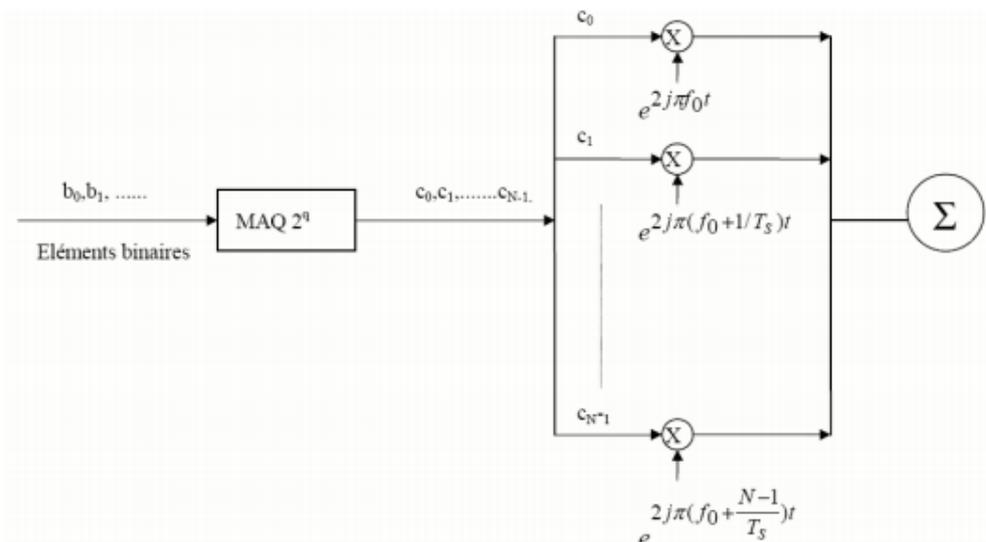


Figure II.9 : schéma principe d'un modulateur

Pour effectuer l'orthogonalité on choisit l'espace entre deux fréquence voisines f_k et f_{k+1} égale a $\frac{1}{T_s}$. Le but est d'avoir un spectre du sinus cardinal dans le domaine fréquentiel qui s'annule à tous les multiples de $\frac{1}{T_s}$ pour cela chaque symbole est modulé par une porteuse

pendant une fenêtre rectangulaire temporelle de durée T_s .

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s} \tag{II.7}$$

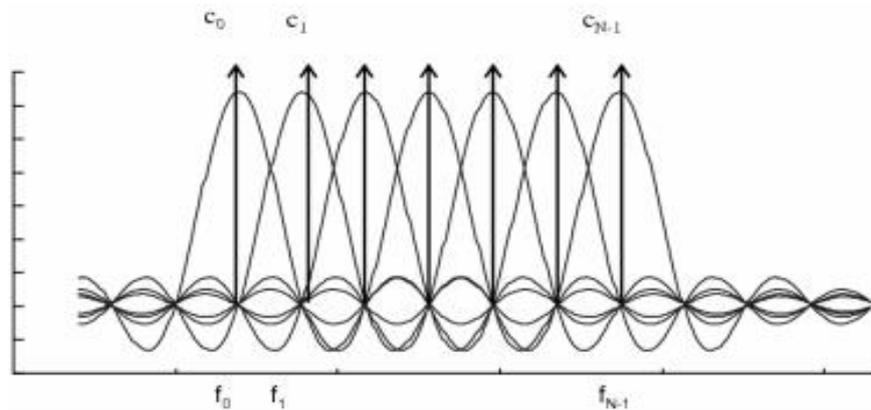


Figure II.10 : spectre de sortie de modulateur OFDM

Aucune interférence est trouvée entre les sous porteuses lorsque l'échantillonnage est effectué, on obtient un recouvrement spectrale parfait et occupation optimale du spectre. Le nombre de sous porteuse choisi par les conditions essentielles suivantes :

$$T_s \gg T_m \quad \text{et} \quad T_s \ll \frac{1}{B_d}$$

II.5.2. Démodulation OFDM :

Le signal parvenu au récepteur s'écrit sur une durée symbole T_s :

$$Y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi (f_0 + \frac{k}{T_s}) t} H_k(t) \tag{II.8}$$

$H_k(t)$ est la fonction de transfert du canal autour de la fréquence f_k et à l'instant t. Cette fonction varie lentement et on peut la supposer constante sur la période T_s ($T_s \ll \frac{1}{B_d}$)

La démodulation classique consisterait à démoduler le signal suivant les N sous-porteuses suivant le schéma classique :

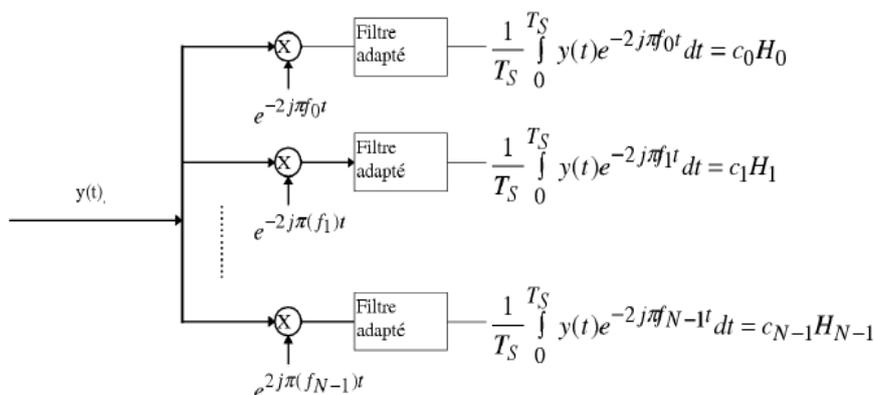


Figure II.11 : Schéma de principe du démodulateur OFDM

II.6. Implantation numérique : [38]

Dans une transmission des données la nature physique et les imperfections des composants produisent des perturbations a des signaux émis, la numérisation des informations peut réduire les erreurs de transmission. Afin de protéger le signal transmis des perturbations du canal de transmission l'implémentation numérique offre permis d'ajouter des correcteurs d'erreurs.

Le schéma principe d'un modulateur est comme suit :

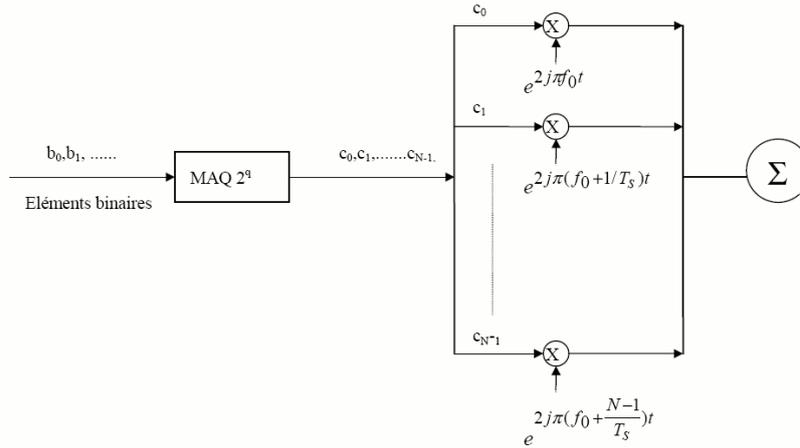


Figure II.12 : schéma principe d'un modulateur

Une simple traduction numérique de ce schéma consisterait à implémenter N modulateurs en parallèle, centrés sur les fréquences de chaque porteuse.

Du point de vue de sa complexité, cette structure n'est certainement pas optimale, on peut générer une architecture numérique simple à mettre en œuvre à l'aide de l'étude théorique de l'OFDM.

II.6.1. Implantation numérique du modulateur :

Le signal de sortie $s(t)$ après l'analyse algébrique est sous la forme :

$$s(t) = e^{2j\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi \frac{k}{T_s} t} \tag{II.9}$$

En discrétisant ce signal pour l'étude numérique le signal de sortie devient sous la forme :

$$S_n = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi \frac{k}{N} n} \tag{II.10}$$

Le $s(n)$ est obtenu par transformée de Fourier inverse discrète de $c(k)$, En choisissant le nombre de porteuses N : $N = 2^n$ le calcul de la transformée de Fourier inverse se simplifie et peut se calculer par une simple IFFT nous conduisant au schéma numérique ci-dessus :

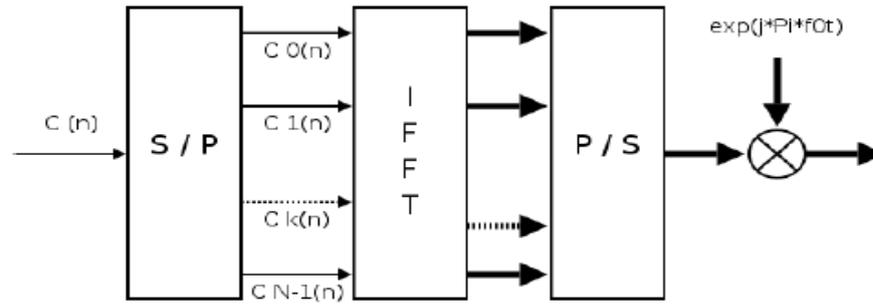


Figure II.13 : Modulateur OFDM numérique

II.6.2. Implantation numérique du démodulateur :

L'analyse théorique définit le signal discrétisé reçu au niveau du démodulateur
Sous la forme :

$$z(t_n) = z\left(\frac{nT_s}{N}\right) = z_n = \sum_{K=0}^{N-1} c_k H_k 2j\pi \left(\frac{Kn}{N}\right) \quad (\text{II.11})$$

z_n est la transformée de Fourier discrète inverse de $c_k H_k$, la démodulation consiste donc à effectuer une transformée de Fourier directe discrète. Le nombre de porteuses ayant été choisi tel que $N=2^n$ on peut réaliser ce calcul à l'aide d'une FFT. On obtient alors le schéma de principe suivant :

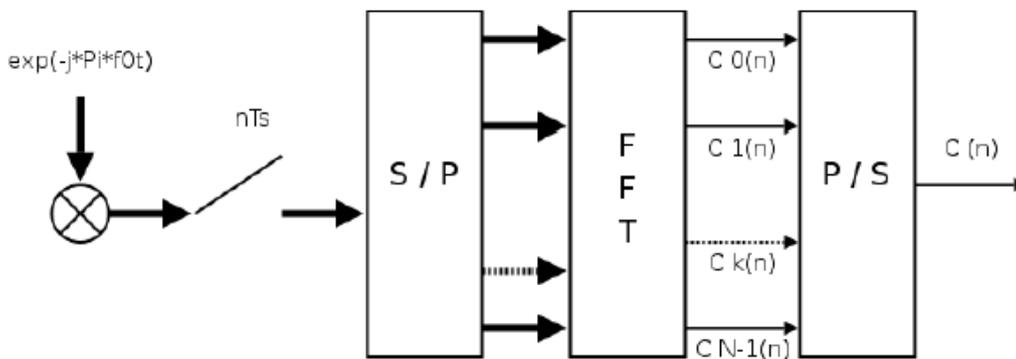


Figure II.14: Démodulateur OFDM numérique

II.7. Conversion série parallèle :

Les données à transmettre prennent généralement la forme d'un flux de données périodique. Dans le système OFDM, la modulation multi-porteuses comprenant une conversion série/parallèle est donc de convertir un flux binaire périodique en données parallèles [39]

Les données attribuées à chaque symbole dépendent de l'arrangement entre le nombre de sous-porteuses et la modulation utilisée.

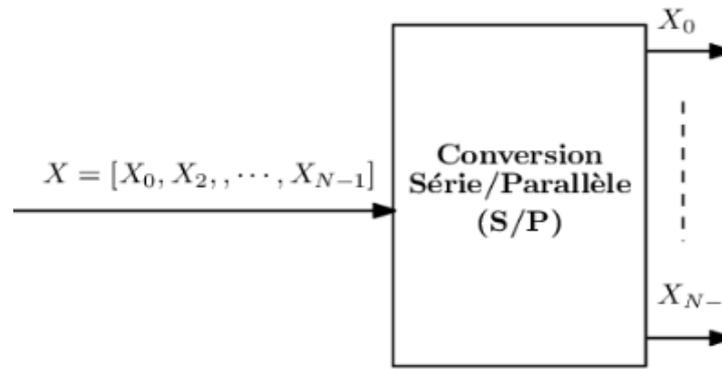


Figure II.15 : Conversion série-parallèle

II.8. Le passage du domaine fréquentiel au domaine temporel

Après l'étape de modulation, on obtient des échantillons fréquentiels du signal OFDM qui sont formés d'une composante réelle (I : in phase component) et d'une composante imaginaire (Q : quadrature component).

L'IFFT est utilisée pour transformer les signaux du domaine fréquentiel au domaine temporel. En 1973, on a découvert que la FFT pourrait être utilisée dans les systèmes multi porteuses tel que l'OFDM. En 1989, on a vu l'introduction du préfixe cyclique dans l'OFDM. Les sous porteuses non utilisées sont représentées par le préfixe cyclique. [40]

II.9. Critère de comparaison des performances : [41] [42]

II.9.1. La probabilité d'erreur (Pe) :

C'est le paramètre original décrivant la qualité de transmission elle exprime la probabilité de prendre une fausse décision sur un élément binaire.

La probabilité d'erreur exprimée en fonction de rapport $\frac{E_b}{N_0}$ et donnée par :

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \quad (\text{II.12})$$

E_b : l'énergie du signal reçu

N_0 : est la densité spectrale du bruit

$\operatorname{erfc}(x)$ est une fonction d'erreur s'écrit sous la forme :

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-u^2) du \quad (\text{II.13})$$

Note : la probabilité d'erreur (Pe) est une valeur théorique on peut obtenir une estimation a cette dernière par la mesure de BER (Bite Error Rate).

II.9.2. BER ou TEB (Taux d'erreur binaire) :

Est un indice de comparaison des performances des systèmes de communication numérique il représente le rapport entre le nombre de bits reçus erronés et le nombre de bits transmis, il s'exprime en fonction de SNR sous la forme suivante :

$$\text{TEB} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\text{SNR}}) \quad (\text{II.14})$$

II.9.3. Rapport signal sur bruit (SNR) :

En anglais (Signal to Noise Ratio) est aussi utilisé pour les mesures des performances dans les systèmes des télécommunications le SNR est exprimé comme suit :

$$\text{SNR} = \frac{P_s}{P_N} \quad (\text{II.15})$$

Où P_s est la puissance de signal

P_N est la puissance de bruit en watts

En décibel le SNR s'écrit :

$$\text{SNR}_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_s}{P_N} \quad (\text{II.16})$$

II.10. Domaine d'application OFDM :

Le câble, le satellite mais aussi l'ADSL fonctionne sur le principe de l'OFDM pour la diffusion (broadcast) de sons, de données ou de vidéos. Mais de plus en plus, l'OFDM se destine aux systèmes de communications sans fil. Ainsi, les réseaux 802.11a et 802.11g offrent des débits théoriques jusqu'à 54 Mbits/s, là où le protocole 802.11b, non OFDM, se limite à 11 Mbits/s. Des tests sont en cours pour mettre en place cette norme de communication sur les équipements Wi-max et Ultra Wide Band. Siemens et Motorola ont également fait la démonstration de réseaux de téléphonie mobile de quatrième génération compatibles OFDM fonctionnant à plus de 300 Mbits/s.

II.11. Avantages et inconvénients de l'OFDM :**II.11.1. Avantages :**

Contrairement aux schémas de transmission à porteuse unique, un avantage majeur des schémas de transmission OFDM est qu'ils partagent la complexité de l'égalisation entre l'émetteur et le récepteur. Cela permet d'avoir un récepteur simple et peu coûteux.

Différentes variantes d'OFDM présentent de nombreux avantages :

-Par rapport aux solutions traditionnelles de réutilisation des fréquences, une utilisation efficace des ressources de fréquence. En effet, en OFDM, les canaux se chevauchent tout en conservant une orthogonalité parfaite.

• Grâce à l'utilisation des intervalles de garde (au coût du débit) et de l'algorithme de Viterbi, une égalisation numérique et un décodage simple et optimal. De plus, l'utilisation de

différents systèmes de codage tels que les codes convolutifs et les codes par blocs (Reed-Salomon) s'est avérée très efficace.

- La technologie multiporteuse est robuste au bruit impulsif, car chaque porteuse sera affectée par le bruit indépendamment des autres porteuses. Contrairement à la modulation à monoporteuse où le bruit affecte plusieurs symboles transmis, la perte de symboles due à un bruit élevé n'affecte pas les autres symboles.

- La technologie OFDM offre également une grande flexibilité dans l'allocation bit/débit dans un environnement multi-utilisateur. En effet, selon la valeur de gain instantané du canal, chaque porteuse peut être codée indépendamment des autres porteuses. De cette manière, la méthode de "water pouring " peut être mise en œuvre lorsque le canal est connu au moment de la transmission

Enfin, il est à noter que l'estimation du canal dans le contexte OFDM est facilité par l'envoi de séquences d'apprentissage dans le domaine fréquentiel. L'identification des coefficients du canal se fait sans inversion de systèmes d'équations.

II.11.2. Inconvénient de l'OFDM :

Les principaux inconvénients de l'OFDM sont :

- Après avoir effectué la transformée de Fourier discrète inverse sur un bloc de symboles fréquentiels, l'OFDM peut générer des symboles temporels de forte amplitude par rapport à la technologie monoporteuse (constellation à transmission directe). Cela impose une énorme limite à l'amplificateur et conduit à une consommation d'énergie élevée.

- L'OFDM est également sensible aux problèmes de décalage de fréquence et de synchronisation. Dans le premier cas, le décalage de fréquence provoquera des interférences entre les porteuses, ce qui détruira l'orthogonalité des porteuses. Dans le deuxième cas, des erreurs de synchronisation provoqueront un déphasage des symboles reçus. La technologie de compensation à porteuse unique n'est pas adaptée à la technologie à porteuses multiples, et de nouvelles méthodes sont à l'étude. Dans la nouvelle norme, des débits plus élevés exacerbent ces difficultés.

II.12. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons introduit la transmission par la technique OFDM, nous avons présenté les notions de base et des généralités de cette technique : la notion d'orthogonalité (temporelle et fréquentielle) modulation et démodulation, problèmes d'interférences et domaine d'applications ainsi que les avantages et les inconvénients de la transmission des données par la technique OFDM.

Chapitre 3 : Etudes de la modulation chaotique

III.1 Introduction :

Au cours de son histoire, la physique théorique s'était déjà trouvée confrontée à la description de systèmes complexes macroscopiques, comme un volume de gaz ou de liquide, mais la difficulté à décrire de tels systèmes semblait découler du très grand nombre de degrés de liberté internes du système à l'échelle microscopique (atomes, molécules). La mécanique statistique avait dans ce cas permis de rendre compte de façon satisfaisante des propriétés macroscopiques de ces systèmes à l'équilibre. Ce fut donc une grande surprise lorsqu'on s'aperçut à la fin du XIXe siècle qu'une dynamique d'une grande complexité pouvait résulter d'un système simple possédant un très petit nombre de degrés de liberté, pourvu qu'il possède cette propriété de sensibilité aux conditions initiales.

La théorie du chaos s'attache principalement à la description de ces systèmes à petit nombre de degrés de liberté, souvent très simples à définir, mais dont la dynamique nous apparaît comme très désordonnée. [43]

Le mot chaos provient du terme " $\chi\alpha\omicron\sigma$ ", utilisé par les Grecs pour décrire l'espace vide infini qu'ils supposaient exister avant l'émergence de toutes choses. Les Romains ont pris le terme et ont interprété l'idée sous-jacente pour concevoir quelque chose d'informe, dans lequel - ils croient - l'architecte du monde a introduit l'ordre et l'harmonie. De nos jours dans le langage courant "Chaos" décrit un état de désordre et d'irrégularité [44]

III.2 Chaos :

La théorie du chaos traite des systèmes dynamiques déterministes qui présentent un phénomène fondamental d'instabilité appelé « sensibilité aux conditions initiales », ce qui les rend imprévisibles en pratique sur le « long » terme. Le chaos est défini généralement comme un comportement semblant aléatoire d'un système dynamique défini par des équations déterministes. [45]

III.3 Les systèmes chaotiques et les télécommunications :

Un sujet qui a attiré l'attention de la communauté scientifique ces dernières années, il s'agit de l'application des systèmes chaotiques aux télécommunications. Ceci est principalement dû aux aspects déterministes des systèmes chaotiques, à leur sensibilité critique aux conditions initiales et à la forme du spectre de puissance similaire au bruit blanc. Ceci permet d'utiliser ces systèmes non seulement pour générer un grand nombre de signaux et de séquences chaotiques, mais aussi pour générer toutes applications nécessaires compatibles avec le développement des systèmes de télécommunication. Les applications possibles des systèmes chaotiques dans les télécommunications comprennent [46]

III.3.1 système dynamique :

Un système dynamique traite de la valeur des états dans le système au fur et à mesure qu'ils changent au fil du temps. Il décrit comment un état se transforme en un autre état au cours du temps. Techniquement, un système dynamique est une action douce des réels ou des entiers sur un autre objet. Lorsque les réels agissent, le système est appelé un système dynamique continu, et lorsque les entiers agissent, le système est appelé un système dynamique discret. [47]

III.3.2 La notion de système dynamique :

Le chaos est généralement défini comme le comportement spécifique des systèmes dynamiques déterministes non linéaires. D'un point de vue mathématique, le concept général d'un système dynamique est défini par un ensemble de variables qui constituent un vecteur d'état. Ces variables ont des caractéristiques qui caractérisent complètement l'état instantané du système dynamique. En liant en plus le système de coordonnées, nous obtenons l'espace d'état, également connu sous le nom d'espace de phase. Avec l'espace d'état, le système dynamique est également défini par la loi d'évolution, généralement appelée dynamique, qui caractérise l'évolution de l'état du système au cours du temps. Le concept de déterminisme vient du fait que le système considéré est complètement caractérisé par son état initial et sa dynamique.

III.3.3 Les types des systèmes dynamiques :

Les systèmes dynamiques sont classés en deux catégories :

- Système dynamique à temps discret.
- Système dynamique à temps continu. [48]

III.3.4 Propriétés des systèmes chaotiques :

Certains systèmes physiques se comportent de manière chaotique. Parmi ces systèmes (l'atmosphère, les pendules excités dans un champ magnétique etc...). Ces systèmes se distinguent par leur origine du mouvement. Il existe plusieurs définitions possibles du chaos.

Ces définitions ne sont pas toutes équivalentes, mais elles ont tendance à avoir des points communs, caractérisant ainsi le chaos. Ci-dessous, on va citer quelques fonctionnalités qui nous permettent de comprendre qualitativement les points saillants des systèmes chaotiques. [49]

• **Non-linéarité :**

Un système chaotique est un système dynamique non linéaire. Un système linéaire ne peut pas être chaotique.

• **Déterminisme :**

Le concept de déterminisme implique la capacité de « prédire » l'avenir d'un phénomène à partir d'événements passés ou présents. L'évolution irrégulière du comportement chaotique du système est due au fait que la trajectoire de n'importe quelle particule dans un phénomène aléatoire non linéaire est absolument impossible à prédire. En revanche, les systèmes chaotiques ont des règles de base qui sont déterministes plutôt que probabilistes. [50]

• **Aspect aléatoire :**

Les systèmes chaotiques évoluent de manière apparemment aléatoire. De toute façon, on ne peut pas facilement prévoir comment ils évolueront dans le temps. Il faut noter que le système chaotique obéit toujours aux lois de la physique. Si l'on adopte l'approximation de la physique classique, on peut dire que le système est complètement déterministe. On ne peut donc pas se laisser berner par l'aléatoire a priori, qui ne représente que la complexité du système.

La courbe suivante permet de comparer une évolution simple, périodique et donc prédictible d'un système classique avec l'évolution plus complexe, non périodique et non prédictible d'un système chaotique :

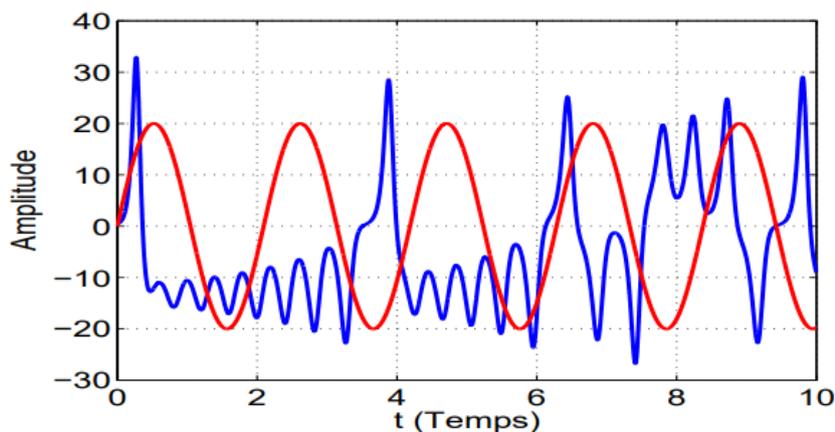


Figure III.1 : Evolution dans le temps d'un système chaotique, comparé à une sinusoïde.

[51]

• **Sensibilité aux conditions initiales :**

Certains phénomènes dynamiques non linéaires sont très sensibles aux conditions initiales, et même s'ils sont régis par des lois déterministes strictes et parfaites, des prédictions précises sont impossibles. Puisque la plupart des phénomènes sont non linéaires, nous comprenons l'importance de la découverte de Lorenz.

Une autre caractéristique des phénomènes chaotiques est qu'ils sont très sensibles aux interférences. L'un des premiers chercheurs à l'avoir remarqué était Edward Lorenz, qui s'intéressait à la météorologie et donc au mouvement turbulent des fluides comme l'atmosphère. Lorenz vient de découvrir que dans les systèmes non linéaires, de petites différences dans les conditions initiales peuvent conduire à des trajectoires complètement différentes au fil du temps. Il a utilisé l'effet papillon pour illustrer ce fait. Aujourd'hui, le papillon bat des ailes à Pékin et une tempête commencera à New York le mois prochain.

Evidemment, la moindre erreur ou imprécision des conditions initiales ne permet à aucun moment de déterminer le chemin réel à suivre, et donc ne peut prédire l'évolution à long terme du système.

Par conséquent, l'une des caractéristiques de base du chaos est la sensibilité aux conditions initiales, qui peut être caractérisée en mesurant le taux de divergence de la trajectoire. Ceci est illustré par la figure suivante :

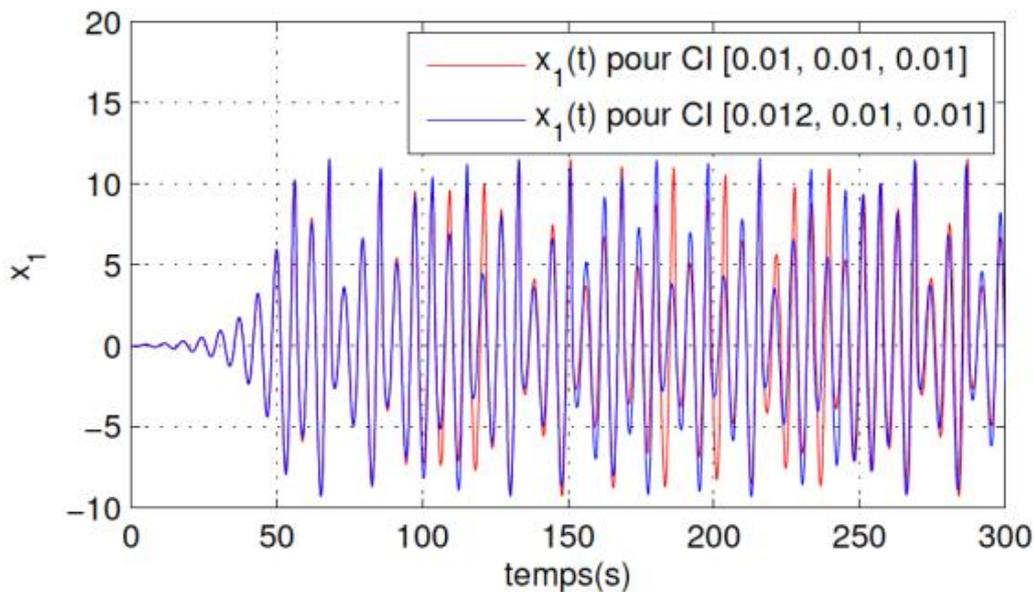


Figure III.2 : Illustration de la propriété de sensibilité aux conditions initiales sur l'état x_1 . [50]

III.4 Notion d'attracteur :

Avant d'expliquer le concept d'attracteurs, nous devons d'abord définir ce qu'est l'espace des phases. La trajectoire dynamique d'un système chaotique se situe souvent dans un espace appelé espace des phases. Des régions de l'espace sans dynamique chaotique permanente seront inutiles, car les points de ces régions tendent vers l'infini et ne contribuent pas à la continuité du processus chaotique. Les variables qui construisent cet espace doivent contenir toute information sur la dynamique du système. [52]

Nous pouvons maintenant définir l'attracteur comme La solution de toutes les conditions initiales situées dans un volume ou un bassin non nul Attractif. [53]

Les trajectoires complexes dans l'espace de phase qui attirent les solutions du système chaotique sont alors des attracteurs. L'ensemble de points attirés vers l'attracteur constitue le bassin d'attraction. Autrement dit, l'attracteur est une géométrie de l'espace de phase (formant une structure feuilletée) indiquant le comportement d'un système chaotique.

L'attracteur peut être étrange avec structure fractale (une courbe ou surface de forme irrégulière ou morcelée qui se crée en suivant des règles déterministes ou stochastiques impliquant une transformation ponctuelle de type homothétie interne) ou point fixe ou encore cycle limite.

Parmi les premiers exemples des attracteurs étranges mentionnés dans l'histoire du chaos, on cite l'attracteur de Lorenz. Ci-dessous, nous donnerons des exemples d'attracteurs étranges pour les différents systèmes chaotiques continus où discrets. [52]

III.5 Exposant de Lyapunov :

Les systèmes dynamiques chaotiques sont très sensibles aux petites variations de leurs conditions initiales, Ces variations peuvent rapidement prendre d'énormes proportions. Le mathématicien russe Alexander Lyapunov s'est penché sur ce phénomène et a développé une quantitative permettant de mesurer la vitesse à laquelle ces petites variations peuvent s'amplifier. Cette quantité appelée "exposant de Lyapunov" mesure en fait le degré de sensibilité d'un système dynamique. [54]

• Exemple

Deux trajectoires dans le plan de phase initialement séparées par un taux Z_1 divergent après un temps $\Delta t = t_2 - t_1$ vers Z_2 tel que :

$$|Z_2| \approx e^{\lambda \Delta t} |Z_1|$$

Où λ est l'exposant de Lyapunov

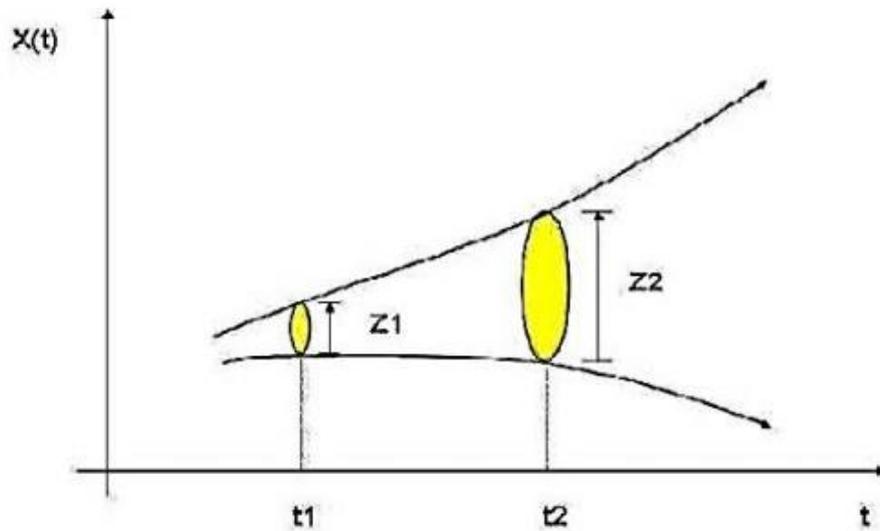


Figure III.3 : Divergence de deux trajectoires dans le plan de phase

III.6 Exemples de systèmes chaotiques :

Des exemples de systèmes chaotiques sont présentés ci-dessous :

III.6.1 systèmes à temps continu :

• système de Lorenz :

En 1963, le météorologue Edward Lorenz (Edward Lorenz) a été le premier à souligner la nature chaotique de la météorologie. Le modèle de Lorenz, également appelé système dynamique de Lorenz ou oscillateur de Lorenz, est une modélisation simplifiée des phénomènes météorologiques basée sur la mécanique des fluides. L'oscillateur de Lorenz est un système tridimensionnel dynamique qui peut provoquer un comportement chaotique dans certaines conditions. Il s'agit d'un système dynamique en temps continu non linéaire en 3 dimensions obtenu à partir de l'équation de transfert de chaleur dans le liquide. Ce système est défini par :

$$\begin{cases} \dot{x} = \sigma(y - x) \\ \dot{y} = -rx - y - xz \\ \dot{z} = -bz + xy \end{cases} \quad \text{(III.1)}$$

Avec (x, y, z) le vecteur d'état et σ , b et r les paramètres du système.

L'attracteur de Lorenz est une structure fractale correspondant au comportement à long terme

Objet oscillateur Lorenz. Les attracteurs montrent comment différentes variables

Les systèmes dynamiques évoluent dans le temps avec des trajectoires aperiodiques

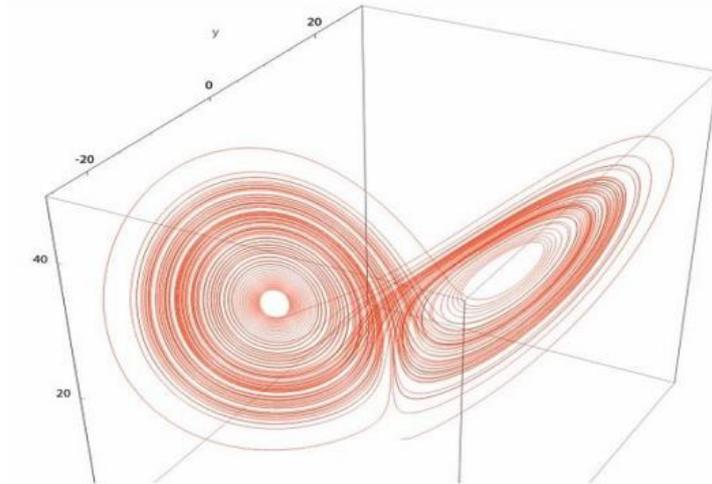


Figure III.4 : Attracteur de Lorenz

Ci-dessous l'attracteur de Lorenz (l'espace des phases) et la coordonnée x obtenus à partir des valeurs numériques $\sigma = 10$, $r = 83$ et $b = 28$.

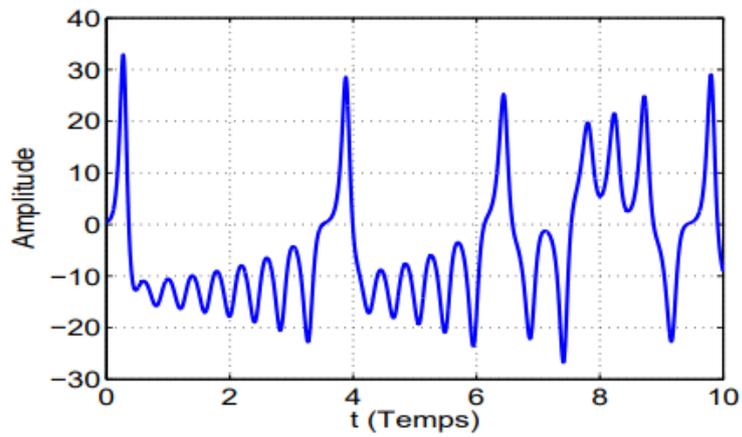


Figure III.5 (a) La première coordonnée, x .

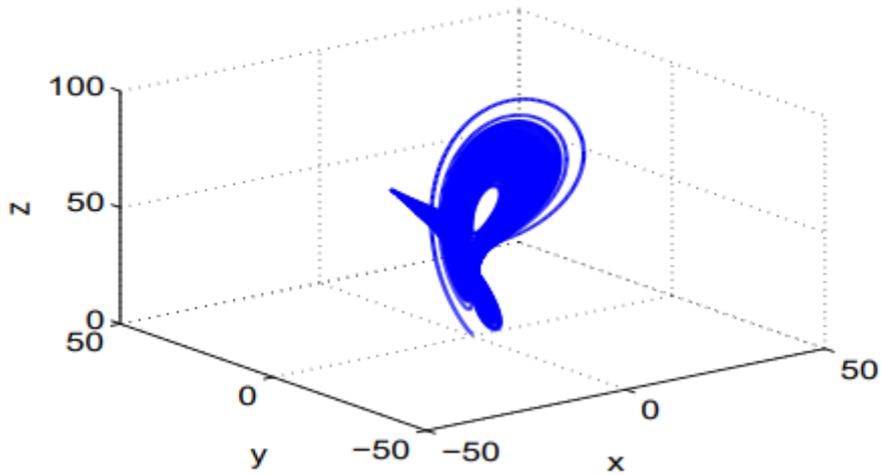


Figure III.6 : (b) Attracteur chaotique de Lorenz [51]

• **Système de Chen :**

Il est donné par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \dot{x} = a(y - x) \\ \dot{y} = (c - a)x - xz + cy \\ \dot{z} = xy - bz \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

La figure suivante montre l'attracteur de Chen en 3 dimensions $x(t)$, $y(t)$ et $z(t)$ avec $a=35$, $b=3$ et $c=28$.

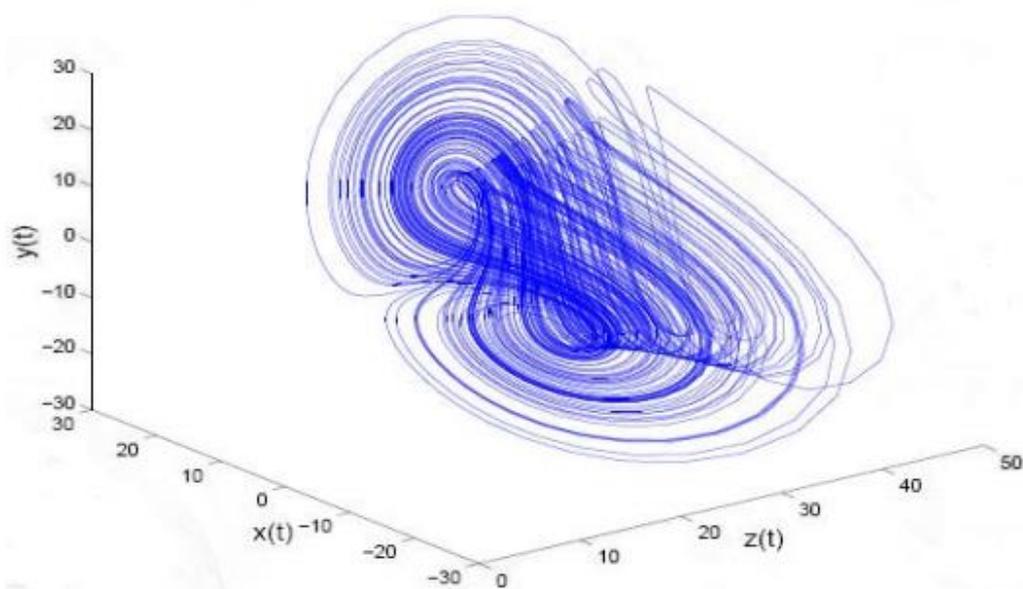


Figure III.7 : Attracteur de Chen. [55]

III.6.2 systèmes à temps discret :**• Suite logistique (Logistic Map) :**

La fonction logistique est le système chaotique discret le plus connu, qui est fonction de Chebyshev, cependant, il existe d'autres systèmes chaotiques discrets, tels que Système de Hénon, fonction Tente et fonction gaussienne discrète. La fonction logistique bien connue dans la théorie des systèmes non linéaires est l'application non bijective du domaine $[0, 1]$ lui-même, comme une boucle de la séquence.

$$x_{k+1} = f(x_k) = rx_k(1 - x_k) \quad (\text{III.3})$$

Où $k = 0, 1, \dots$ dénote le temps discret, x la variable dynamique et r un paramètre réel. La dynamique de cette application correspond à un comportement très différent, ainsi selon la valeur du paramètre r , une plus grande variété de régimes permanents se présente, parmi lesquelles on trouve, par ordre de complexité.

Pour $0 \leq r < 3$, le système possède un point fixe attractif, qui devient instable lorsque $r = 3$

Pour $3 \leq r < 3.57 \dots$, le système évolue périodiquement de période 2^n avec n entier qui tend vers l'infini lorsque r tend vers $3,57 \dots$,

On obtient donc sur la figure (**Figure III.8**) une succession de bifurcations de la régularité vers le chaos lorsque le paramètre augmente.

Pour $r = 4$, le système évolue de manière chaotique.

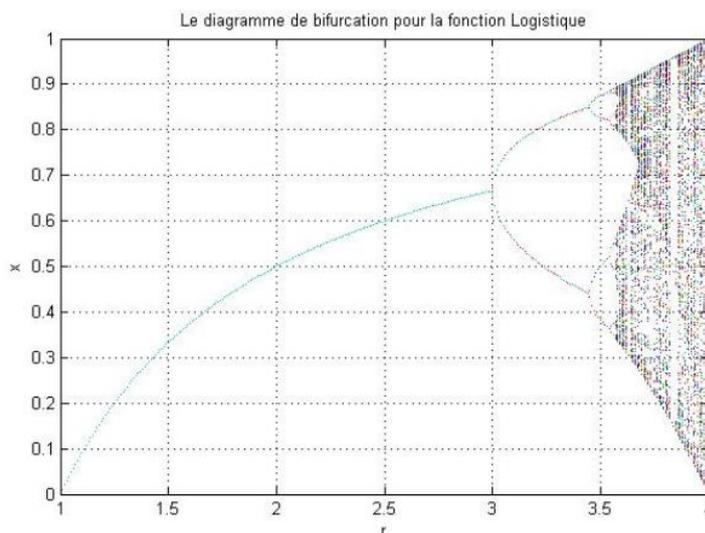


Figure III.8 : Etude du comportement dynamique pour la fonction logistique (eq : III.3) :

Bifurcations et scénarios de transition vers le chaos par doublement de période [56]

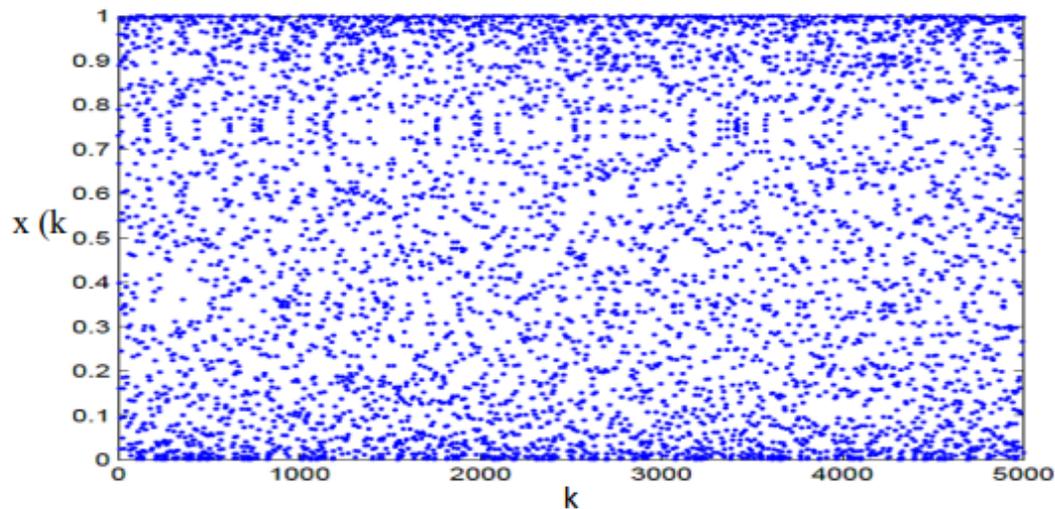


Figure III.9 : Trajectoire de la fonction logistique

Aspect aléatoire

La figure suivante illustre l'aspect aléatoire du système (1.9) pour $r = 4$. Il est alors impossible de discerner à l'œil nu cette trajectoire de celle d'une variable aléatoire.

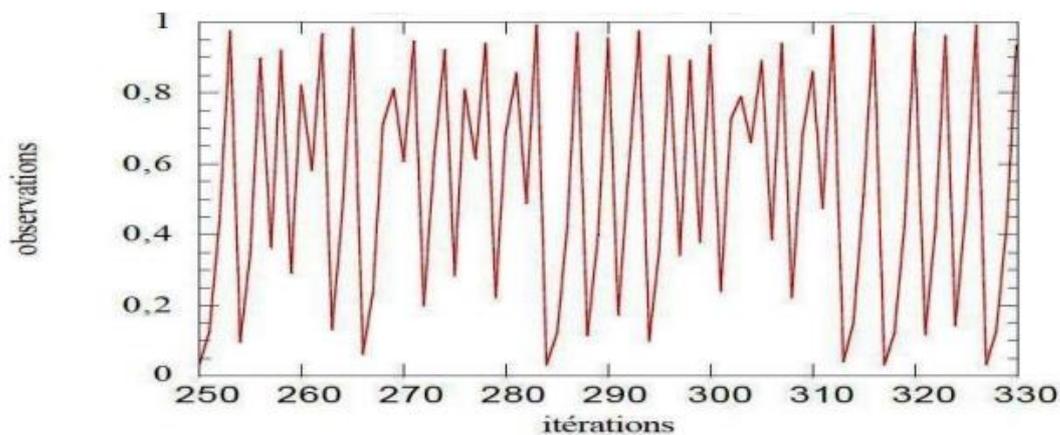


Figure III.10 : Application logistique pour $r = 4$ [50]

Système de Hénon :

Elle constitue un système dynamique à temps discret introduit par l'astronome Michel Hénon en 1976. Il est présenté par l'équation suivante :

$$x_{n+1} = y_n + 1 - a x_n^2 \quad (\text{III.4})$$

$$y_{n+1} = b x_n^2 \quad (\text{III.5})$$

$$(x_n \text{ et } y_n) \in \mathbb{R}^2$$

La figure suivante représente l'attracteur de Hénon avec $a=1.4$ et $b=0.3$.

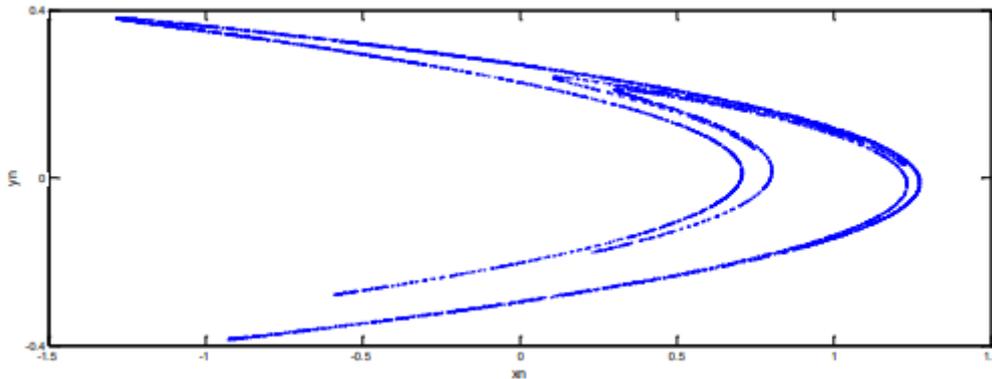


Figure III.11 : Attracteur de Hénon. [56]

III.7 Domaine d'application chaos :

Les domaines d'applications du chaos sont très nombreux, on peut citer principalement les domaines suivants :

• Télécommunications :

L'utilisation du chaos pour sécuriser les télécommunications est un sujet d'études depuis plusieurs années. Le chaos est obtenu à partir de systèmes non linéaires ; il correspond à un comportement stable, aperiodique et éventuellement borné, de ces systèmes, ce qui le fait apparaître comme du « bruit » pseudo aléatoire. Il peut donc être utilisé pour masquer ou mélanger les informations dans une transmission sécurisée. L'originalité repose sur la prise en compte des propriétés de signaux chaotiques issus soit d'équations différentielles soit de récurrences discrètes non linéaires. [57]

• Les algorithmes génétiques :

En remplaçant l'opérateur de mutation gaussien dans un algorithme génétique codé réel par une cartographie chaotique, les scientifiques présentent un algorithme génétique avec mutation chaotique. Pour examiner ce nouvel algorithme, ils ont appliqué cet algorithme à des problèmes d'optimisation de fonction et obtenu de bons résultats. [58]

• Ingénierie :

Contrôle de vibrations, stabilisation des circuits, réactions chimiques, turbines, étages de puissance, lasers, combustion, et beaucoup plus.

• Ordinateurs :

Commutation des paquets dans des réseaux informatiques. Cryptage Contrôle du chaos dans les systèmes robotiques.

- **Communications :**

Compression et stockage d'images conception et management des réseaux d'ordinateurs

- **Médecine et biologie :**

Cardiologie, analyse du rythme du cœur (EEG), prédiction et contrôle d'activité irrégulière du cœur

- **Management et finance**

Prévisions économiques, analyse financière, et prévision du marché Windows [59]

III.8 Modulation chaotique :

III.8.1 Théorie du fonctionnement de la modulation chaotique

La modulation chaotique consiste à assigner les bits d'informations aux états d'un signal qui varie chaotiquement (Voir Figure III.12)

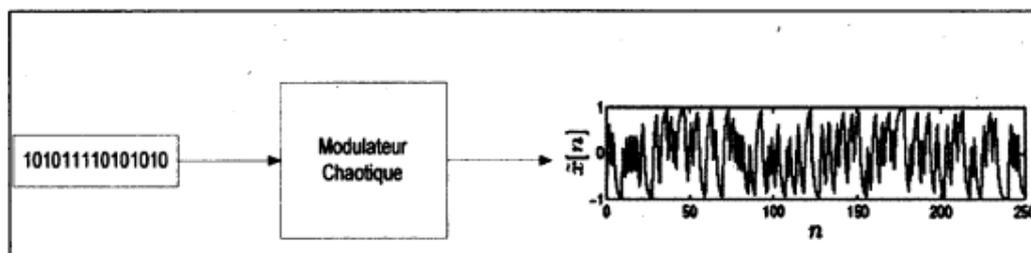


Figure III.12 : schéma synoptique de la modulation chaotique.

La séquence chaotique est générée par un système dynamique non linéaire, et son comportement peut sembler complètement imprévisible voire aléatoire. Ce régime chaotique est dû à un phénomène d'instabilité numérique appelé sensibilité aux conditions initiales. Un système dynamique est un système qui évolue de manière causale et déterministe. [60]

C'est-à-dire que les conditions initiales définies par une séquence unique et unique d'états futurs évoluent avec le temps. L'évolution déterministe de ces systèmes peut s'exprimer par des équations différentielles dans le domaine continu ou des fonctions récursives dans le domaine discret. [61]

III.8.2 Méthodes de modulation chaotique :

III.8.2.1 Masquage chaotique :

La modulation de masquage chaotique (voir **Figure III.13**) est l'une des premières méthodes utilisées dans la communication chaotique [62].

Cette technologie repose sur le principe d'une synchronisation par couplage entre deux générateurs chaotiques. L'émetteur ajoute le signal chaotique $c(t)$ au signal d'information beaucoup plus petit $m(t)$, masquant ainsi le signal d'information.

A la réception, le signal reçu $r(t)$ est utilisé pour synchroniser le générateur de chaos avec le générateur de chaos de l'émetteur. Le message d'information reçu $m(t)$ est décodé par la différence entre le signal reçu $r(t)$ et une copie générée localement du signal chaotique $c(t)$. L'inconvénient de ce système est la forte sensibilité au bruit de l'unité de synchronisation et son faible impact sur l'amplitude du signal d'information [61].

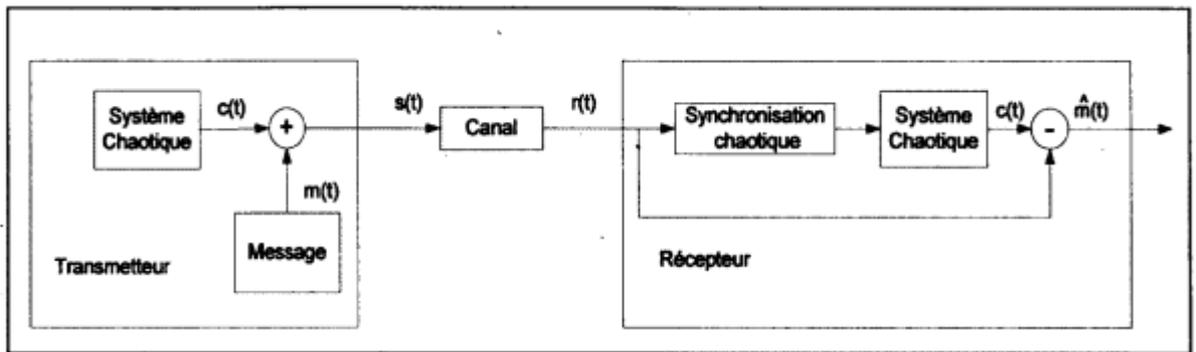


Figure III.13 : Système de communication par masquage chaotique.

III.8.2.2 Chaos Shift Keying, CSK:

Cette méthode (en anglais Chaos Shift Keying, CSK) est utilisée pour transmettre des messages binaires (voir Figure III.14). L'émetteur est constitué de deux systèmes chaotiques : pour chaque niveau de message $m(t)$ (0 ou 1), l'un des systèmes envoie sa sortie à travers la ligne de transmission. Par conséquent, le signal transmis commute entre deux attracteurs étranges. Le récepteur est constitué des mêmes deux systèmes chaotiques que l'émetteur, et le bloc de comparaison peut enregistrer la valeur du message noté $m'(t)$.

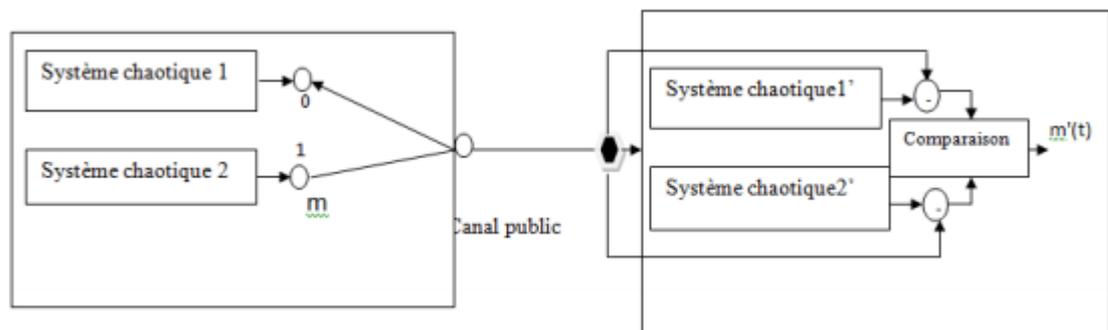


Figure III.14 : Principe du chiffrement chaotique par commutation [63]

III.8.2.3 Modulation paramétrique :

Le principe de cette méthode est d'utiliser des signaux d'information généralement de nature binaire pour moduler l'un des paramètres d'un système chaotique. Le système de réception se synchronise de manière adaptative avec l'émetteur chaotique et récupère le signal d'information grâce à une loi adaptative. Cette méthode est illustrée sur la figure :

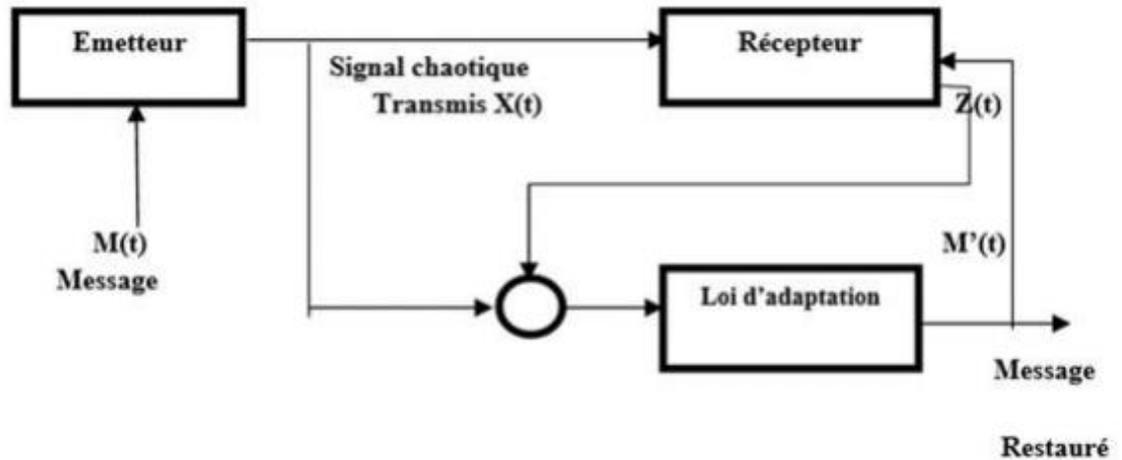


Figure III.15 : Schéma représentatif de la modulation paramétrique

La modulation paramétrique offre une fonction de multiplexage chaotique, de sorte que plusieurs messages peuvent moduler différents paramètres d'un seul système chaotique, de sorte qu'un seul signal de transmission peut être utilisé pour la transmission et la récupération d'information. [64]

III.8.2.4 Modulation par inclusion : [65] [66]

Cette technique consiste à injecter des messages dans la dynamique chaotique de l'émetteur. La synchronisation et la récupération des informations de l'extrémité réceptrice peuvent être établies en utilisant deux techniques, soit en s'appuyant sur des observateurs avec une entrée inconnue, soit en s'appuyant sur l'inversion du système émetteur. La figure illustre la méthode d'inclusion :

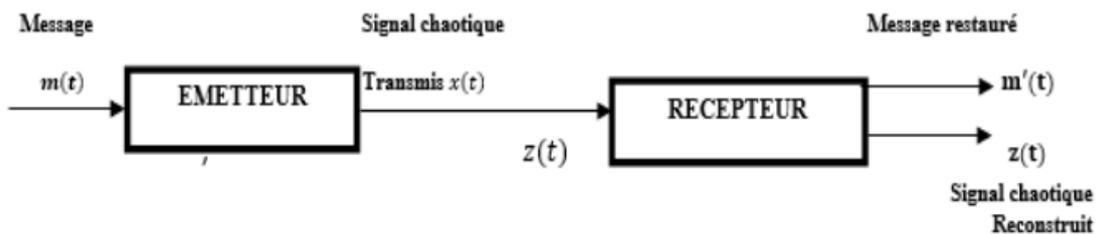


Figure III.16 : Schéma représentatif de la modulation par inclusion.

La modulation par inclusion chaotique présente de nombreux avantages, ce qui a inspiré son utilisation dans la pratique, principalement parce qu'elle présente une sécurité supérieure par rapport aux technologies précédentes.

III.9 Avantages et inconvénients des transmissions par chaos : [65]

La méthode de transmission chaotique permet de crypter et d'étaler le spectre du signal tout en transmettant et en recevant des informations en temps réel, et en même temps, par rapport à la méthode de transmission traditionnelle, la complexité du circuit requise est moindre. Cependant, la plupart d'entre eux présentent des lacunes communes et partagent les mêmes difficultés de mise en œuvre.

- **Dégradation des propriétés des systèmes chaotiques :**

La force du couplage appliqué aux systèmes chaotiques lors du processus de synchronisation, sert à tolérer l'effet du bruit de transmission et corriger les éventuelles perturbations dues aux incertitudes des paramètres.

- **La non-conformité des signaux chaotiques aux infrastructures de télécommunication actuelles :**

En raison de leur nature pseudo-aléatoire, il utilise des valeurs réelles continues et nécessite des canaux à capacité infinie, qui ne peuvent être satisfaits.

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par donner un bref tour d'horizon sur le chaos et ses différentes propriétés, puis nous avons mis l'accent sur les différentes approches de modulations chaotiques afin de les appliquer dans le cas des communications OFDM.

Chapitre IV : Simulation et résultats

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons étudier les performances d'une nouvelle technique de transmission OFDM sécurisée. En évaluant les variations du BER (taux d'erreurs binaires) en fonction du paramètre rapport signal sur bruit SNR sous logiciel Matlab 2017.

Le taux d'erreur sur les bits (BER) est un paramètre de performance utilisé dans la transmission numérique. Lors de la transmission de données à travers un canal, il est possible que des erreurs soient introduites dans le système. La présence d'erreurs dans les données dégrade les performances du système [67]

Ainsi, pour évaluer les performances du système numérique, le taux d'erreur sur les bits (BER) est utilisé pour calculer les erreurs. C'est la vitesse à laquelle les erreurs se produisent dans un système de transmission. Le taux d'erreur sur les bits est donné par : Bit Error Rate (BER) = [Number of errors that occurred during transmission](Nombre d'erreurs survenues lors de la transmission)

La première partie de notre travail permet d'évaluer les performances des différentes modulations (BPSK, QPSK, 8-PSK) à travers un canal AWGN en utilisant une simulation sur le logiciel MATLAB.

La deuxième partie est réservée à une étude comparative entre la modulation BPSK et la modulation chaotique.

La troisième partie de tant dis que portera sur l'application de la modulation chaotique dans la transmission OFDM et de faire une comparaison entre cette dernière et L'OFDM utilisent la modulation MPSK. Ces études seront effectuées en utilisant deux types de canaux : le canal à bruit blanc gaussien additif AWGN et le canal de Rayleigh

IV.2 Évaluation des performances des différentes modulations (BPSK, QPSK, 8-PSK) :

Dans cette partie, nous comparons les performances des trois types de modulation numérique (BPSK, QPSK & 8-PSK) dans le cas d'une transmission OFDM utilisant le canal AWGN.

Paramètre	Valeur
Nombre de sous porteuse	52
Modulation	BPSK, QPSK, 8PSK
Canal	AWGN

Tableau IV.1 : Les paramètres utilisés dans la simulation

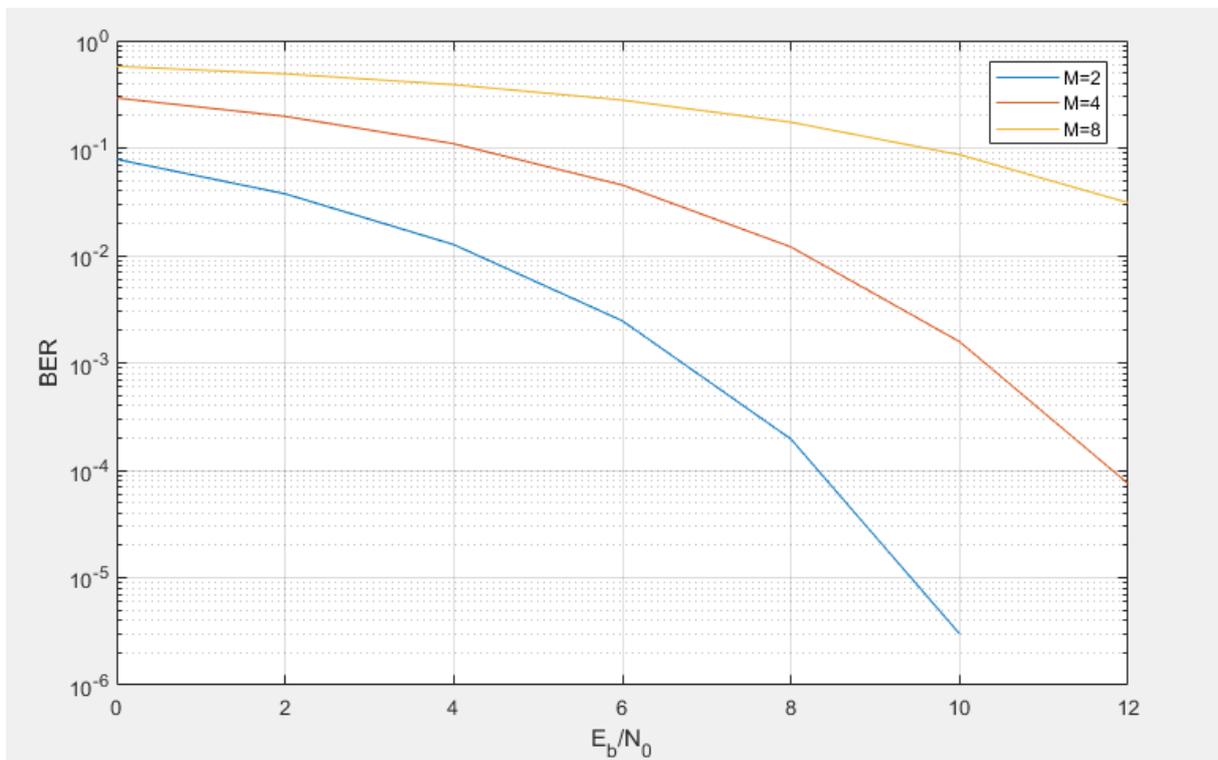


Figure IV.1 : variation de BER en fonction SNR pour différents états de modulation

Cette figure représente la variation de BER en fonction de $\frac{E_b}{N_0}$ En utilisant un canal bruité AWGN, D'après cette figure, nous constatons que la modulation BPSK donne de meilleures performances par rapport aux autres modulations QPSK et 8-PSK.

IV.3 Principe de la modulation chaotique utilisée :

- **La modulation**

Supposons que nous avons une séquence de bits d'entrée $b(n)$, que nous voulons transmettre en utilisant un signal chaotique. L'idée principale du modulateur chaotique proposé est de multiplier cette séquence par un signal chaotique généré par une fonction logistique, le résultat de cette multiplication est le signal modulé, voir la figure IV.2.

- **La démodulation**

L'idée de base de la démodulation est de multiplier le signal modulé par le signal chaotique ensuite le faire passer dans une fonction sign et récupérer le signal original voir figure.

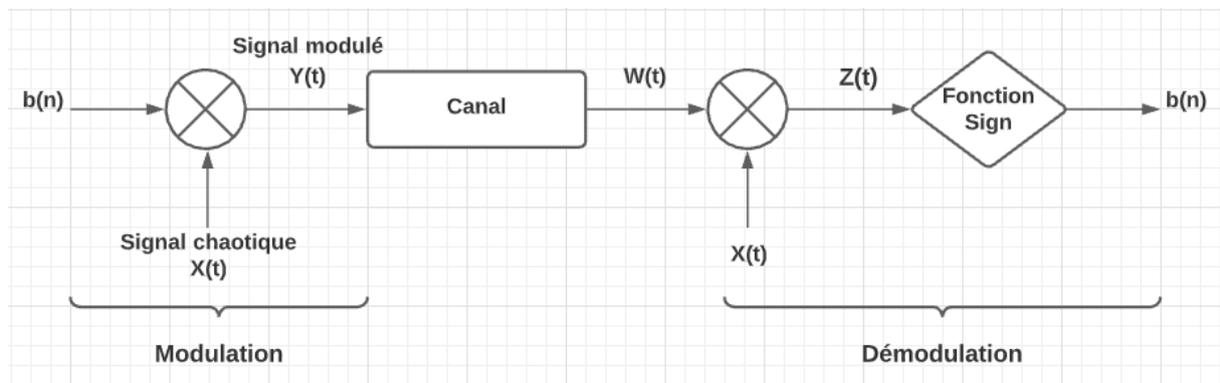


Figure IV.2 : Schéma synoptique de la modulation et démodulation chaotique.

IV.4 Comparaison entre la modulation chaotique et la modulation BPSK :

Dans cette partie, nous allons comparer les résultats obtenus des deux types de modulation utilisés (Modulation chaotique, Modulation BPSK) avec un canal AWGN.

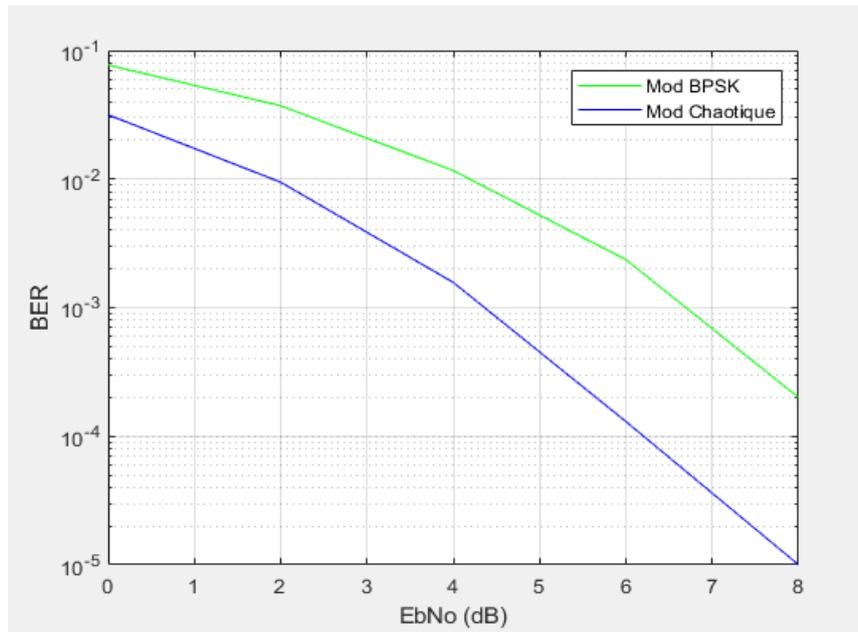


Figure IV.3 : Variation de BER en fonction SNR pour la modulation chaotique et la modulation BPSK

Cette figure représente la variation du BER en fonction de $\frac{E_b}{N_0}$. En utilisant un canal bruité AWGN, d'après les graphes nous voyons que la modulation chaotique appliquée donne de meilleurs résultats par rapport à la modulation BPSK, ce qui prouve l'efficacité de la modulation chaotique.

IV.5 Comparaison entre OFDM-chaos et OFDM-psk :

- **Système de communication OFDM avec modulation PSK :**

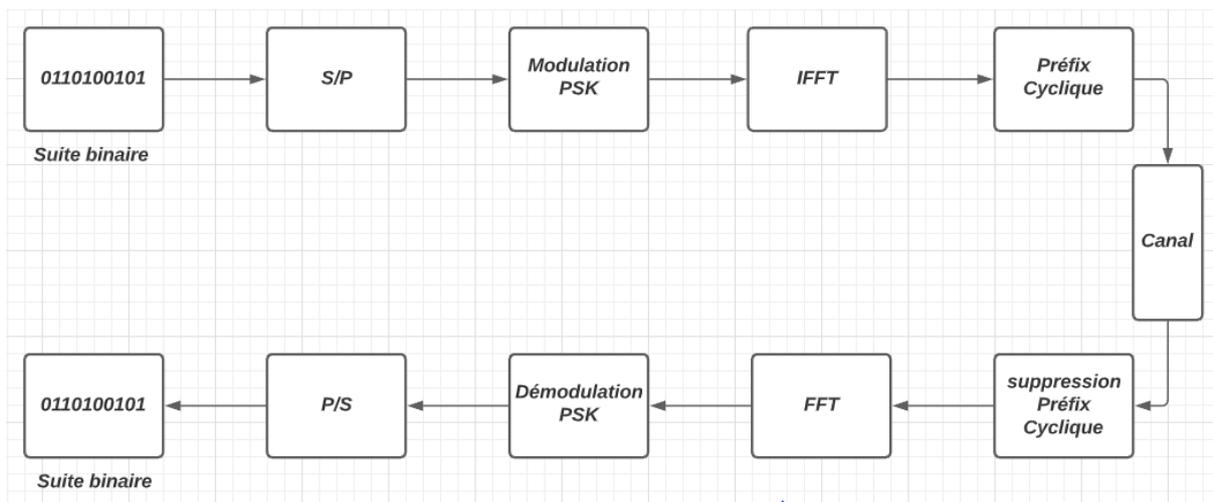


Figure IV.4 : schéma synoptique de la transmission OFDM-PSK.

• **Système de communication OFDM avec modulation CHAOTIQUE :**

Dans cette partie on va appliquer la modulation chaotique à base de la fonction logistique au lieu des modulations classiques (MPSK.....), vu ses performances présentées dans la partie précédente.

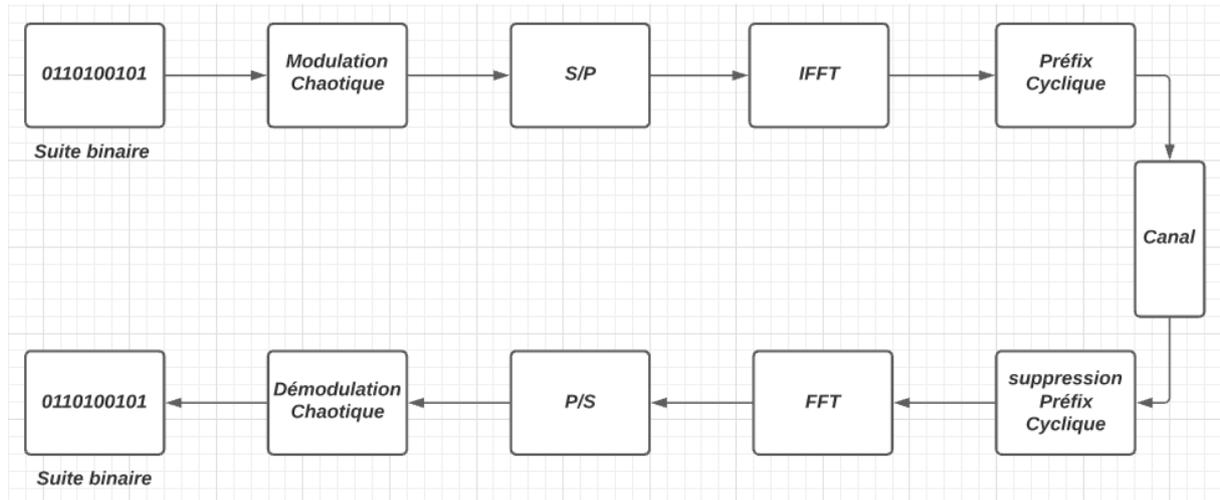


Figure IV.5 : Schéma synoptique de la transmission OFDM-chaos.

• **Résultats de la simulation :**

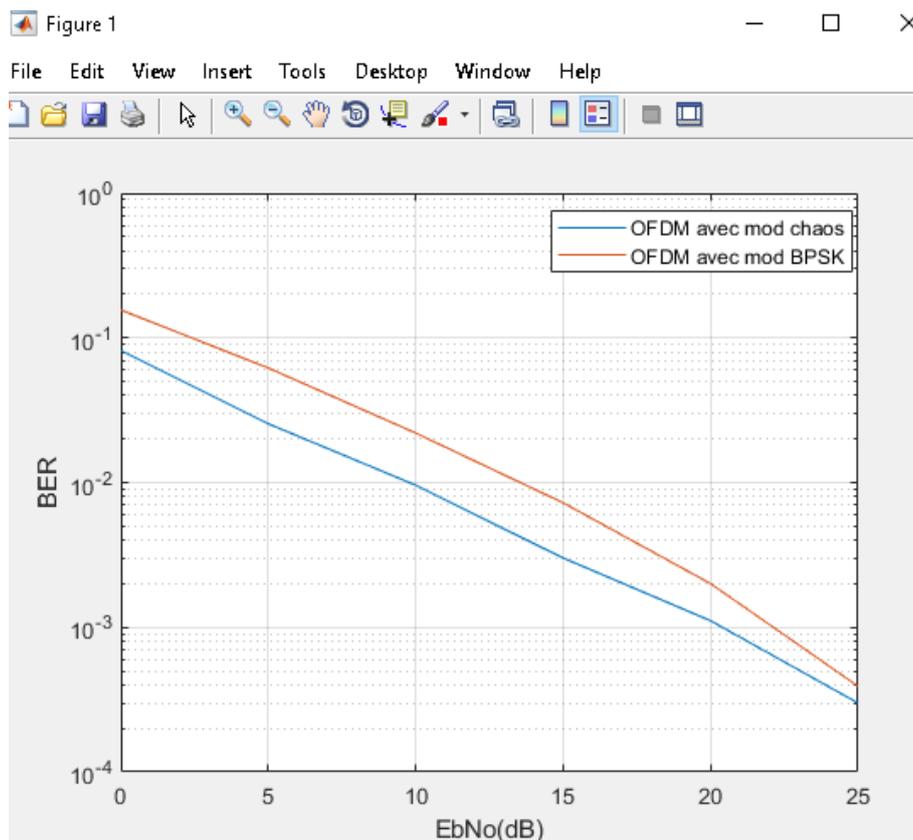


Figure IV.6 : Variation de BER en fonction SNR pour la transmission OFDM-psk et OFDM-chaos

La figure (IV.6) montre les performances BER du schéma OFDM-Chaos et OFDM-PSK dans un canal multitrajets. Tout d'abord, on voit clairement que le schéma OFDM-chaos donne de meilleurs résultats par rapport au schéma OFDM-PSK, ce qui permet d'avoir une meilleure qualité de transmission. Deuxièmement, nous obtenons une amélioration du niveau de sécurité : comme l'amplitude de chaque symbole devient plus irrégulière et imprévisible, un utilisateur involontaire qui ne connaît pas exactement les paramètres du système verra sa capacité de détection fortement altérée à cause du fait que les signaux transmis soient crypte.

IV.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation de la modulation chaotique et son implémentation dans le cas d'une transmission OFDM. Comme le prouve les résultats de simulation, l'approche proposée donne de très bon résultant par rapport de la modulation M-PSK et aussi, elle permet de crypter le signal transmis, ce qui rend son application très avantageuse dans le cas des transmissions militaires.

Conclusion générale

La demande de nouveaux services et applications sans fil ainsi que le nombre d'utilisateurs augmentent rapidement, ce qui a imposé des limitations de vitesse aux systèmes de communication sans fil, dans ces systèmes, le canal de transmission entre les antennes d'émission et de réception est l'une des principales sources de perturbation pour le signal, parmi les solutions étudiées pour répondre à ces problèmes la technique OFDM.

Dans ce projet fin d'étude nous avons proposé une nouvelle approche pour améliorer les performances d'une transmission OFDM, En utilisant la modulation chaotique

Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous avons donné un aperçu général de la communication sans fil. Et tant que l'OFDM robuste contre l'effet des multi-trajets nous avons introduit les canaux multi-trajets radio-mobiles de façon détaillée et leurs caractéristiques et phénomènes de propagation dans les canaux multi-trajets.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté le fondement de la technique OFDM et ses principes d'utilisation : la notion d'orthogonalité (temporelle et fréquentielle) l'insertion d'un préfixe cyclique (Cyclic Prefix (CP)), dans un système OFDM, permet d'éviter l'interférence entre symboles (Inter Symbol Interference (ISI)). Les modulateurs, et démodulateurs OFDM sont réalisés par les deux fonctions IFFT (Inverse Fast Fourier Transform et FFT (Fast Fourier Transform)

Dans le troisième chapitre, nous avons donné d'abord un bref aperçu du chaos et de ses différentes caractéristiques, puis nous avons concentré sur différentes méthodes de modulation chaotique afin de les appliquer au cas des communications OFDM.

Enfin et dans le dernier chapitre nous avons exposé en détail nos résultats de simulation suivis par des interprétations et des comparaisons. Après une étude comparative entre les performances des modulations utilisées par l'OFDM classiques cette étude nous a ramenée de conclure que la modulation BPSK offre des meilleurs résultats par rapport aux autres modulations (QPSK , 8-PSK) , ce qui nous a conduit de comparer cette dernière avec la modulation chaotique utilisée dans notre travail et puis on a trouvé que la modulation chaotique fournit des meilleurs performances en terme de taux d'erreur binaire (BER) à travers un canal de Rayleigh Gaussien par rapport à la modulation BPSK , et enfin nous avons proposé de construire un système OFDM dans lequel le signal envoyé dans chaque sous-porteuse est modulé de manière chaotique au lieu d'utiliser la modulation PSK ou QAM, les résultats de comparaison ont montré que OFDM-chaos est plus performante que l'OFDM-psk en terme de taux d'erreur binaire (BER).

L'avantage majeur de l'application du chaos dans la transmission OFDM est le niveau de sécurité élevé grâce à la complexité des signaux chaotiques.

Le travail que nous avons effectué pour ce mémoire nous permet d'approfondir nos connaissances dans le domaine de la modulation multiporteuse OFDM et le domaine du système chaotique et nous permet également d'améliorer le niveau de sécurité performances du notre système.

Comme perspective aux travaux que nous avons accompli dans ce mémoire, nous proposons d'utiliser cette technique OFDM-Chaos afin d'augmenter les performances et la sécurité des données d'utilisateurs dans la communication sans fil.

- Développer de nouvelle technique de modulation chaotique afin d'améliorer davantage les performances des systèmes OFDM
- Optimisation des conditions initiales pour avoir de meilleures performances

Bibliographie

- [1] J. G. Andrews, A. Ghosh, and R. Muhamed, "Fundamentals of WiMAX Understanding Broadband Wireless Networking," Prentice Hall, 2000.
- [2] N.Larbi, " Détection multi-utilisateurs dans le contexte de communication mobile :Exploitation de la combinaison OFDM/CDMA," Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf ,2015
- [3] Frederiksen, F. B., & Prasad, R. (n.d.). An overview of OFDM and related techniques towards development of future wireless multimedia communications. Proceedings RAWCON 2002. 2002 IEEE Radio and Wireless Conference (Cat. No.02EX573). doi:10.1109/rawcon.2002.1030107
- [4] A.SKZYPICZAK, "Contribution à l'Etude des Modulations Multiporteuses OFDM/OQAM et OFDM Suréchantillonnées ", Thèse de doctorat, Université deRennes 1, Novembre 2007.
- [5] B. Le Floch, R. H. Lassalle et D. Castelain, " Digital Sound Broadcasting to Mobile Receivers", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 35, No. 3, pp. 493-503, août 1989.
- [6] M. Leclerc, "Analyse des Performances d'un Système de Télécommunication à Porteuses Multiples dans le Canal Radio Mobile", Mémoire de M.Se, Université Laval, juillet 1994.
- [7] Une étude sur la réduction du PAPR dans un système OFDM Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en génie électrique pour l'obtention du grade de Maître es science (M. Se.)
- [8] P. GRUYER, S. PAILLARD « Modélisation d'un modulateur et démodulateur OFDM », 2005.
- [9] <https://fr.scribd.com/doc/469106/Informatique-Cours-Reseau-Sans-Fil-La-Technologie-Wifi> Consulté le 25 juillet 2021
- [10] M. Boulkamh Chouaib. "Prise en Compte de la QoS par les Protocoles de Routage dans les Réseaux Mobiles Ad Hoc " Diplôme du Magistère en Informatique, Université El Hadj Lakhdar de Batna 2008.
- [11] Boudjaadar Amina". Plateforme basée Agents pour l'aide à la conception et la simulation des réseaux de capteurs sans fil". Thèse de Magistère, Université de Skikda 2010.
- [12] S. SAADAOUÏ, " Conception d'un système de communication sans fil industriel basé sur la transformée en ondelettes », thèse de doctorat, Université de Lorraine,2019

- [13] H. CHEHRI, " ÉTUDE ET CARACTÉRISATION D'UN CANAL DE PROPAGATION POUR LES RÉSEAUX VANET", mémoire fin d'étude, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE,2014
- [14] S. R. Saunders & A. Aragon, "Antennas and Propagation for Wireless communication Systems. Wiley & Sons, 2. a. ed., May 2007.
- [15] H. Sizun, " Radio Wave Propagation for Telecommunication Application, Springer-Verlag",Berlin, 2005.
- [16] M. Cheikh, " Etude du canal de propagation radio pour les systèmes embarqués sans fil automobile", thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse,2010
- [17] S. Collonge, "Caractérisation et modélisation de la propagation des ondes électromagnétiques à 60 GHz à l'intérieur des bâtiments", Thèse de doctorat, Institut National des Sciences appliquées, Rennes, décembre 2003
- [18] M.Nakagami, The m-Distribution- a general formula of intensity distribution of rapid fading, reprint from Statistical Methods of Radio wave Propagation, Pergamon Press, 1960.
- [19] A. Hottinen, O. Tirkonnen, R.Wichman, Multi-antenna Transceiver Techniques for 3G and beyond, Wiley
- [20] A. Choumane,"synthèse d'un canal de propagation par système multi-antennes pour la caractérisation de terminaux mobiles à diversité ", Thèse de doctorat, UNIVERSITE DE LIMOGE,2011
- [21] Z.Bendjakboub,O.Ahmidat, étude et simulation d'un système de communication sans fil à base de Modulation OFDM ,Mémoire de master , Université Ziane Achour de Djelfa,2019
- [22] S.Benferhat," Simulation des conditions de trafic intracellulaire d'un réseau sans fil en milieu industriel par un modèle de propagation composite",Thèse de doctorat , UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL,2009
- [23] M.Debbah , « introduction aux principes de l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)» .
- [24] M. L. Doelz, E. T. Heald et D. L. Martin, Binary data transmission techniques for linear systems, Proceeding IRE, Vol. 45, pp. 656-661, M. 1957.
- [25] G. C. Porter, Error distribution and diversity performance of a frequency differentiel PSK HF modem, IEEE Transactions on Communications, Vol.COM-16. No. 4, pp.567-575, Aug. 1968.
- [26] R.V. Née & R. Prasad, OFDM for Wireless Multimedia Communications, Artech House Pubhshers, 2000.
- [27] P. GALYNA« TRANSMISSION OFDM POUR LA TÉLÉPHONIE CELLULAIRE» , Mémoire fin d'étude, L'école de technologie supérieure,2003

- [28] S. B. Weinstein et P. M. Ebert, Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform, IEEE Transactions on Communication Technology, Vol. COM-19, No 5, pp. 628-634, Oct. 1971
- [29] <https://www.techno-science.net/definition/3917.html> consulté (avril 2021)
- [30] D.Matiaë. Introduction to OFDM, II edition. 1998
- [31] R. W. Chang, "Synthesis of Band-limited Orthogonal Signals for Multichannel Data Transmission," The Bell System Technical Journal, pp. 1775–1796
- [32] S.Bamba «Gestion des interférences dans les systèmes MIMO Massifs », Thèse de doctorat , UNIVERSITE DE LIMOGES,2019
- [33] V.Dégardin, «Analyse et la faisabilité d'une transmission de données haut débits sur le réseau électrique basse tension» , université de sciences et technologies de Lille, Thèse de doctorat,2002
- [34] Yuping Zhao , S.Haggman, "Intercarrier interference self-cancellation scheme for OFDM mobile communication systems," in IEEE Transactions on Communications, vol. 49, no. 7, pp. 1185-1191, Juillet 2001
- [35] N.Larbi, " Détection multi-utilisateurs dans le contexte de communication mobile : Exploitation de la combinaison OFDM/CDMA," Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf ,2015
- [36] Etude de performances des modulations multi porteuses OFDM dans un canal radio mobile, SOLTANI Samira
- [37] H.ait Taleb «MIMO-OFDM POUR LES COMMUNICATIONS SANS-FIL DANS LES MINES SOUTERRAINES » , Mémoire fin d'étude, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE,2017
- [38] P. GRUYER, S. PAILLARD « Modélisation d'un modulateur et démodulateur OFDM» ,2005
- [39] L. Hanzo, W. Webb, T. Keller., Single- and multi-carrier quadrature amplitude modulation: principles and applications for personal communications, WLANs and broadcasting, [2nd ed.], New York, N.Y. : J. Wilèy & Sons, c2000.
- [40] S.SOLTANI « Etude de performances des modulations multi porteuses OFDM dans un canal radio mobile» , MEMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE DE M'SILA,2012
- [41] N.Y. McGraw-Hill,Digital communications (4th ed.). New York.
- [42] M. L. Doeltz , E. Heald et D.L. Martin, "Binary data transmission techniques for linear systems,"1957.
- [43]https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Theorie-du-chaos.html#ref_1 (consulté août 2021)
- [44] SCHUSTER, Heinz Georg et JUST, Wolfram. Deterministic chaos: an introduction. John Wiley& Sons, 2006

- [45] Présentée et soutenue par Georges KADDOUM Le 21 11 2008 Titre : Contributions à l'amélioration des systèmes de communication multi-utilisateurs par chaos : synchronisation et analyse des performances.
- [46] brahim akbil, optimisation des performances des technique d'accès multiple par l'utilisation des systèmes chaotique et par regroupement des utilisateurs .
- [47] CHE DZUL-KIFLI, Syahida. Chaotic dynamical systems. 2012. Thèse de doctorat. University of Birmingham.
- [48] M. P. Kennedy, "Basic concepts of nonlinear dynamique and chaos", IEEE, pp.289-313, 1994.
- [49] DA SILVA, Eric Goncalvès. Introduction aux systèmes dynamiques et chaos. 2004
- [50] O. Megherbi, " Etude et réalisation d'un système sécurisé à base de systèmes chaotiques", Thèse de magister, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, Algérie, 2013
- [51] ZEMOUICHE, Ali. Sur l'observation de l'état des systèmes dynamiques non linéaires. 2007. Thèse de doctorat. Université Louis Pasteur-Strasbourg I.
- [52] D. Viennot « Analyse Spectrale pour les systèmes dynamiques classiques ». Cours Master Physique & physique Numérique, Université de Franche-Comté.
- [53] C. Morel « Analyse et contrôle de dynamiques Chaotiques, application à des circuits électroniques non-linéaires ». Thèse de Doctorat de l'école Doctorale d' Angers. 2005
- [54] Contrôle des systèmes dynamiques chaotiques, Laouira Widad
- [55] G. Zaibi « Sécurisation par dynamiques des réseaux locaux sans fil au niveau de la couche MAC », thèse de Doctorat de l'université de Toulouse, 2012.
- [56] Y. Moussa. "Elaboration d'Algorithmes de Masquage pour Les Systèmes de Communication Chaotique." Thèse de Doctorat, Université Mentouri - Constantine, 2012.
- [57] Kassem Ahmad. Protocoles, gestion et transmission sécurisée par chaos des clés secrètes. Applications aux standards : TCP/IP via DVB-S, UMTS, EPS. Electronique. Thèse de doctorat, UNIVERSITE DE NANTES ; UNIVERSITE LIBANAISE, 2013
- [58] YANG Li-Jiang and CHEN Tian-Lun Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China (Received November 1, 2001)
- [59] Chikhi Mohamed Hichem, Djenouri Mohamed Amine « Communication sécurisée par chaos : Etude et implémentation sur carte FPGA » mémoire fin d'études, Université Saad Dahleb de Blida, 2014.
- [60] Ott, E., Chaos in dynamical systems. 2002: Cambridge Univ Pr.
- [61] PAR Sacha ATWAL UN SYSTÈME DE COMMUNICATION À FAIBLE PROBABILITÉ D'INTERCEPTION BASÉ SUR LA MODULATION CHAOTIQUE MONTRÉAL, LE 20 DÉCEMBRE 2010.
- [62] Oppenheim, A., et al. Signal processing in the context of chaotic signals. 1992.

[63] Benhabib Chouaib, étude d'un système chaotique pour la sécurisation des communications optique.

[64] Brahim AKBIL. Optimisation des performances des techniques d'accès multiple par l'initialisation des systèmes chaotiques et par regroupement des utilisateurs. Thèse de doctorat, UNIVERSITE MOHAMMED V, 2016.

[65] ABDERRAHIM NassibaWafa. Étude et conception d'un modèle chaotique dédié aux transmissions chiffrées, thèse de doctorat, UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID, 2015

[66] Hamid HAMICHE. Inversion à gauche des systèmes dynamiques hybrides chaotiques « Application à la transmission sécurisée de données, Thèse de doctorat », UNIVERSITE MOULOUD HAMMERRI, TIZI-OUZOU, 2011.

[67] Sandeep Kaur and Er. Pradeep Sharma, "BER and PAPR Analysis by Estimating the Channel in OFDM System," International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, Volume 4, Issue 10, October 2014.