

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Télécommunications

**Spécialité** : Réseaux et Télécommunications (RT)

**Par** : Kaouane Mohammed Amine

&

Latreche Feth ELLAH

### **Sujet**

**Annulation de bruit impulsif dans les systèmes OFDM en utilisant  
l'apprentissage profond**

Soutenu publiquement, le 14 / 06 / 2023 , devant le jury composé de :

Mr IRID Sidi Mohammed Hadj	MCA	Université de Tlemcen	Président
Mr MERIAH Sidi Mohammed	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur
Mr KAMECHE Samir	Professeur	Université de Tlemcen	Encadreur
Mme HAMLILI Heyem	Docteur	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2022 /2023

## Abstract

In recent years, deep learning (DL) has gained increasing interest as a promising method for noise cancellation. Unlike conventional OFDM receivers, OFDM transmission is sensitive to non-Gaussian interference caused by impulsive phenomena. As a result, several noise cancellation algorithms have been developed assuming that the noise is Gaussian in nature, such as additive white Gaussian noise (AWGN). In this context, we propose a new approach based on deep learning for impulsive noise cancellation, aiming to improve the performance of traditional OFDM receivers. Our scheme specifically applies to the OFDM system in a Rayleigh fading channel. The results of our simulations demonstrate the effectiveness of our solutions in terms of noise cancellation and improvement in bit error rate (BER) performance, even in the presence of strong impulsive noise.

**Keywords:** OFDM, Impulsive noise,  $\alpha$ -stable distribution, Deep Learning (DL), BER.

## Résumé

Au cours des dernières années, l'apprentissage en profondeur (DL) a suscité un intérêt croissant en tant que méthode prometteuse pour l'annulation de bruit. Contrairement aux récepteurs OFDM classiques, la transmission OFDM est sensible aux interférences non gaussiennes causées par des phénomènes impulsifs. De ce fait, plusieurs algorithmes d'annulation de bruit ont été développés en supposant que le bruit est de nature gaussienne, tel que le bruit blanc additif gaussien (AWGN). Dans ce contexte, nous présentons une nouvelle approche basée sur l'apprentissage profond pour l'annulation du bruit impulsif, afin d'améliorer les performances des récepteurs OFDM traditionnels. Notre schéma propose une application spécifique au système OFDM dans un canal d'évanouissement de Rayleigh. Les résultats de nos simulations démontrent l'efficacité de nos solutions en termes d'annulation du bruit et d'amélioration des performances du taux d'erreur binaire (BER), même en présence d'un fort bruit impulsif.

**Mots clés :** OFDM, Bruit impulsif, Apprentissage en profondeur (DL), BER.

## ملخص

في السنوات الأخيرة ، اكتسب التعلم العميق (DL) اهتمامًا متزايدًا كطريقة واعدة لإلغاء الضوضاء. على عكس المستقبلات OFDM التقليدية في أنظمة الاتصالات ، فإن الإرسال OFDM حساس للتداخل غير غوسية الناجم عن الظواهر النابضة. ونتيجة لذلك ، تم تطوير عدة خوارزميات إلغاء ضوضاء تفترض أنها ذات طبيعة غوسية ، مثل الضوضاء غوسية البيضاء الإضافية (AWGN). في هذا السياق ، نقترح نهجًا جديدًا يعتمد على التعلم العميق لإلغاء الضوضاء النابضة ، بهدف تحسين أداء المستقبلات OFDM التقليدية. يتم تطبيق مخططنا على وجه التحديد على نظام OFDM في قناة تلاشي Rayleigh. تظهر نتائج محاكاة لدينا فعالية حلولنا من حيث إلغاء الضوضاء وتحسين أداء معدل أخطاء البت (BER) ، حتى في وجود ضوضاء نابضة قوية.

الكلمات الرئيسية: OFDM ، الضوضاء النابضة ، التوزيع الألفا-مستقر ، التعلم العميق.

*J'ai l'honneur et le plaisir de consacrer ce modeste travail :*

***À mon père (KAOUANE SAID)***

*À travers les années, tu as été mon roc, ma boussole et mon guide. Ta patience infinie, ta confiance indéfectible et ton amour inconditionnel ont façonné la personne que je suis aujourd'hui. Merci pour votre présence et votre soutien et que Dieu te garde*

***À la meilleure des mères (B.FOUZIA)***

*Peu importe ce que je fais où dit, je ne saurais trop vous remercier pour votre compagnie, vos efforts, votre amour, votre gentillesse à me guider et votre source constante de force. En cette journée merveilleuse et mémorable, je vous consacre cette œuvre en signe de gratitude et de remerciement. Je prie Dieu Tout Puissant de vous donner la santé, et de vous protéger de tout mal ;*

***À ma sœur et ma très chère grand-mère pour leurs prières et douae ;***

***À toute ma famille pour son soutien indéfectible tout au long de mon parcours académique ;***

***Mes amis, ainsi que tous ceux qui m'ont soutenu et aidé durant ce projet de fin de cycle ;***

***Sans oublier tous mes professeurs, qu'ils soient de l'enseignement primaire, secondaire ou supérieur ;***

***Kaouane Mohammed Amine***

*كعوان محمد امين*

***À mon cher père DJILALI,***

*Je tiens à exprimer mon amour, mon estime, mon dévouement et mon respect envers vous. Votre soutien inconditionnel et vos sacrifices pour mon éducation et ma formation ont été inestimables. Sans votre soutien constant jour et nuit, je n'aurais pas pu réaliser ce travail de recherche ;*

***À la mémoire de ma mère bien-aimée [S. NAIMA],***

*qui a été une source d'inspiration et de soutien inconditionnel tout au long de ma vie. Votre amour, votre sagesse et votre courage continuent à me guider même en votre absence. Ce travail est dédié à votre mémoire et à l'héritage que vous avez laissé derrière vous ;*

***À mes deux frères chéris, RIDAH et DJAMAL\_EDDINE ;***

***À mes proches ;***

***À la famille BENNADRA, notamment MOUNAIME et SALAH\_EDDINE ;***

***À mes professeurs, qu'ils soient de l'enseignement primaire, secondaire ou supérieur ;***

***À tous mes amis ;***

***Latreche Feth\_ELLAH***

لطرش فتح الله

Nous tenons tout d'abord à remercier **Allah** pour nous avoir accordé la santé et la détermination pour mener à bien la réalisation de cette mémoire.

Nous voudrions également exprimer notre profonde gratitude envers nos encadreurs, **Mr S.Kameche** et **Mme H.Hamlili**, pour leur soutien inconditionnel, leur expertise et leur patience tout au long de nos recherches. Leurs conseils avisés, leur encouragement et leur disponibilité nous ont été d'une aide précieuse.

Nous exprimons notre sincère gratitude envers les membres du jury pour l'appréciation précieuse de ce travail, ainsi que pour leurs remarques et critiques constructives.

Nous tenons également à remercier Monsieur « **S.M.H Irid** », Maître de Conférences à l'Université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il nous a fait en présidant notre jury de mémoire, Ainsi que Monsieur « **S.M. Meriah** », professeur à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude envers nos professeurs, enseignants et toutes les personnes qui nous ont soutenus tout au long de notre parcours. Leurs conseils précieux ont été d'une grande importance et témoignent de leur reconnaissance envers nous.

Nous remercions également nos amis qui ont participé activement à la réalisation de cette mémoire et qui nous ont soutenus dans les moments de doute. Leurs encouragements, leurs commentaires et leur soutien moral ont été des éléments clés de la réussite de ce travail.

Résumé.....	I
Dédicaces.....	II
Remerciements.....	IV
Table des matières.....	V
Acronymes.....	VII
Liste des figures.....	IX
Liste des tableaux.....	XI

Introduction Générale.....	2
----------------------------	---

## Chapitre I : L'évolution des réseaux mobiles de la 1G vers la 5G

I.1 Introduction.....	5
I.2 Evolution des systèmes radio cellulaires.....	5
I.2.1 Les réseaux mobiles de première génération (1G).....	5
I.2.2 Les réseaux mobiles de deuxième génération (2G).....	6
I.2.2.1 Le réseau GSM.....	6
I.2.2.2 Architecture GSM.....	7
I.2.3 Les réseaux mobiles de troisième génération (3G).....	8
I.2.3.1 UMTS.....	9
I.2.3.2 Description générale de l'architecture d'un réseau UMTS.....	9
I.2.3.3 Le HSPA.....	10
I.2.4 Les réseaux mobiles quatrièmes générations (4G).....	10
I.2.4.1 De l'UMTS au LTE.....	10
I.2.4.2 Architecture du réseau LTE.....	11
I.2.4.3 Le réseau LTE-A.....	13
I.2.5 Les réseaux mobiles de cinquième génération (5G).....	13
I.2.5.1 Réseau d'accès radio de nouvelle génération (NG-RAN).....	14
I.2.5.2 Réseau cœur 5G (5GC).....	15
I.3 Comparaison entre les 5 générations de communication.....	18
I.4 Conclusion.....	19

## Chapitre II : OFDM

II.I Introduction.....	21
II.2 Principe de fonctionnement.....	21
II.3 chaine de transmission.....	22

II.3.1 Emetteur.....	22
II.3.2 Canal de transmission.....	24
II.3.2.1 Canal de propagation par trajets multiples .....	26
II.3.2.2 Canal à bruit blanc additif gaussien(AWGN) .....	28
II.3.2.3 Canal de propagation à bruit impulsif .....	28
II.3.3 Récepteur.....	33
II.4 Conclusion .....	34

### **Chapitre III : Apprentissage en profondeur**

III.1 Introduction .....	36
III.2 Les réseaux neuronaux.....	36
III.2.1 Présentation sommaire du neurone biologique .....	36
III.2.2 Les réseaux neuronaux artificiels .....	38
III.2.3 Modèle mathématique d'un neurone artificiel.....	39
III.2.3.1 Les fonctions d'activation.....	40
III.3 Apprentissage des réseaux neuronaux artificiels .....	43
III.3.1 Vocabulaire des réseaux neuronaux.....	44
III.3.2 Types d'apprentissage.....	45
III.4 L'auto encodeur .....	47
III.4.1 L'architecture d'un auto-encodeur .....	48
III.4.2 Principe de fonctionnement d'un auto-encodeur.....	49
III.4.3 Paramètres d'entraînement pour un auto-encdeur .....	50
III.5 Conclusion .....	50

### **Chapitre IV : Résultats de simulation**

IV.1 Introduction .....	52
IV.2 Présentation de Matlab.....	52
IV.3 Simulation et résultats.....	52
IV.3.1 Simulation de la chaine OFDM.....	53
IV.3.2 Simulation de bruit impulsif.....	55
IV.3.3 Implémentation de l'auto-encodeur dans la chaine OFDM.....	58
IV.4 Conclusion.....	61
Conclusion Générale .....	63
Références Bibliographiques .....	65

# Acronymes

<b>1G</b>	Première Génération.	<b>D</b>	
<b>2G</b>	Deuxième Génération.	<b>DAE</b>	Denosing Autoencoder.
<b>3G</b>	Troisième Génération.	<b>DCS</b>	Digital Cellular System.
<b>4G</b>	Quatrième Génération.	<b>DN</b>	Data Network.
<b>5G</b>	Cinquième Génération.	<b>E</b>	
<b>3GPP</b>	3rd Generation Partnership Project.	<b>EDGE</b>	Enhanced Data Rates for GSM Evolution.
<b>A</b>		<b>EIR</b>	Equipment Identity Registration.
<b>AE</b>	Auto Encodeur .	<b>EPC</b>	Evolved PacketCore Network.
<b>ADN</b>	Acide Désoxyribonucléique.	<b>eNB</b>	Evolved NodeB.
<b>AMPS</b>	Advanced Mobile Phone System.	<b>F</b>	
<b>AuC</b>	Authentication Center.	<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiple Access.
<b>AMF</b>	Access Mobile Function.	<b>FTT</b>	Fourier Transform.
<b>AF</b>	Application Function.	<b>FPLMTS</b>	Future Public Land Mobile. Télécommunications System.
<b>AWGN</b>	Additif White Gaussian Noise.	<b>G</b>	
<b>B</b>		<b>GSM</b>	Global system for mobile communication.
<b>BER</b>	BER: Bit Error Rate.	<b>GSNR</b>	Geometric Signal-to-Noise Ratio.
<b>BPSK</b>	Binary Phase Shift Keying.	<b>gNB</b>	Next Generation NodeB.
<b>BSIC</b>	Base Station Identity Code.	<b>gNB-CU</b>	gNB-Central Unit.
<b>BS</b>	Base Station.	<b>gNB-CU-CP</b>	gNB Central Unit - Control Plane.
<b>BSS</b>	Base Station Sub system.	<b>gNB-CU-UP</b>	gNodeB Central Unit - User Plane.
<b>BSC</b>	Base Station Controller.	<b>gNB-UD</b>	gNB Distributed Unit.
<b>BTS</b>	Base Transceiver Station.	<b>GPRS</b>	General Packet Radio Service.
<b>C</b>		<b>H</b>	
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access.	<b>HLR</b>	Home Location Register.
<b>CP</b>	commutation paquets.	<b>HSS</b>	Home Subscriber Server.
<b>CN</b>	Core Network.	<b>HTTP</b>	Hypertext Transfer Protocol.
<b>CNN</b>	Convolutional Neural Network.		
<b>CUPS</b>	Control and User Plane Separation.		



<b>I</b>		<b>Q</b>	
<b>IFFT</b>	inverse Fast Fourier Transform.	<b>QPSK</b>	Quadrature Phase Shift Keying.
<b>IMEI</b>	International Mobile Equipment Identity.	<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation.
<b>IMT</b>	International Mobile Telecommunication.	<b>R</b>	
<b>L</b>		<b>ReLU</b>	Rectified Linear Unit.
<b>LOS</b>	Line-Of-Sight.	<b>RHH</b>	Remote Radio Head.
<b>LTE</b>	Long Term Evolution.	<b>RNIS</b>	Réseau Numérique à Intégration de Services.
<b>LTE-A</b>	LTE Advanced.	<b>RNN</b>	Recurrent Neural Network.
<b>M</b>		<b>S</b>	
<b>MME</b>	Mobility Management Entity.	<b>SAE</b>	System Architecture Evolution.
<b>MMS</b>	Multimedia Messaging Service.	<b>SGW</b>	Serving Gateway.
<b>MSISDN</b>	Mobile Station International Subscriber Directory Number.	<b>SMS</b>	Short Message Service.
<b>N</b>		<b>SNR</b>	Signal to Noise Ration.
<b>NLOS</b>	None Line-Of-Sight.	<b>S<math>\alpha</math>S</b>	Stable $\alpha$ -Stable.
<b>NMT</b>	Nordic Mobile Téléphone.	<b>T</b>	
<b>NG-RAN</b>	Next Generation Radio Access Network	<b>TEB</b>	Taux Erreur Binaire.
<b>NF</b>	Network Function.	<b>TACS</b>	Total Access Communications System.
<b>O</b>		<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access.
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing.	<b>TMSI</b>	Temporary Mobile Subscriber.
<b>P</b>		<b>U</b>	
<b>PDC</b>	Personal Digital Communications.	<b>UE</b>	User Equipment.
<b>PDF</b>	Probability Density Function.	<b>UIT</b>	Union Internationale Telecommunications.
<b>PGW</b>	Packet Data Network Gateway.	<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunications System.
<b>PCRF</b>	Policy and Charging Rules Function.	<b>V</b>	
<b>PDN</b>	Packet Data Network.	<b>VLR</b>	Visitor Location Register.

# Liste des Figures

## Chapitre I

Figure I.1. Évolution de communication mobile 1G à 5G .....	5
Figure I.2. Architecture GSM .....	7
Figure I.3. Architecture du réseau UMTS .....	9
Figure I.4. Architecture du réseau LTE.....	11
Figure I.5. Architecture de la cinquième génération (5G).....	14
Figure I.6. Architecture du NG-RAN .....	15
Figure I.7. Architecture du 5G Cœur .....	15

## Chapitre II

Figure II.1. Représentation fréquentielle-temporelle du signal OFDM .....	21
Figure II.2. Diagramme en bloc de la chaine de transmission OFDM.....	22
Figure II.3. Représentation temporelle et vectorielle .....	23
Figure II.4. Préfixe cyclique .....	24
Figure II.5. Propagation par trajets multiples.....	25
Figure II.6. Bruit pour différentes Valeurs de A et $\Gamma=0.001$ .....	30
Figure II.7. (a) deux modèles de bruit de classe d'état et (b) modèle de bruit Bernoulli-gaussien .....	31
Figure II.8. distributions de différentes valeurs de $\alpha$ tandis que $\beta=0$ et $\gamma=1$ et $\delta=0$ .....	32

## Chapitre III

Figure III.1. Diagramme de Venn.....	36
Figure III.2. Le cerveau humain .....	37
Figure III.3. Neurone biologique .....	37
Figure III.4. L'architecture d'un Réseau de neurones.....	39

---

Figure III.5. Modèle d'un neurone artificiel (Marc Parizeau., 2004) .....	40
Figure III.6. La fonction sigmoïde .....	41
Figure III.7. La fonction d'activation ReLU .....	42
Figure III.8. La fonction d'activation la tangente .....	42
Figure III.9. La fonction d'activation linéaire .....	43
Figure III.10. Apprentissage supervisé.....	46
Figure III.11. Apprentissage non supervisé .....	46
Figure III.12. L'architecture d'un auto-encodeur.....	48

## Chapitre IV

---

Figure IV.1. Logo MATLAB.....	52
Figure IV.2. Schéma bloc de la chaine de transmission .....	53
Figure IV.3. BER vs SNR .....	55
Figure IV.4. Bruit impulsif .....	56
Figure IV.5. Comparaison de BER pour des différentes valeurs de $\alpha$ .....	57
Figure IV.6. Comparaison de BER pour des différents schémas de modulation pour un milieu fortement impulsif $\alpha=1,2$ .....	58
Figure IV.7. Schéma fonctionnel.....	59
Figure IV.8. Schéma fonctionnel de OFDM basée AE.....	60
Figure IV.9. BER vs GSNR pour $\alpha=1,2$ .....	61

# Liste des Tableaux

---

---

Tableau I.1. Les différents standards du réseau 1G .....	6
Tableau I.2. Comparaison entre les 5 générations .....	18
Tableau II.1. Les équations des cas particuliers de $\alpha$ stable .....	33
Tableau III.1. Analogie entre neurones biologiques et artificiels .....	39
Tableau IV.1. Paramètres de simulation.....	53

# Introduction générale

## Introduction générale

Au fil des années, Les systèmes de communication sans fil ont considérablement évolué à la suite des avancées technologiques dans plusieurs domaines scientifiques tels que le traitement du signal, la microélectronique, la nanoélectronique, les logiciels et les mathématiques. Ce développement a permis l'apparition de plusieurs générations de téléphonie mobile, de la première génération (1G) qui était le système de radio mobile analogique en 1980, en passant par la deuxième génération (2G) qui était le premier système mobile numérique, la troisième génération (3G) qui était le premier système large bande, jusqu'à la quatrième génération (4G) qui est actuellement utilisée et la cinquième génération (5G) qui est en cours de déploiement.

Afin de satisfaire les exigences croissantes en termes de débit et de mobilité des utilisateurs, les modulations mono-porteuses traditionnelles ne parviennent pas à offrir une solution optimale, principalement en raison des contraintes liées à la sélectivité en fréquence des canaux et aux problèmes de trajets multiples. Par conséquent, les réseaux sans fil ont adopté la technique de modulations multi-porteuses OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) pour améliorer considérablement leur capacité de transmission.

Les canaux de transmission sans fil ont évolué en termes de caractéristiques et de nature de bruit. Au début, les modèles de bruits utilisés étaient simples et se limitaient au bruit blanc additif gaussien (AWGN), qui est un bruit aléatoire et stationnaire avec une densité spectrale de puissance constante dans toutes les bandes de fréquences. Cependant, avec le développement des technologies de communication sans fil, les canaux de transmission sont devenus plus complexes et ont commencé à présenter des caractéristiques de bruit impulsif, qui est un bruit non stationnaire et non gaussien avec une densité spectrale de puissance variable dans différentes bandes de fréquences.

Cependant, l'utilisation de l'OFDM dans des canaux à bruit impulsif peut entraîner des erreurs de transmission importantes, ce qui nécessite l'utilisation de codes correcteurs d'erreur pour améliorer la qualité de la transmission.

Ces dernières années, l'apprentissage profond est devenu une méthode populaire pour résoudre les problèmes de traitement du signal, y compris l'annulation du bruit. Cette méthode utilise des réseaux de neurones artificiels pour apprendre à annuler le bruit de manière automatique. Et c'est dans ce cadre s'articule notre mémoire où nous allons utiliser l'apprentissage profond et les réseaux de neurones pour supprimer le bruit impulsif des signaux OFDM. Nous avons organisé notre projet en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons une vue d'ensemble des différentes générations de téléphonie mobile, de la 1G à la 5G, en expliquant les normes de téléphonie mobile et les technologies utilisées dans chaque génération.

Dans le deuxième chapitre, nous décrivons en détail la technique OFDM, son principe de fonctionnement, et les différents blocs constituant la chaîne de transmission. En plus nous abordons les différents types de canaux de communication. Nous commençons par une explication détaillée du canal à bruit blanc additif gaussien (AWGN), suivi du canal de propagation à trajets multiples avec les distributions Rayleigh et Rice, et enfin en nous intéressant au canal de propagation à bruit impulsif.

Dans le troisième chapitre, nous allons explorer les concepts clés de l'apprentissage profond, en commençant par une présentation sommaire de réseaux neuronaux artificiels. Nous allons également examiner la fonction d'erreur, ainsi que les fonctions d'activation qui permettent aux neurones de prendre des décisions à partir des données d'entrée. Enfin, nous allons aborder un concept important de l'apprentissage profond, l'auto-encodeur, qui sera utilisé par la suite dans l'élimination de bruit impulsif.

Dans le quatrième chapitre nous allons développer la technique de suppression de bruit impulsif S<sub>o</sub>S en utilisant les auto-encodeurs et nous présenterons les résultats de simulation.

La conclusion de notre projet de fin d'étude consistera en une synthèse générale qui récapitulera notre travail et mettra en évidence les éventuelles perspectives de notre étude.

Chapitre I :  
L'évolution des réseaux  
mobiles de la 1G vers la 5G



## I.1 Introduction :

Ces dernières années, nous avons été témoins de l'émergence et de la croissance des réseaux mobiles. De 1G à 2G, 3G, 4G, et maintenant 5G, l'ensemble du processus d'évolution des réseaux mobiles du 1G au 5G a pris environ 40 ans. En raison de l'énorme demande de connexions supplémentaires dans le monde, les normes de communication mobile ont considérablement progressé dans leurs capacités de performance et de sécurité pour prendre en charge davantage d'utilisateurs. Dans ce chapitre, nous jetons un coup d'œil sur l'évolution des technologies sans fil pour la communication mobile [1].

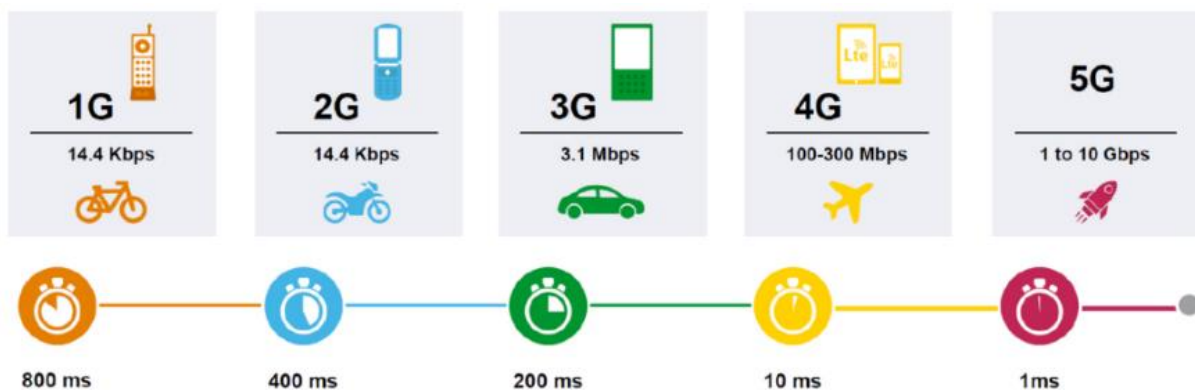


Figure I.1: Évolution de communication mobile 1G à 5G

## I.2 Evolution des systèmes radio cellulaires :

### I.2.1 Les réseaux mobiles de première génération (1G) :

Le web a tellement évolué qu'il est difficile de le comparer à quoi que ce soit d'autre dans ce monde de la technologie. Remontons directement dans le temps, à 1G où tout a commencé. 1G est la première génération de technologie de communication mobile formulée dans les années 1980. Ces systèmes cellulaires étaient basés sur des technologies analogiques dédiées à la fourniture de services vocaux, où chaque appel utilisait un canal de fréquence à bande étroite séparé [2]. Plusieurs normes cellulaires ont été adoptées dans différentes régions, telles que (NMT), (AMPS) (TACS).

Standard	Utilisation	Technologie
Advanced Mobile Phone System (AMPS)	Amérique du Nord, 1980	Cellulaire, analogique, FDMA.
Total Access Communication System (TACS)	UK, 1983	Cellulaire, analogique, FDMA.
Nordic Mobile Telephone (NMT)	Suède, Russie, 1 octobre 1981	Cellulaire, analogique, FDMA.
The Radio Telephone Network C	Allemagne, 1985	Cellulaire, analogique, FDMA, Roaming.

**Tableau I.1** : Les différents standards du réseau 1G

## **I.2.2 Les réseaux mobiles de deuxième génération (2G) :**

La seconde génération 2G de réseau mobile déployé dans les années 1990 a vu le passage de l'analogique au numérique. Grâce aux progrès stupéfiants des semi-conducteurs qui ont permis de réduire la taille et le coût des composants électroniques, les téléphones mobiles 2G sont devenus un produit de consommation de masse. Cette génération a introduit de nouveaux services en plus de la transmission vocale traditionnelle, tels que les services de messages courts (SMS) et multimédia (MMS), les télécopies et l'accès à des réseaux fixes numériques tels que l'internet et le RNIS.

Trois standards sont principalement utilisés, le GSM (Global system for mobile communication), le 2,5G GPRS (General packet Radio Service) et EDGE où 2,75G (Enhanced Data Rate for GSM Evolution).

### **I.2.2.1 Le réseau GSM :**

Global system for mobile communication GSM est la première norme numérique de téléphonie mobile lancé lors de la CEPT (conférence Européenne des Postes de Télécommunication). Introduit pour la première fois en 1990 pour remplacer les réseaux cellulaires précédents et est rapidement devenu la technologie de communication mobile dominante dans le monde.

C'est une technologie de communication étendu qui utilise la canalisation radio numérique pour transmettre des services mobiles de voix et de données. Selon les systèmes, différents bandes de fréquences sont utilisées, telles que les bandes 450 Mhz (Short Messages), 900 Mhz (GSM) et 1800 Mhz (DCS 1800 ; DCS : Digital Cellular System). En Europe, on peut trouver ces deux types de réseaux [3]:

- **GSM 900** : La bande 890-915MHz pour l'Up Link et la bande 935-960 MHz pour le Down Link.
- **Le GSM 1800** : également appelé **DCS 1800**, la bande Up Link 1710MHz-1785MHz et La bande Down Link 1805MHz-1880MHz.

Les dispositifs qui opèrent à la fois sur les fréquences 900 et 1800 sont connus sous le nom appelés **GSM dual band** ou simplement dual band.

### I.2.2.2 Architecture GSM :

Afin de fournir un service utilisable, les opérateurs de réseaux de radiocommunication mobile placent un ensemble spécifique de stations de base (BS : Base Stations) dans la zone à couvrir afin que le terminal soit toujours à quelques kilomètres de l'une des stations de base. La surface où un terminal peut établir une liaison avec une certaine station de base est une cellule. Par conséquent, l'espace à couvrir est divisé en cellules adjacentes. Une station mobile est tout terminal capable de communiquer sur un réseau. Un téléphone mobile se compose essentiellement d'un émetteur-récepteur et d'une logique de commande [3].

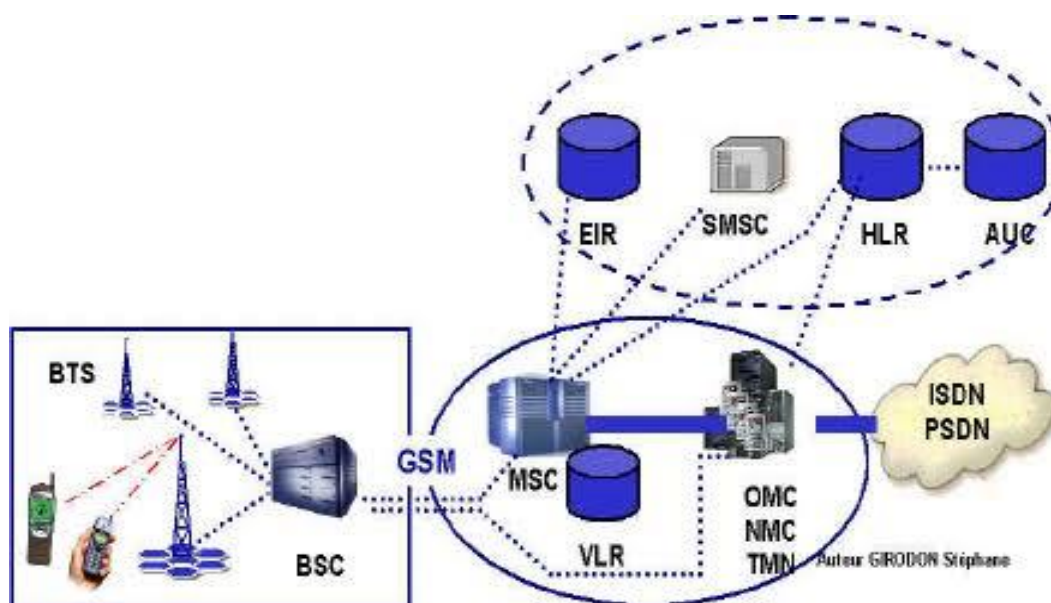


Figure I.2 : Architecture GSM [4]

**Le sous-système BSS (Base Station Sub system) :** Il contrôle la qualité des liaisons à partir de l'interface radio GSM et contient BTS et BSC [4].

- Le BTS (Base Transceiver Station) contrôle les "antennes" et maintient la communication par le biais d'un canal radio duplex. Elle prend en charge les configurations suivantes : puissance

électromagnétique, canal radio utilisé pour la diffusion, BSIC (code d'identité de la station de base). Ses principales fonctionnalités sont : le cryptage des messages, le codage des canaux et la modularisation.

- BSC (Base Station Controller). Il administre et contrôle les stations de base et les canaux radio. Il fournit l'implémentation du codage pour les messages vocaux et gère la localisation des données.

**Le sous-système NSS (Network Sub System) :** Il contient les MSC, les bases de données telles que VLR, HLR, EIR et AuC [4].

Le NSS offre les fonctionnalités suivantes : gestion de la liaison de communication avec d'autres mobiles, réseaux terrestres et satellites, gestion des abonnés mobiles à partir d'autres BSC et gestion des abonnés à l'aide des données des bases AuC, EIR, VLR et HLR.

- MSC (Mobile Switching Center) : Contient le sous-système de commutation et le sous-système de contrôle.
- HLR (Home Location Register) : stocke les paramètres de l'utilisateur, y compris le MSISDN et le type de service.
- VLR : c'est une base de données miroir du HLR pour les utilisateurs temporaires d'une autre zone VLR (Visitors Location Register).
- EIR (Equipment Identity Registration) : Il s'agit d'une base de données centrale contenant l'IMEI (numéro unique attribué à chaque appareil par le fournisseur) de chaque appareil mobile.
- AuC (Authentication Center) : inclut les fonctions et responsabilités suivantes : processus d'autorisation d'accès des utilisateurs aux réseaux mobiles, cryptage des transmissions sans fil et attribution d'identités temporaires TMSI (Temporary Mobile Subscriber).

### **I.2.3 Les réseaux mobiles de troisième génération (3G) :**

La troisième génération 3G de réseaux cellulaires fait référence à la technologie utilisée dans les télécommunications mobiles pour permettre le transfert de données à haut débit, les services multimédias sophistiqués comme le streaming vidéo, les jeux vidéo, la navigation GPS... [5].

Il a été introduit pour la première fois au début des années 2000, remplaçant les systèmes de deuxième génération pour fournir un accès internet plus rapide et une capacité accrue pour prendre en charge un nombre important d'utilisateurs simultanément en faisant appel à des technologies avancées comme CDMA (Code Division Multiple Access).

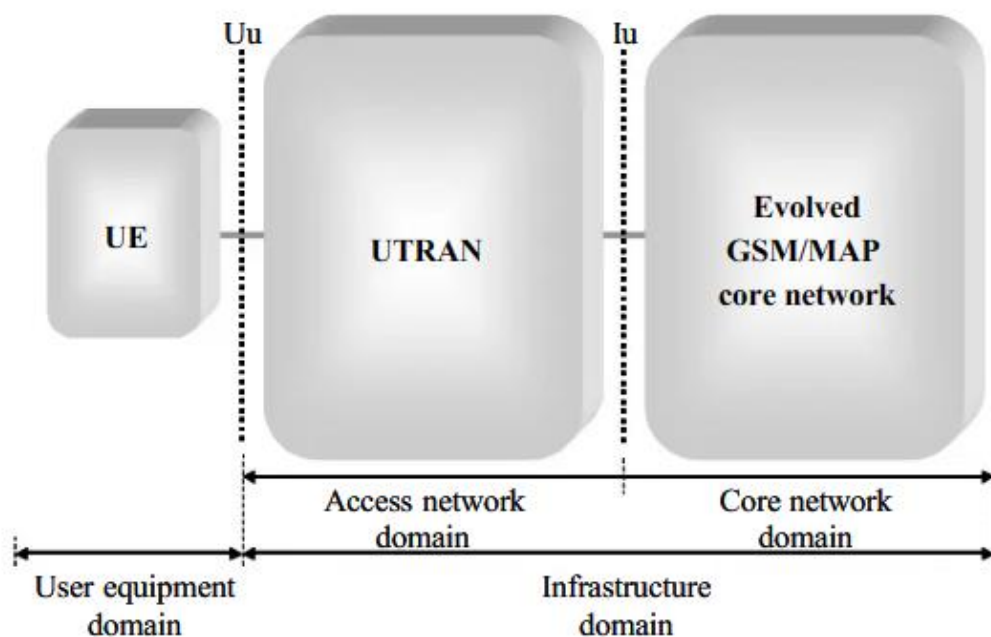
### I.2.3.1 UMTS :

L'UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) est un système de communication cellulaire mobile appartenant à la famille des systèmes 3G définis dans le cadre des IMT-2000 et construit sur la norme mondiale GSM. Malgré ses fonctionnalités accrues, l'UMTS n'a pas été créé pour remplacer le GSM mais pour agir comme une technologie complémentaire ce qui nous a permis d'utiliser les deux technologies sur les mêmes appareils.

L'UMTS offre un transfert de données plus rapide, des capacités cellulaires améliorées, une grande bande passante et une meilleure efficacité spectrale. Bien que l'UMTS utilise la technologie d'accès multiple par répartition en code (CDMA), il a une bande passante plus large que les autres systèmes CDMA par exemple CDMA2000 d'où l'appellation Wideband CDMA [6].

### I.2.3.2 Description générale de l'architecture d'un réseau UMTS :

L'architecture d'un réseau UMTS est constituée de plusieurs entités physiques regroupées en domaines selon leur rôle au sein du réseau. L'architecture d'un réseau UMTS est composée de trois domaines (Figure I.3). Les domaines UTRAN et CN font partie du domaine de l'infrastructure du réseau [5].



**Figure I.3 :** Architecture du réseau UMTS

➤ **UE :** nom donné à un terminal mobile au sein d'un réseau UMTS (similaire à une station mobile dans la terminologie GSM/GPRS). Il s'agit du vecteur permettant à un abonné d'accéder aux services UMTS via l'interface radio Uu.

➤ **L'UTRAN** : fournit à l'utilisateur les ressources physiques pour accéder au réseau central. Il assure la gestion des ressources radio et la fonction de contrôle d'admission et met en place les "tuyaux" (bearers) permettant à l'UE de communiquer avec le CN.

➤ **CN** : est chargé de la gestion des services de télécommunication pour chaque abonné UMTS. Il s'agit notamment de l'établissement, de la terminaison et de la modification des appels par circuits et par paquets terminés par l'UE et émis par l'UE, des mécanismes d'authentification de l'UE, de l'interconnexion avec les réseaux mobiles et fixes externes, de la facturation de l'utilisateur, etc.

### **I.2.3.3 Le HSPA**

High Speed Packet Access (HSPA) ou 3G+ est une technologie conçue pour augmenter la capacité de connectivité internet par rapport à l'UMTS. Elle fait référence aux améliorations apportées à la fois à la liaison descendante où à l'accès par paquets à la liaison descendante à grande vitesse (HSDPA) et à la liaison montante ou à l'accès par paquets à la liaison montante à grande vitesse (HSUPA).

Cependant, même avec l'introduction de HSPA, L'introduction du HSPA, l'évolution de l'UMTS n'a pas atteint son fin. HSPA+ apporte des améliorations significatives de HSPA.

### **I.2.4 Les réseaux mobiles quatrièmes générations (4 G) :**

Le réseau de quatrième génération (4G) fournit un débit de transmission de données de 20 Mbps tout en garantissant la qualité de service. L'un des principaux avantages de la 4G est sa capacité de gérer une grande quantité de trafic de données, ce qui lui rend idéale pour les zones densément peuplées. Plus d'efficacité spectrale est garantie en gérant la priorité de trafic en fonction du type d'application et de s'adapter rapidement aux différentes exigences.

La 4G vise à fournir des services mobiles à large bande beaucoup plus rapides que la 3G et facilite la diffusion en continu de contenus multimédias de haute performance ce qui permet de prendre en charge une large gamme d'applications, telles que le streaming vidéo, les jeux en ligne et la visioconférence comme il offre une plus grande largeur de bande aux appareils tels que les véhicules qui se déplacent à grande vitesse dans une zone de réseau [7].

#### **I.2.4.1 De l'UMTS au LTE :**

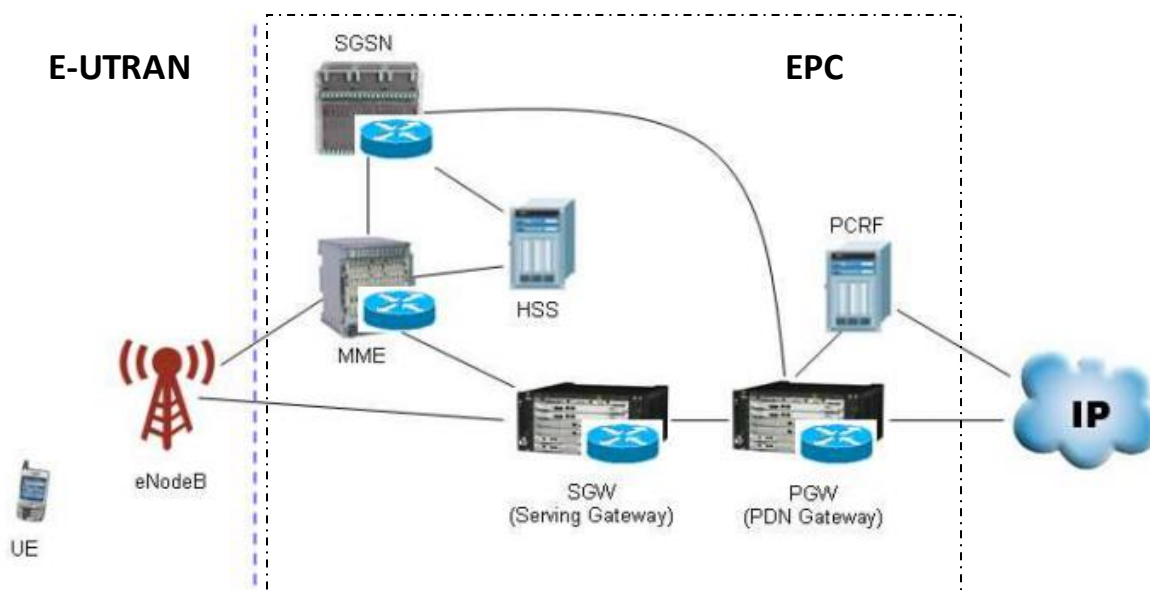
En 2004, le 3GPP a entamé une étude sur l'évolution à long terme de l'UMTS. L'objectif était de maintenir la compétitivité des systèmes de communication mobile du 3GPP sur une période de 10 ans et plus, en fournissant les débits de données élevés et les faibles temps de latence dont les futurs utilisateurs auront besoin.

Dans la nouvelle architecture, le cœur de paquets évolué (EPC) remplace directement le domaine à CP (commutation paquets) de l'UMTS et du GSM. Il n'y a pas d'équivalent au domaine de la CC (commutation circuits), ce qui permet au LTE d'être optimisé pour la fourniture de trafic de données, mais implique que les appels vocaux doivent être traités à l'aide d'autres techniques. Le réseau d'accès radio terrestre UMTS évolué (E-UTRAN) gère les communications radio de l'EPC avec le mobile donc un remplacement direct pour l'UTRAN. Le mobile est toujours appelé équipement de l'utilisateur, bien que son fonctionnement interne soit très différent de ce qu'il était auparavant.

La nouvelle architecture a été conçue dans le cadre de deux travaux du 3GPP, à savoir l'évolution de l'architecture du système (SAE), qui couvre le réseau cœur, et l'évolution à long terme (LTE), qui couvre le réseau d'accès radio, l'interface aérienne et la téléphonie mobile. L'ensemble du système est officiellement connu sous le nom de système de paquets évolué (EPS), alors que le sigle LTE fait uniquement référence à l'évolution de l'interface radio [8].

**I.2.4.2 Architecture du réseau LTE :**

L'architecture du réseau LTE est décrite sur la figure. Il est divisé en deux sous-réseaux: un cœur de réseau EPC et un réseau d'accès E-UTRAN.



**Figure I.4 :** Architecture du réseau LTE [9]

**a) Le réseau d'accès E-UTRAN :**

Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network est une interface radio conçu pour garanti la connexion d'appareils mobiles et l'accumulation des ressources radio avec le mobile et l'eNB, Sur une bande de fréquence (LTE). L'eNodeB c'est une station de base sans fil utilisée par les réseaux mobiles et cellulaires avec la technologie LTE qui permet aux UE de se connecter au réseau LTE. C'est l'unité

centrale qui assure la gestion de connexion, la compression et la décompression des en-têtes, le contrôle d'accès, l'ordonnancement, la sécurité, et le routage des données, etc.

### **b) Evolved Packet Core :**

Le cœur d'un réseau LTE est représenté par l'EPC (Evolved Packet Core). L'EPC est composé de plusieurs nœuds, dont les principaux sont MME, SGW, PGW et HSS. Ces nœuds offrent de diverses fonctionnalités telles que la gestion de la mobilité, l'authentification, la gestion des sessions, l'établissement de support de communication et l'application de différentes qualités de service. L'EPC a une architecture IP plate qui permet au réseau de gérer une grande quantité de trafic de données de manière efficace et rentable [10].

- L'entité **MME** signifie "Mobility Management Entity". La MME est responsable de l'authentification de l'UE. En outre, elle suit la localisation de l'UE. Elle sélectionne également le SGW et le PGW appropriés qui doivent desservir cet UE.
- L'entité **SGW** signifie "Serving Gateway" (passerelle de desserte). Afin d'éliminer tout effet sur les données de l'utilisateur lorsque l'UE se déplace entre différents eNodeB, le SGW fonctionne comme un point d'ancrage pour les données de l'utilisateur, lorsque l'UE se déplace entre différents eNodeB. En outre, le SGW transmet les données de l'utilisateur entre l'eNB et le PGW.
- L'entité **PGW** désigne la "Packet Data Network Gateway". Le PGW est le nœud qui relie le réseau LTE au PDN.
- L'entité **HSS** désigne le "Home Subscriber Server". Le HSS est la base des profils des abonnés qui stocke les informations d'abonnement des utilisateurs du réseau, comme le PDN auquel ils doivent pouvoir accéder et la qualité de service dont ils doivent bénéficier.
- L'entité **PCRF** signifie "Policy and Charging Rules Function" gère et contrôle le service 4 G. en gérant et en contrôlant de manière dynamique les sessions de données, ce qui permet l'émergence de nouveaux business models.
- L'entité **PDN** (Packet Data Network) est le réseau auquel l'UE souhaite se connecter.



### c) **La partie IMS (IP Multimedia Sub-system) :**

L'IMS représente une architecture basée sur des nouveaux concepts et technologie qui permet de prendre en charge des sessions applicatives en temps réel telles que la visioconférence ainsi que des sessions non temps réel. En outre, l'IMS est également appelé NGN (Next Generation Network).

Le cadre architectural de l'IMS se compose de 3 couches différentes services/application, contrôle et transport. Ces 3 couches fournissent des fonctions de gestion des signaux et du trafic pour les applications multimédia [11].

#### **I.2.4.3 Le réseau LTE-A**

Long-Term Evolution Advanced est une évolution du standard LTE. Elle utilise des techniques de traitements de signal avancées pour agréger plusieurs fréquences de spectre et augmenter ainsi la capacité du réseau pour fournir des performances améliorées par rapport au LTE. Cette amélioration offre des débits de données beaucoup plus élevés que la norme LTE allant jusqu'à 2 Gbit/s , soit près de 14 fois plus que LTE.

#### **I.2.5 Les réseaux mobiles de cinquième génération (5G) :**

La 5G est une technologie de communication mobile postérieure à 2020 qui offrira une connectivité élevée grâce à la technologie des commutateurs et des routeurs [12]. Ces dernières années, de nombreuses fondations de recherche et des partenaires industriels ont étudié le concept d'un réseau mobile de 5ème génération (5G) améliorant la capacité, la latence et la mobilité. [13]

Les principaux objectifs de la 5G seront d'améliorer la capacité des réseaux avec une meilleure couverture à moindre coût afin de satisfaire les besoins croissants des utilisateurs en matière de débits de données plus rapides et plus élevés. Les différents groupes de recherche travaillant sur les technologies futuristes de la 5G s'accordent sur un débit de pointe de 10 Gb/s pour les utilisateurs statiques, de 1 Gb/s pour les utilisateurs mobiles et d'au moins 100 Mb/s dans les zones urbaines.

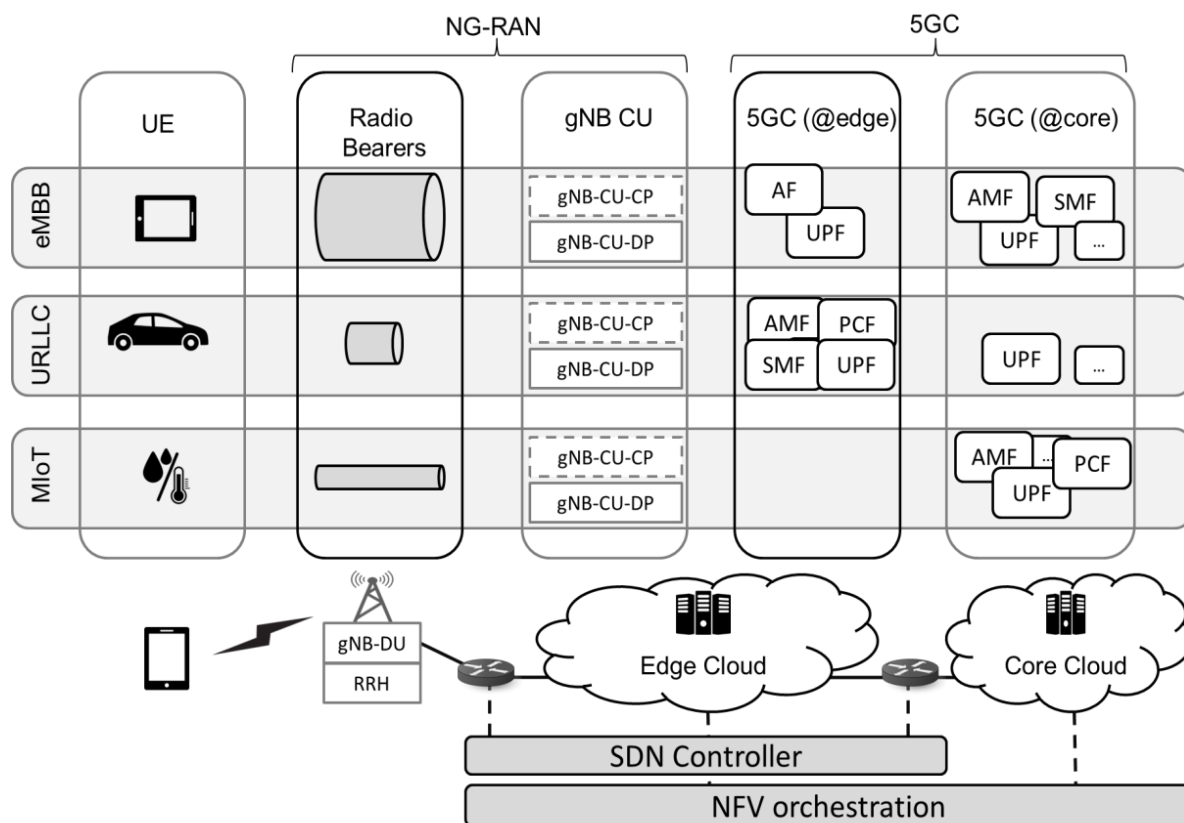


Figure I.5 : Architecture de la cinquième génération (5G).

### I.2.5.1 Réseau d'accès radio de nouvelle génération (NG-RAN) :

Le NG-RAN se compose d'un ensemble de stations de base 5G, appelées gNB, qui sont connectées au 5GC par l'intermédiaire d'un ensemble d'interfaces logiques. Comme dans le LTE, les gNB 62 Andrea Detti peuvent être interconnectées par l'interface Xn pour améliorer la mobilité (par exemple, le transfert) et les fonctions de gestion (par exemple, la gestion de la bande passante).

La fonctionnalité d'un gNB est parfois distribuée. Dans ce cas, l'architecture est constituée d'une unité centrale (gNB-CU) qui contrôle une ou plusieurs unités distribuées (gNB-DU) par l'intermédiaire de l'interface F1. Une unité distribuée est connectée à une tête radio distante (RRH), c'est-à-dire à l'émetteur-récepteur radio proprement dit. L'unité centrale est l'unité centrale est à nouveau divisée en deux parties, l'une pour les fonctions du plan de contrôle (gNB-CU-CP) et l'autre pour les fonctions du plan de donnée (gNB-CU-UP), conformément à l'approche de séparation des plans de contrôle et d'utilisation (CUPS) / SDN [14].

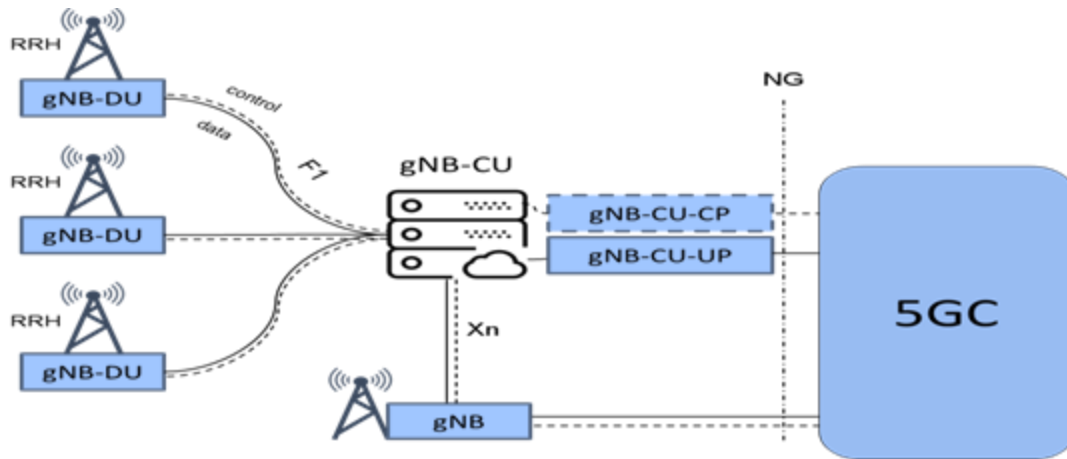


Figure I.6 : Architecture du NG-RAN.

### I.2.5.2 Réseau cœur 5G (5GC) :

Les principales fonctions de réseau (NF<sub>s</sub>) et leurs capacités, telles qu'elles sont définies aujourd'hui dans le processus de normalisation, sont les suivantes [15] [16] :

- Fonction Gestion des Accès et de la Mobilité (AMF) :** Elle assure la terminaison de la signalisation NAS, le chiffrement NAS est la protection de l'intégrité, la gestion des enregistrements, la gestion des connexions, la gestion de la mobilité, l'authentification et l'autorisation d'accès, la gestion du contexte de sécurité. L'AMF comprend également la fonction de sélection des tranches de réseau (NSSF) et sert de point de terminaison pour les interfaces CP RAN (N2).

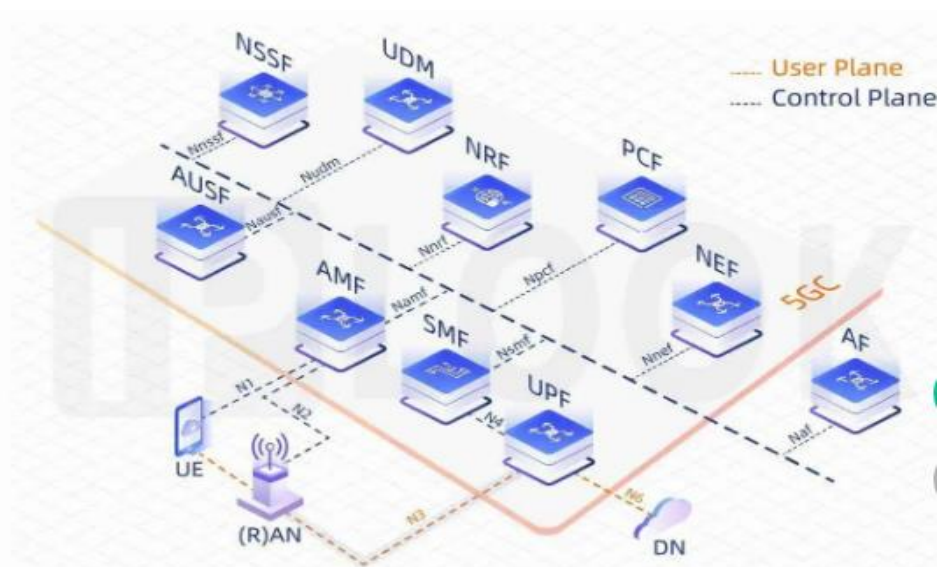


Figure I.7 : Architecture du 5G Cœur [6].

- **Fonction de gestion de session (SMF) :** Il assure la gestion de la session (établissement, modification et libération de la session), l'attribution et la gestion de l'adresse IP de l'UE, les fonctions DHCP, la fin de la signalisation NAS liée à la gestion de la session, la notification des données DL et la configuration de l'orientation du trafic pour l'UPF en vue d'un acheminement correct du trafic.
- **Fonction du plan utilisateur (UPF) :** Elle assure le routage et le transfert des paquets, l'inspection des paquets, le traitement de la qualité de service, agit comme point de session PDU externe d'interconnexion avec le réseau de données (DN) et constitue un point d'ancrage pour la mobilité intra- et inter-RAT.
- **Fonction d'exposition au réseau (NEF) :** Elle prend en charge l'exposition des capacités et des événements, la fourniture sécurisée d'informations d'une application externe au réseau 3GPP et la traduction des informations internes/externes. Elle agit comme une passerelle API qui permet aux utilisateurs externes, tels que les entreprises ou les opérateurs partenaires, de surveiller, de fournir et d'appliquer une politique d'application pour les utilisateurs à l'intérieur du réseau de l'opérateur. Ainsi, il  
Assure la sécurité lorsque des services ou des fonctions d'application (AF) accèdent aux nœuds 5GC.
- **Fonction de référentiel réseau (NRF) :** Fonction de référentiel réseau (NRF): La NRF découvre les instances de fonctions de réseau. Lorsqu'elle reçoit une demande de découverte d'une instance de fonction de réseau, elle fournit les instances de fonction de réseau découvertes. Elle n'est pas présente dans la 4G. Elle soutient les profils des instances de fonction de réseau (NF) et les services qu'elles prennent en charge dans le réseau et les interfaces basées sur les services, gestion et maintenance.
- **Fonction de contrôle des politiques (PCF) :** Elle met en œuvre un cadre politique unifié, en fournissant des règles politiques aux fonctions CP, accéder à l'information d'abonnement pour prendre des décisions stratégiques dans l'UDR. Elle fournit un cadre d'action qui intègre la gestion de la mobilité le découpage du réseau. Elle présente des similitudes avec la fonction PCRF de la 4G.
- **Gestion unifiée des données (UDM) :** Il stocke les données et les profils des abonnés et se charge de la génération des informations d'authentification et d'accord de clé (AKA), du

traitement de l'identification de l'utilisateur, de l'autorisation d'accès et de la gestion des abonnements.

- **Fonctions d'application (AF) :** La fonction d'application (FA) ressemble à un serveur d'application qui peut interagir avec les autres NF du plan de contrôle. Les fonctions d'application peuvent exister pour différents services d'application et peuvent appartenir à l'opérateur du réseau ou à des tiers de confiance. Pour les services considérés comme fiables par l'opérateur, l'AF peut accéder directement aux fonctions de réseau, tandis que les AF non fiables ou de tiers accèdent aux fonctions de réseau par l'intermédiaire du NEF.
  
- **Réseau de données (DN) :** Cette nouvelle représentation de l'architecture cœur 5G en termes de fonctions de réseau dans le plan de contrôle permet à d'autres fonctions de réseau autorisées d'accéder à leurs services. Les communications avec ces nœuds s'appuient sur des API basées sur le protocole HTTP, remplaçant plusieurs protocoles. Cela représente un changement majeur dans le monde des télécommunications. La conception générale et les avantages potentiels sont les suivants :
  - a. Architecture flexible et extensible.
  - b. Intégration plus facile avec des logiciels tiers grâce à des interfaces de programmation d'applications (API).
  - c. Amélioration de la qualité de service.

### I.3 Comparaison entre les 5 générations de communication :

	Intitulé	Norme	Services	Année	Débit (Mbit/s)
1G	Advanced Mobile Phone System	AMPS	Mobile telephony	1970/1980	2.4kps
	Total Access Communication System	TACS			
	Nordic Mobile Telephone	NMT			
2G	Global System for Mobile Communication	GSM900	Digital voice, short message	1990/2004	64 Kbps
	Digital Cellular System	DCS 1800			
	Global packet Radio Service	GPRS			
	Enhanced Data Rate for GSM Evolution	EDGE			
3G	Universal Mobile Telecommunication System	UMTS	Integrated high quality audio, video and data	2004/2010	144 Kbps - 2 Mbps
	High Speed Packet Access (HSDPA/HSUPA)	HSPA			
	High Speed Packet Access +	HSPA+			
4G	Longue Term Evolution	LTE	Dynamic information access, variable devices	2010/2015	100 Mbps - 1 Gbps
	Longue Term Evolution Advanced	LTE-Advanced			
5G	New Radio	NR	Dynamic information access, variable devices with AI capabilities	2015/2020	10Gbps

**Tableau I.2** Comparaison entre les 5 générations

## **I.4 Conclusion :**

Au cours de ce chapitre, nous avons abordé de manière globale les diverses générations de téléphones mobiles et leurs architectures de base et les principales caractéristiques de chaque génération. Nous avons entamé avec la première génération basée sur la technologie analogique, puis la deuxième génération où nous avons présenté le GSM qui est considéré comme la base de toutes les générations qui suit. Ensuite, nous avons présenté la 3ème génération avec ses différents norme (UMTS HSPA et HSPA+) et le passage vers le LTE qui a préparé l'introduction de la cinquième génération.

# Chapitre II :

## OFDM



## II.1 Introduction :

Il est important d'avoir une compréhension fondamentale du multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) car cette technologie est un élément de base pour de nombreuses normes telle que Digital Audio Broadcasting DAB, Digital Video Broadcasting terrestre DVB-T, Asynchronous Digital Subscriber Line ADSL comme elle est utilisé dans les différents normes des réseaux sans fils 802.11 le 802.16 WIMAX et HperLAN ainsi que les nouvelles générations de réseaux mobile LTE, 4G et la 5G [17]. Dans ce chapitre, nous présentons le principe de fonctionnement de cette technique, et nous détaillons son architecture de base qui sera utilisé par la suite dans notre simulation.

## II.2 Principe de fonctionnement :

Le principe de multiplexage orthogonal par répartition en fréquence OFDM est de diviser le signal numérique à transmettre en plusieurs flux de données parallèles et chaque flux est modulé sur une sous-porteuses distincte. Les sous-porteuses sont ensuite combinées pour former le signal composite OFDM, qui est transmis sur le canal de communication. L'OFDM utilise des porteuses orthogonales entre elles afin de garder les fréquences porteuses aussi proches que possible pour transmettre le maximum d'informations dans un segment de fréquence donné. L'orthogonalité permet aux signaux sur différentes porteuses de se chevaucher sans interférer les uns avec les autres.

La figure suivante illustre les principaux concepts d'un signal OFDM et l'interrelation entre les domaines fréquentiel et temporel.

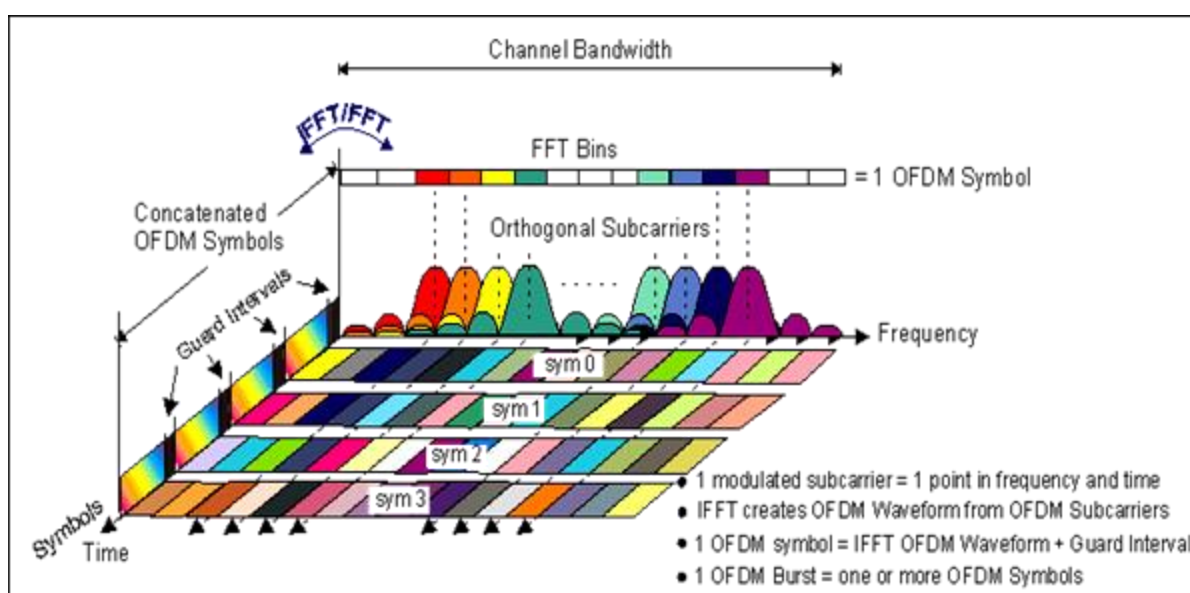


Figure II.1 : Représentation fréquentielle et temporelle du signal OFDM.

L'OFDM exploite un ensemble important de sous-porteuses orthogonales rapprochées qui se transmettent parallèlement. Les sous-porteuses sont modulées en utilisant des schémas de modulation numérique classiques tels que 16QAM QPSK, etc. à faible débit de symboles. Cependant, la combinaison de nombreuses sous-porteuses permet des débits de données similaires aux schémas de modulation à porteuse unique conventionnels dans des largeurs de bande équivalentes [18].

### II.3 Chaîne de transmission :

Comme tous modèles de transmission la chaîne OFDM se compose de trois grandes parties : émetteur, canal et récepteur et chaque partie contient plusieurs blocs qui seront expliqué dans la prochaine sous-section.

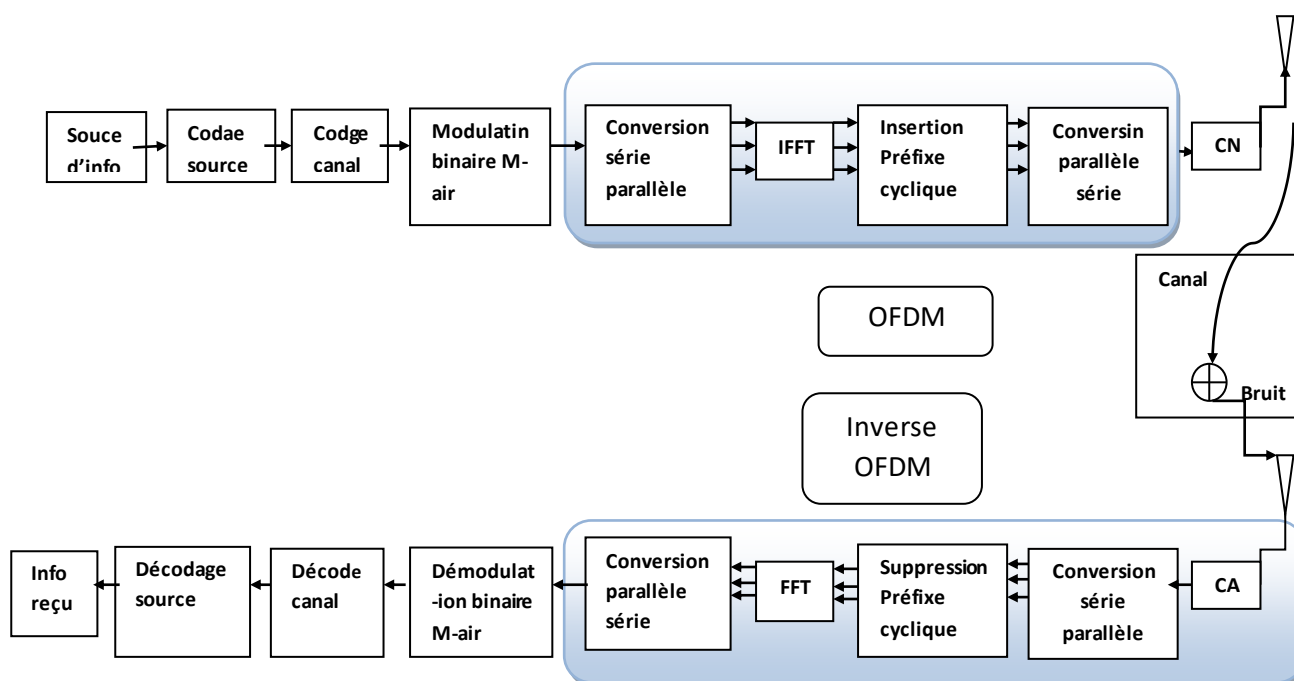


Figure II.2 : Diagramme en bloc de la chaîne de transmission OFDM

#### II.3.1 Emetteur :

**Source d'information :** au cours de cette étape, les capteurs jouent un rôle essentiel en transformant les informations physiques telles que les ondes sonores, lumineuses ou thermiques en signaux électriques. Ces signaux sont ensuite convertis en une séquence de bits d'information [19].

**Codage source :** La fonction de cette étape est de réduire la quantité de données en éliminant les informations redondantes en bits en les compressant.

**Codage canal :** Le principe du codage est d'ajouter des bits supplémentaires aux données à transmettre afin de protéger le signal transmis sur le canal contre les erreurs. Le récepteur utilise ces bits pour détecter et corriger les erreurs.

**Modulation M-air** : Consiste à modifier les propriétés d'un signal périodique appelé signal porteur  $S(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0)$  avec un signal de modulation qui contient des données à transférer. Ceci est fait par la modification d'un ou plusieurs paramètres qui sont l'amplitude, la phase et la fréquence.

Le signal modulé s'écrit comme suit : [20]

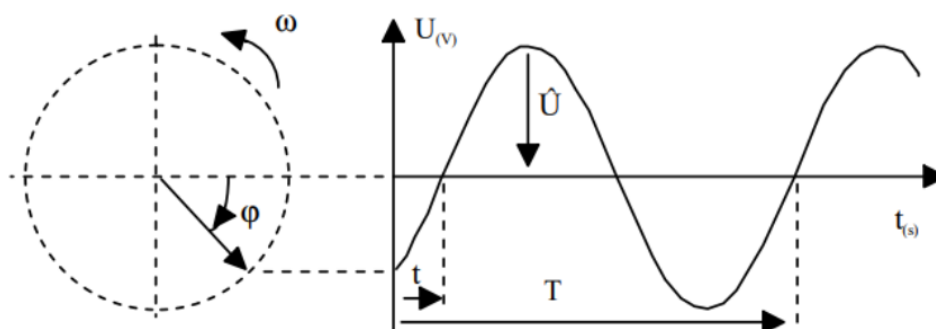
$$m(t) = \Re \sum_k x_k(t) e^{j2\pi f_0 t} \quad (\text{II.1})$$

Où :

$x_k(t)$ : Est l'enveloppe complexe correspond au kème symbole :

$$x_k(t) = \sum x_k \text{rect}(t - kT) \quad (\text{II.2})$$

Il existe plusieurs types de technique de modulation numérique disponible en fonction de l'exigence



**Figure II.3:** représentation temporelle et vectorielle [21].

- On variant  $\hat{U}$  c'est une modulation par déplacement d'amplitude (**Amplitude Shift Keying (ASK)**).
- On variant  $f$  (dans la pulsation  $\omega$ ) c'est une modulation par déplacement de fréquence (**Frequency Shift Keying (FSK)**).
- On variant  $\varphi$  c'est une modulation par déplacement de phase (**Phase Shift Keying (PSK)**).
- **QAM** (Quadrature Amplitude Modulation) est obtenue en variant l'amplitude de la porteuse et d'une onde en quadrature.

**Modulation OFDM** : (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est une technique de modulation utilisée dans les systèmes de communication sans fil pour transmettre des données sur plusieurs sous-porteuses orthogonales. Au lieu d'utiliser une seule porteuse pour transmettre l'ensemble des données,

l'OFDM divise le signal en plusieurs sous-porteuses, chacune transportant une partie des données. Chaque sous-porteuse est modulée indépendamment à une fréquence spécifique, puis les signaux modulés sont combinés pour former le signal OFDM complet.

À cette étape les données subissent à une conversion série/parallèle ensuite à une transformée de Fourier pour passer du temporelle au fréquentielle.

La IFFT est définie par :

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{\frac{j2\pi kn}{N}}, \quad 1 \leq n \leq N \quad (\text{II.3})$$

**Préfixe cyclique :** Dans les systèmes OFDM la propagation multi-trajets provoque une interférence entre symbole et pour éviter ce problème on utilise la bande de garde, le matériel ne permet pas d'espace vide car il nécessite d'envoyer des signaux en continu. Donc on utilise le préfixe cyclique qui est réalisé par l'ajoute d'un intervalle entre chaque symbole OFDM utile à la sortie de l'IFFT à l'émission, et dans la réception le préfixe cyclique est supprimé avant d'effectuer la FFT. Le préfixe cyclique est une copie de l'extrémité du symbole OFDM situé au début de ce symbole.

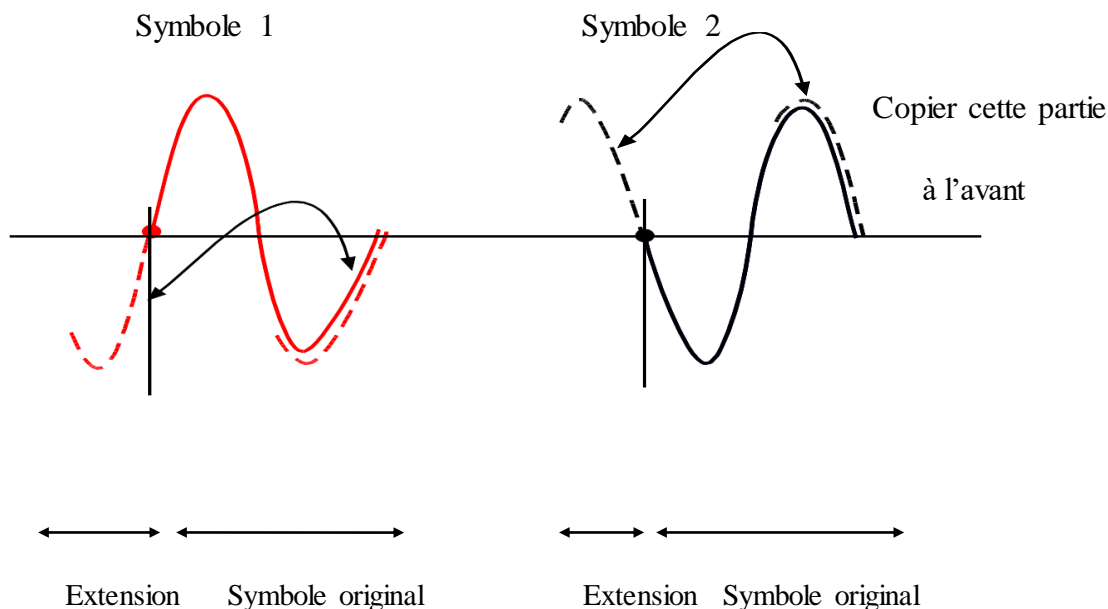


Figure II.4 : Préfixe cyclique

### II.3.2 Canal de transmission :

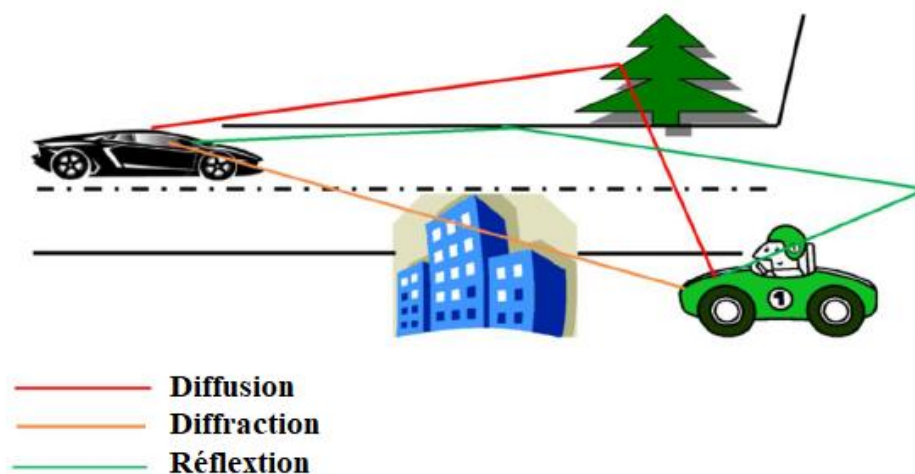
Un canal de transmission est un support physique ou une voie de communication qui permet de transmettre les informations entre l'émetteur et le récepteur. Il peut être un câble coaxial, une fibre

optique, une liaison hertzienne ou bien une liaison sans fils tel qu'il est dans les réseaux cellulaires. Dans cette section, nous aborderons les canaux de communication sans fil en exposons les diverses caractéristiques de ces canaux.

Le type de canal de propagation traversé par un signal peut avoir un impact significatif sur la force, la qualité et la fiabilité du signal. Voici quelques modèles [22] :

- Canal en visibilité direct (LOS) : ce type se produit lorsqu'il existe un trajet direct de l'émetteur vers le récepteur sans aucune obstruction.
- Canal sans visibilité directe **NLOS** (non-line-of-sight) : ce type de propagation produit lorsqu'il y a des obstacles entre l'émetteur et le récepteur.
- Canal à trajets multiples : ce type de propagation se produit lorsqu'un signal atteint le récepteur via plusieurs voies en raison de réflexions, diffraction et diffusion.
- Fading Channel : ce type de propagation se produit en raison de changement dans l'environnement de propagation, tels que les objets en mouvement.

Dans notre étude on s'intéresse au canal à trajet multiples. Les voies de propagation sont à trajets multiples en raison d'obstacles autour de l'émetteur et du récepteur (figure II.5). Dans cette situation, le récepteur reçoit plusieurs copies du signal transmis qui ont emprunté différents chemins, présentant des atténuations, des déphasages et des retards variés (en raison de la longueur des chemins).



**Figure II.5** : propagation par trajets multiples.

La propagation multi-trajets dans les communications sans fil repose sur trois mécanismes fondamentaux. D'abord la réflexion, qui entraîne des interférences constructives ou destructives près du récepteur lorsque le signal frappe une grande surface sans frottement qui pourrait être bloquée, comme une structure artificielle, et est réfléchi. Le deuxième c'est la diffraction, qui se manifeste

lorsque le trajet est obstrué sur une grande partie de sa circonférence par rapport à la longueur d'onde du signal d'entrée. La troisième c'est la diffusion, qui se manifeste lorsque le signal atteint le bord d'une structure artificielle, entraînant ainsi une dispersion de l'énergie du signal dans diverses directions [23].

### II.3.2.1 Canal de propagation par trajets multiples :

Il existe de nombreux modèles mathématiques de canaux d'évanouissement décrits dans la littérature, qui décrivent les caractéristiques statistiques. Parmi les distributions les plus couramment utilisées figurent la distribution de Rayleigh et la distribution de Rice.

#### a. Distribution de Rayleigh et Rayleigh fading :

Les retards associés aux différents chemins de signaux dans un canal à évanouissement par trajets multiples changent de manière imprévisible et ne peuvent être caractérisés que statistiquement. Lorsqu'il existe un grand nombre de chemins, le théorème central limite peut être appliqué pour modéliser la réponse impulsionnelle variable dans le temps du canal comme un processus aléatoire gaussien à valeur complexe. Lorsque la réponse impulsionnelle est modélisée comme un processus gaussien à valeur complexe de moyenne nulle, on dit que le canal est un canal à évanouissement de Rayleigh [24].

Ici, le modèle d'évanouissement de Rayleigh est supposé n'avoir que deux composantes multivoies  $X(t)$  et  $Y(t)$ . En additionnant simplement les deux variables aléatoires gaussiennes et en prenant la racine carrée (enveloppe), on obtient un processus distribué de Rayleigh à une seule prise. La phase d'une telle variable aléatoire suit une distribution uniforme.

Considérons deux variables aléatoires gaussiennes de moyenne nulle et de même variance  $X \sim (0, \sigma^2)$  et  $Y \sim (0, \sigma^2)$ .

Définissons une variable aléatoire gaussienne complexe :

$$Z = X + jY \quad (\text{II.4})$$

L'enveloppe de la variable aléatoire complexe est donnée par :

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (\text{II.5})$$

Et la phase est donnée par :

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{Y}{X} \right) \quad (\text{II.6})$$

L'enveloppe suit la distribution de Rayleigh et la phase sera uniformément distribuée. La fonction de densité de probabilité (distribution de Rayleigh) de la réponse en amplitude mentionnée ci-dessus est donnée par :

$$p_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\left(\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)}, \quad r \geq 0 \quad (\text{II.7})$$

$\sigma$ : est l'écart type de la partie réelle ou imaginaire.

### **b. Distribution de Rice et Rice fading :**

Le modèle de l'évanouissement de Rician est similaire à celui de l'évanouissement de Rayleigh, sauf que dans l'évanouissement de Rician, une forte composante dominante est présente. Cette composante dominante peut par exemple être line-of-sight wave. Cette composante est modélisée à l'aide de deux variables aléatoires gaussiennes, l'une à moyenne nulle et l'autre à moyenne non nulle.

Considérons deux variables aléatoires gaussiennes  $X \sim (m_1, \sigma^2)$  et  $Y \sim (m_2, \sigma^2)$ . Ici,  $m_1$  et  $m_2$  sont les moyennes des distributions et  $\sigma^2$  est la variance. [25]

Puisque les deux variables  $X$  et  $Y$  ont des "moyennes" différentes, un paramètre de non centralité (indiquant la moyenne non centrale) est défini :

$$s = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} \quad (\text{II.8})$$

Le paramètre de non centralité (le déséquilibre des moyennes) est causé par la présence d'un chemin dominant dans un environnement d'évanouissement de Rice. Pour cette raison, le facteur  $K$  de Rice - représentant le rapport entre la puissance de la Line-Of-Sight (LOS) et la puissance de Non-Line-Of-Sight (NLOS) est défini dans un tel scénario.

$$k = \frac{\text{Power of LOS component}}{\text{Power of NLOS component}} \quad (\text{II.9})$$

Statistiquement, cela peut être représenté comme la puissance dans l'enveloppe délavée qui a été produite par les moyens de  $X$  et  $Y$ .

$$K = \frac{m_1^2 + m_2^2}{2\sigma^2} = \frac{s^2}{2\sigma^2} \quad (\text{II.10})$$

L'enveloppe suit la distribution de Rician, dont la PDF est donnée par :

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\left(\frac{r^2+s^2}{2\sigma^2}\right)} I_0\left(\frac{sr}{\sigma^2}\right), \quad r \text{ et } s \geq 0 \quad (\text{II.11})$$

Où,  $I_0(x)$  est la fonction de Bessel modifiée de première espèce d'ordre 0.

### II.3.2.2 Canal à Bruit blanc additif gaussien (AWGN)

Le canal Le canal BBAG est considéré comme un canal de radio mobile classique et simple. Il est caractérisé par la présence d'un bruit blanc additif qui résulte de l'addition d'un signal émis et d'un bruit blanc. Ce type de canal est souvent utilisé dans les systèmes mobiles statiques où le signal émis n'est pas altéré, à l'exception du bruit. Le bruit additif est modélisé à l'aide d'un procédé aléatoire, blanc, gaussien et centré, et est indépendant du signal. La densité spectrale bilatérale de puissance du bruit est constante [26] [27], ce qui permet de considérer que le canal est sans distorsion.

$$y(t) = A x(t) + b(t) \quad (\text{II.12})$$

Le signal modulé est représenté par  $x(t)$  et l'affaiblissement général sur le trajet est noté  $A$ , supposé constant dans le temps. Le bruit présent dans le système est quant à lui modélisé par un processus aléatoire gaussien  $b(t)$ , également appelé bruit blanc Gaussien AWGN. Ce bruit est caractérisé par une moyenne nulle, une variance  $\sigma_b^2$  et une densité spectrale de puissance bilatérale  $N_0/2$ . La densité de probabilité donnée par :

$$p_{Y/X} \left( \frac{y}{x} \right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_b^2}} e^{-\frac{(y-x)^2}{2\sigma_b^2}} \quad (\text{II.13})$$

Et la puissance de bruit moyenne est écrite comme suit :

$$P_n = \frac{E[x^2(t)] + E[y^2(t)]}{2} = \frac{\sigma_b^2 + \sigma_b^2}{2} = \sigma_b^2 \quad (\text{II.14})$$

### II.3.2.3 Canal de propagation à bruit impulsif

Avec l'augmentation des sources de rayonnements non naturelles, le bruit impulsif est de plus en plus important durant la transmission du signal. Contrairement au bruit de fond d'origine thermique, qui est naturel et peut être représenté par une fonction aléatoire gaussienne et stationnaire, le bruit mesuré résultant de sources non naturelles est non stationnaire et non gaussien. C'est pourquoi il est souvent désigné sous le terme de "bruit impulsif".

Le bruit impulsif se manifeste dans divers phénomènes de propagation tels que le bruit reçu par un sonar lors de la propagation sous-marine, le bruit rencontré lors de la réception d'un signal radar en raison des échos multiples, ainsi que les perturbations électromagnétiques causées par les orages. En outre, le bruit impulsif peut également être généré par des manœuvres aléatoires d'appareils électriques tels que les redresseurs commandés, les moteurs électriques et les appareils de commutation, qui sont connus pour créer des bruits impulsifs dans les environnements domestiques ou en intérieur [28].



Dans la littérature récente, plusieurs modèles ont été employés pour simuler des phénomènes non gaussiens, qui étaient initialement étudiés par Middleton. Au début, le modèle de Bernoulli-Gaussien a été utilisé pour modéliser la séquence de bruit impulsif, où l'amplitude est décrite par une distribution gaussienne et le taux d'occurrence des impulsions est modélisé par une distribution de Bernoulli [24]. Cependant, les chercheurs ont remis en question la pertinence de cette modélisation du bruit avec une distribution gaussienne en raison de sa grande variabilité. Par conséquent, il est plus approprié de modéliser ce bruit avec une distribution qui n'admet pas nécessairement une variance finie plutôt qu'avec une distribution gaussienne. Les distributions alpha-stables sont apparues comme une alternative aux distributions gaussiennes à variance infinie, offrant ainsi une modélisation plus précise des environnements d'interférence impulsive. Ils appartiennent à une classe riche en probabilités et en lois de Gauss de Cauchy et de Lévy.

### a. Middleton classe A :

Dans cette section, nous abordons en détail le modèle de bruit de classe A, qui est largement utilisé dans la modélisation du rayonnement impulsif et a fait l'objet de nombreuses études dans la littérature [29]. Ce modèle définit la fonction de densité de probabilité (PDF) d'un échantillon de bruit de la manière suivante [30] :

$$F_m(n_k) = \sum_{m=0}^{\infty} P_m N(n_k; 0; \sigma_m^2) \quad (\text{II.15})$$

Où  $N(n_k; 0; \sigma^2 m)$  est le PDF gaussien avec moyenne  $\mu=0$  et écart de  $\sigma^2 m$ .

$$p_m = \frac{A^m e^{-A}}{m!} \quad (\text{II.16})$$

$m$  : est le nombre d'interférences actives et  $A$  représenté la densité des impulsions dans une période d'observation donnée par la relation suivante :

$$A = \frac{(\eta \Gamma)}{T_0} \quad (\text{II.17})$$

Où  $T_0$  est le temps unitaire et il est égal à un,  $\eta$  représente le nombre moyen d'impulsions par seconde et  $\Gamma$  est la moyenne durée de chaque impulsion, où toutes les impulsions sont prises ont la même durée [31].

Le paramètre  $A$  décrit le bruit comme suit : Quand  $A$  diminue le bruit devient plus impulsif, si non le bruit tend vers AWGN.

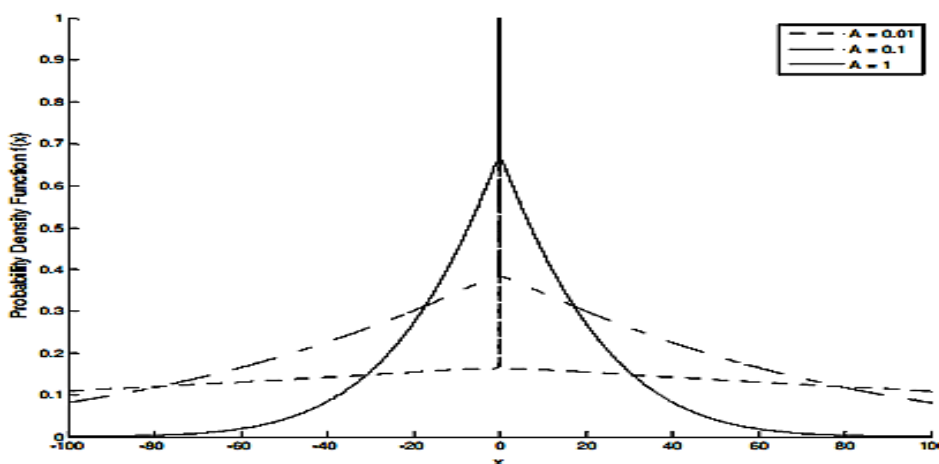


Figure II.6 : Bruit pour différentes valeurs de A et  $\Gamma = 0.001$

En revanche,  $\sigma_m$  peut être écrit comme :

$$\sigma_m = \sigma_2 \frac{\frac{m}{A} + \Gamma}{1 + \Gamma} \tag{II.18}$$

Avec :

$$\sigma = \sigma_G^2 + \sigma_i^2 \tag{II.19}$$

Est la puissance sonore totale a deux composantes : une gaussienne variance  $\sigma_G^2$  et les autres variations de bruit impulsif  $\sigma_i^2$  et :

$$\Gamma = \frac{\sigma^2 G}{\sigma_i^2} \tag{II.20}$$

Est le rapport de puissance de bruit gaussien-impulsif. Il peut être observé que pour les valeurs basses de, la composante impulsive et pour les valeurs supérieures, le composant AWGN prédomine [32].

**b. Bernoulli-Gaussien :**

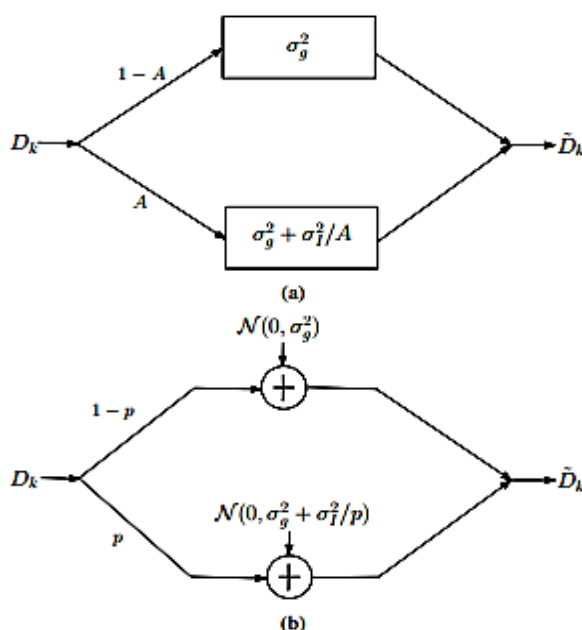
Après avoir présenté le modèle de bruit de classe A de Middleton au paragraphe précédent, nous allons maintenant aborder un autre modèle couramment utilisé appelé modèle de bruit Bernoulli-Gaussien, qui est mentionné dans [33], [26]. Ce modèle représente la somme de deux fichiers PDF gaussiens pondérés par une distribution Bernoulli. Dans le cadre d'un modèle Bernoulli-Gaussien pour un processus de bruit impulsif, le temps d'apparition aléatoire des impulsions est modélisé par un processus binaire de Bernoulli  $b(m)$ , tandis que l'amplitude des impulsions est modélisée par un

processus gaussien  $n(m)$ . Un processus de Bernoulli  $b(m)$  est un processus binaire ce qui amène la valeur 1 avec une probabilité  $p$  et la valeur 0 avec une probabilité de  $1-p$ .

Ce modèle de bruit est décrit par le PDF suivant :

$$FBG(n_k) = (1 - p)N(n_k ; 0 ; \sigma_G^2) + p N(n_k ; 0 ; \sigma_G^2 + \sigma_I^2) \tag{II.21}$$

Pour démontrer les similarités entre le bruit Bernoulli-gaussien (b) et le modèle de bruit de classe A de Middleton (a), nous utilisons les modèles de canaux illustrés dans la figure II.7. Ces deux modèles présentent des similitudes marquantes, à l'exception du fait que, dans le cas du bruit Bernoulli-gaussien (b), l'échantillon de bruit est ajouté aux données symbolisées par  $D(k)$  dans les deux états, ce qui diffère du modèle de bruit de classe A (a).



**Figure II.7 :** (a) deux modèles de bruit de classe d'état et  
(b) modèle de bruit Bernoulli-gaussien

**c. Alpha ( $\alpha$ )distribution stable :**

En plus de deux modèles discutés précédemment (le Middleton Classe A et le Bernoulli-Gaussien), un autre modèle de bruit impulsif qui de plus en plus utilisé dans la littérature, est la distribution symétrique  $\alpha$ -stable (SaS) [34][35]. Nous considérons une variable  $X$  qui suit une loi  $\alpha$ -stable de paramètres :  $\alpha, \beta, \gamma$  et  $\delta$  ;  $X \sim Sa(\beta, \gamma, \delta)$  si et seulement si sa caractéristique est de la forme :

$$\Psi_\alpha(t) = \exp\{-\gamma^\alpha |t|^\alpha [1 + i \beta \text{sing}(t) \omega(t, \alpha)] + i\delta t\} \tag{II.22}$$

Avec :

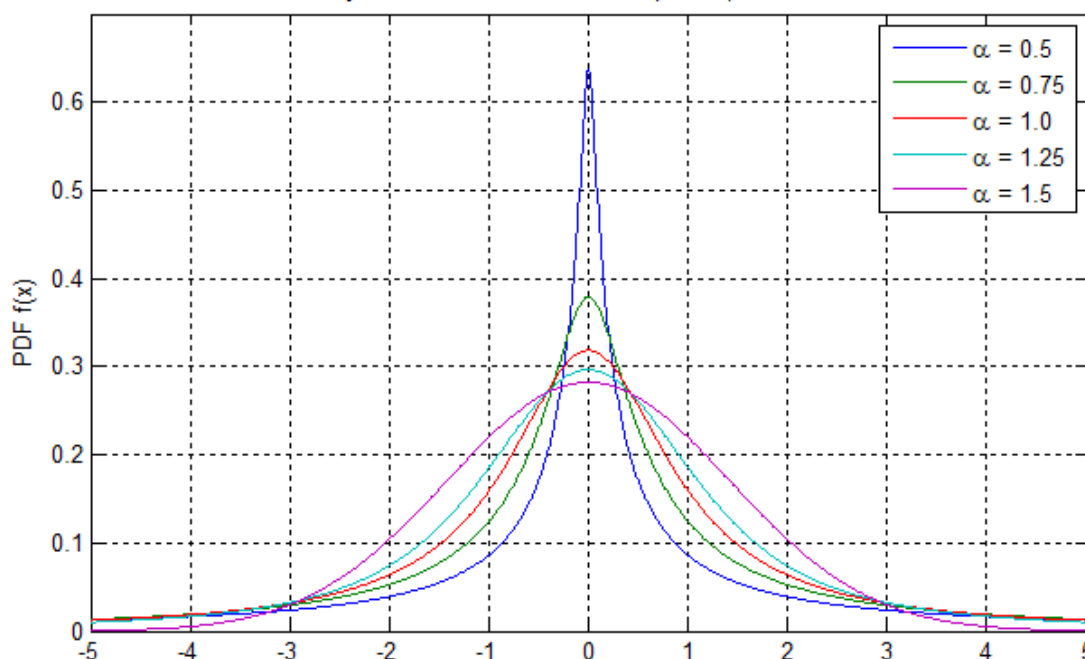
$$\omega(t, \alpha) = \begin{cases} -\tan\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right) & \text{si } \alpha \neq 1 \\ \frac{2}{\pi} \ln |t| & \text{si } \alpha = 1 \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Et :

$$\text{Sign}(t) = \begin{cases} 1 & t > 0 \\ 0 & t = 0 \\ -1 & t < 0 \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Une distribution stable est définie par quatre paramètres : l'exposant caractéristique ( $\alpha$ ), qui contrôle la lourdeur de la queue et peut prendre n'importe quelle valeur dans l'intervalle  $\alpha \in ]0; 2]$ , le paramètre d'échelle  $\gamma > 0$ , le paramètre d'emplacement ( $\delta$ ), et le paramètre de symétrie ( $\beta$ ), qui ne peut prendre des valeurs que dans certain intervalle  $\beta \in [-1; 1]$ .

Figure II.8 montre les PDF de la  $\alpha$ -modèles de distribution stables pour différentes valeurs de  $\alpha$  tandis que les autres paramètres sont maintenus fixes ( $\beta = 0$ ;  $\gamma = 1$  et  $\delta = 0$ ).



**Figure II.8 :** distributions de différentes valeurs de  $\alpha$  tandis que  $\beta = 0$  et  $\gamma = 1$  et  $\delta = 0$

Le bruit impulsif ne possède pas de formule explicite pour sa fonction de densité de probabilité (PDF), sauf dans certains cas particuliers de la sous-classe de distribution symétrique  $\alpha$ -stable (S $\alpha$ S) caractérisée par  $\beta = 0$ , [36]. Ces cas particuliers sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Distribution	$\alpha$	Equation
Gaussien	2	$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\delta)^2}{2\sigma^2}\right)$
Cauchy	1	$f(x) = \frac{\gamma}{\pi} [\gamma^2 + (x - \delta)^2]$
Levy	0.5	$f(x) = \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}} \frac{1}{(x - \delta)^{3/2}} \exp\left(-\frac{\gamma}{2(x - \delta)}\right) \delta < x < \infty$

**Table II.1** : les équations des cas particuliers de  $\alpha$ -stable

D'autre part il est possible d'approcher par la transformation inverse de la fonction caractéristique le PFD d'une loi stable en dehors d'une intégrale écrite comme suit :

$$f_X(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-itx} \psi_\alpha(t) dt \quad (\text{II.25})$$

### II.3.3 Récepteur :

La fonction de la partie réceptrice consiste à récupérer le message qui a été transmis par l'émetteur à travers le canal. La chaîne de réception est composée de différents blocs qui assurent des fonctions inverses à celles effectuées lors de l'émission. Le but est de traiter le signal de manière à ce que le message soit correctement reçu et compris par le destinataire

- **Antenne de réception** : L'antenne de réception joue un rôle crucial dans la transformation de l'onde électromagnétique en un signal électrique.
- **Suppression du préfixe cyclique** : ou remplissage de zéros
- **Démodulation OFDM** : est réalisée en utilisant une transformée de Fourier rapide (FFT), qui permet de réaliser l'opération inverse de la modulation.
- **Démodulation M-aire/binaire** : Les symboles reçus sont convertis en paquets de bits.
- **Décodage canal et de décodage source** : sont effectuées pour éliminer les redondances ajoutées lors de l'émission et corriger certaines erreurs. Cette étape permet également de décompresser les données en réintroduisant les redondances supprimées lors du codage source à l'émission.

## **II.4 Conclusion :**

Le présent chapitre a couvert la technique de modulation OFDM, son principe de fonctionnement ainsi que les blocs clés qui composent la chaîne de traitement. Nous avons également examiné les différents types de canaux de transmission trouvée dans la littérature. Comme nous avons introduit le bruit impulsif. Cette chaîne sera utilisée dans la suite de notre travail.

Chapitre III :  
Apprentissage en  
profondeur

### III.1 Introduction :

L'apprentissage profond (Deep Learning) est une branche de l'apprentissage automatique qui se focalise sur l'utilisation de réseaux de neurones artificiels. Cette méthode d'apprentissage est extrêmement puissante, car elle repose sur des modèles informatiques composés de multiples couches de traitement, permettant ainsi d'apprendre des représentations de données à différents niveaux d'abstraction.

L'apprentissage automatique est un sous-domaine de l'intelligence artificielle (IA) qui consiste à rendre les machines aussi intelligentes que le cerveau humain. Ce chapitre fournit une description de l'apprentissage profond et les réseaux de neurones [37].

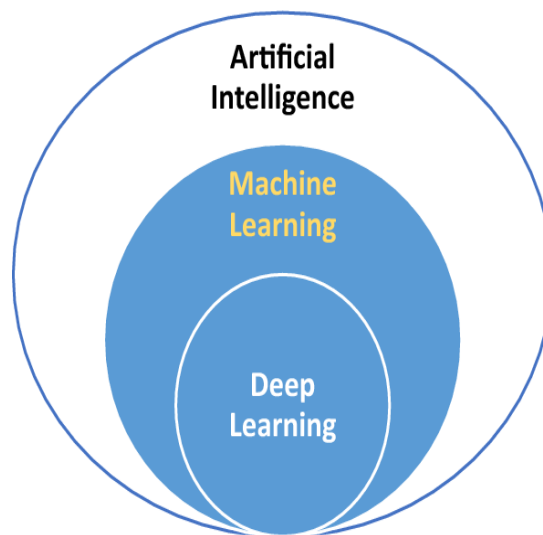


Figure III.1 : Diagramme de Venn.

### III.2 Les réseaux neuronaux :

Les réseaux de neurones, également appelés réseaux de neurones artificiels (Artificial Neural Networks) ou réseaux de neurones simulés (Simulated Neural Networks), faisant partie intégrante de l'apprentissage automatique jouant un rôle fondamental dans les algorithmes d'apprentissage profond. Ils tirent leur nom et leur structure du cerveau humain, imitant les modèles de communication observés entre les neurones biologiques.

#### III.2.1 Présentation sommaire du neurone biologique :

Le neurone biologique est une cellule spécialisée du système nerveux qui est responsable de la transmission de l'information électrochimique dans le cerveau et d'autres parties du corps. Il se compose de plusieurs composants clés :



- a. Le corps cellulaire : également appelé soma, c'est la partie centrale du neurone. Il contient le noyau, qui abrite l'ADN et les mécanismes de régulation génétique.
- b. Les dendrites : ce sont de fines branches ramifiées qui s'étendent à partir du corps cellulaire. Les dendrites reçoivent les signaux électriques et chimiques provenant d'autres neurones ou de cellules sensorielles.
- c. L'axone : c'est une longue extension unique du neurone qui transmet les signaux électriques vers d'autres neurones ou cellules cibles. L'axone est entouré d'une gaine de myéline, qui agit comme un isolant et facilite la transmission rapide des signaux.
- d. Les synapses : ce sont des points de connexion spécialisés entre les neurones. Les signaux électriques qui voyagent le long de l'axone sont convertis en signaux chimiques au niveau des synapses. Ces signaux chimiques, appelés neurotransmetteurs, sont libérés dans l'espace synaptique et se lient aux récepteurs des dendrites des neurones adjacents, permettant ainsi la transmission de l'information d'un neurone à l'autre



Figure III.2 : le cerveau humain

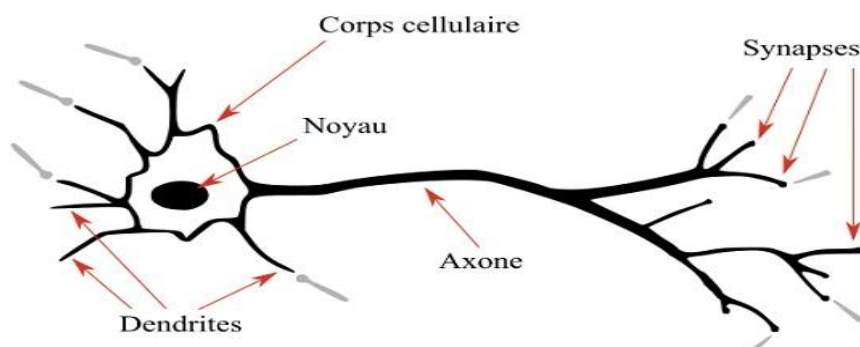


Figure III.3 : Neurone biologique

L'activité électrique dans les neurones est régie par le potentiel d'action, une brève impulsion électrique qui se propage le long de l'axone lorsque le neurone est activé. Les signaux électriques sont convertis en signaux chimiques aux synapses et se propagent de neurone en neurone, permettant ainsi la communication et le traitement de l'information dans le système nerveux.

Le fonctionnement complexe et interconnecté des neurones biologiques permet des processus cognitifs tels que la perception, l'apprentissage, la mémoire et le contrôle moteur, formant ainsi la base de notre capacité à penser, ressentir et interagir avec notre environnement.

### **III.2.2 Les réseaux neuronaux artificiels :**

Les réseaux neuronaux artificiels sont des modèles mathématiques inspirés des neurones biologiques, conçus pour effectuer des tâches d'apprentissage automatique et de traitement de l'information. Ces réseaux sont composés de nœuds artificiels, également appelés neurones artificiels, qui sont interconnectés pour former une structure en couches.

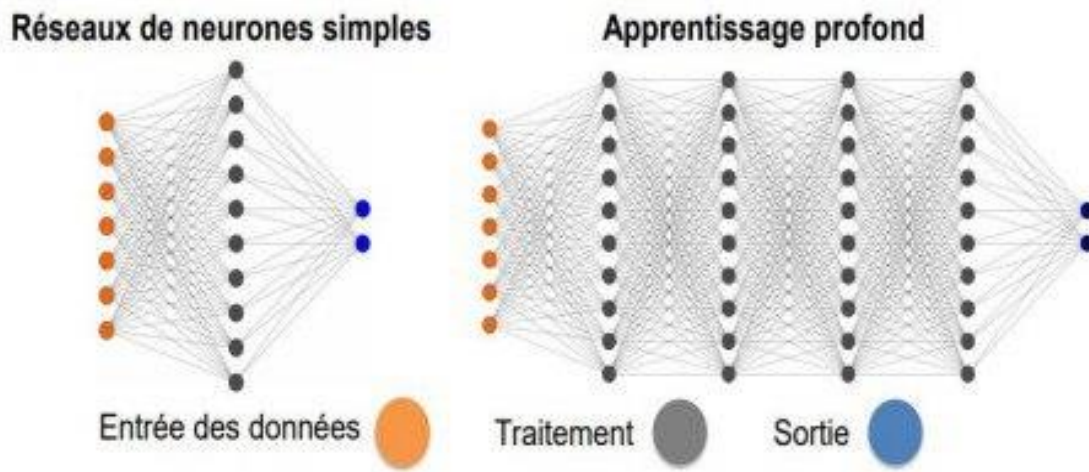
Dans un réseau neuronal artificiel, les informations sont transmises à travers les connexions pondérées entre les neurones. Chaque neurone reçoit une entrée, applique une fonction d'activation à cette entrée pondérée par les connexions, et produit une sortie qui est ensuite transmise aux neurones de la couche suivante. Les poids des connexions entre les neurones sont ajustés pendant la phase d'apprentissage afin que le réseau puisse apprendre à effectuer des tâches spécifiques.

L'apprentissage d'un réseau neuronal artificiel se fait généralement par rétropropagation du gradient, une méthode qui consiste à comparer les sorties prédites du réseau avec les sorties attendues, puis à ajuster les poids des connexions pour minimiser l'erreur. Ce processus itératif est effectué sur un ensemble de données d'apprentissage jusqu'à ce que le réseau atteigne une performance satisfaisante.

Les réseaux neuronaux artificiels sont utilisés dans une variété de domaines, tels que la vision par ordinateur, le traitement du langage naturel, la reconnaissance de formes, la prédiction de séries temporelles, la recommandation, etc. Ils sont particulièrement efficaces pour résoudre des problèmes complexes et non linéaires, et peuvent apprendre à extraire des caractéristiques pertinentes directement à partir des données.

Des architectures spécifiques de réseaux neuronaux artificiels ont été développées pour différentes tâches, notamment les réseaux de neurones convolutifs (CNN) pour l'analyse d'images, les réseaux de neurones récurrents (RNN) pour le traitement de séquences, et les réseaux de neurones de type transformé pour le traitement du langage naturel. Ces réseaux neuronaux artificiels ont permis des avancées significatives dans de nombreux domaines et continuent de repousser les limites de l'intelligence artificielle.

La structure d'un réseau neuronal artificiel se compose généralement d'une entrée (input layer), d'une sortie (output layer) et d'une ou plusieurs couches cachées. Chaque couche d'un réseau de neurone artificiels est constituée de plusieurs neurones. Chaque neurone est relié à tous les autres neurones des couches adjacentes. Autrement dit, il prend les sorties des couches précédentes comme entrées et les combine linéairement pour produire le stimulus qui est envoyé à la fonction d'activation [38].



**Figure III.4 :** l'architecture d'un Réseau de neurones

Neurones biologiques	Neurones artificiels
Synapses	Connections pondérés
Axons	Sorties
Dendrites	Entrées
Sommateur	Fonction d'activation

**Tableau III.1:** Analogie entre neurones biologiques et artificiels

### III.2.3 Modèle mathématique d'un neurone artificiel :

Un neurone artificiel est un modèle mathématique qui prend plusieurs entrées, les pondère et les somme pour produire une sortie. Figure III.5 est la représentation classique d'un RNA [39] :

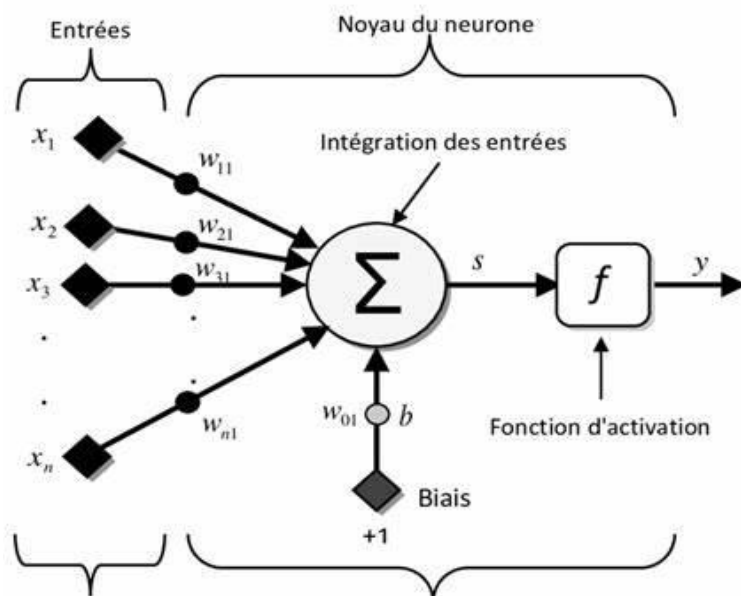


Figure III.5 : Modèle d'un neurone artificiel (Marc Parizeau., 2004)

Ce modèle mathématique peut être représenté comme suit :

$$s = \sum_{j=1}^R x_j W_{1,j} + b \quad (\text{III.1})$$

Où :

- \$s\$ est la sortie du neurone
- \$x\_j\$ sont les entrées du neurone
- \$W\_{1,j}\$ sont les poids associés à chaque entrée
- \$b\$ est le biais (ou offset)

Et :

$$y = f(s) = f\left(\sum_{j=1}^R x_j W_{1,j} + b\right) \quad (\text{III.2})$$

Où \$f\$ est une fonction d'activation qui transforme la sortie pondérée \$s\$ en une sortie non-linéaire.

### III.2.3.1 Les fonctions d'activation :

Les fonctions d'activation sont des équations mathématiques qui déterminent la sortie d'un réseau neuronal, et sont très importantes pour les réseaux profonds. Cette fonction permet d'introduire une non-linéarité dans le modèle, ce qui permet au réseau de modéliser des relations complexes entre les entrées et les sorties.

Il existe plusieurs fonctions d'activation couramment utilisées en apprentissage profond, chacune avec ses propres avantages et inconvénients. Voici quelques exemples [40] :

### a. La fonction d'activation sigmoïde :

La fonction d'activation sigmoïde suivante convertit la somme pondérée en une valeur comprise entre 0 et 1. Elle est non linéaire par nature et possède une dérivée lisse, comme le montre la figure III.6. En raison de la plage de sortie de la sigmoïde [0;1], la sortie de chaque unité est également écrasée, ce qui entraîne la disparition du gradient, en particulier dans un réseau profond. La fonction d'activation sigmoïde est définie comme suit :

Equation :

$$y = \sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (\text{III.3})$$

Dérivée :

$$y' = \frac{e^{-x}}{(1 + e^{-x})^2} \quad (\text{III.4})$$

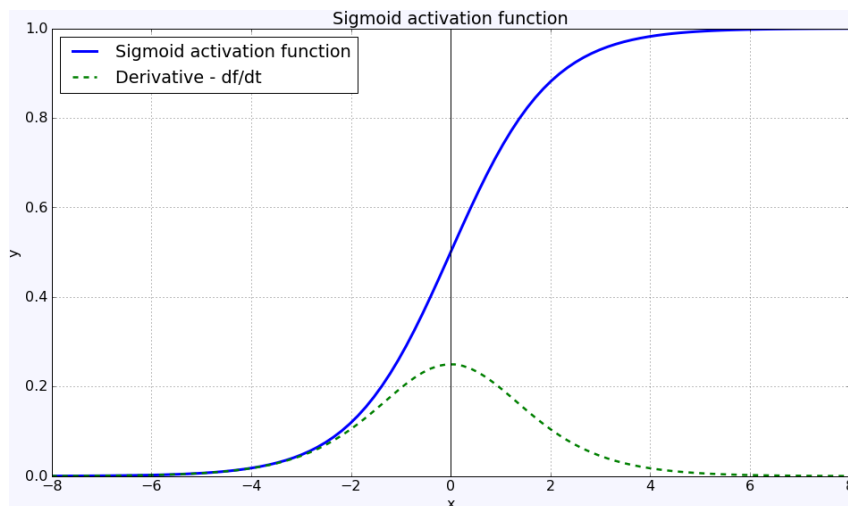


Figure III.6 : La fonction sigmoïde

### b. La fonction d'activation ReLU :

Cette fonction est très populaire car elle est efficace et facile à calculer. Le succès de ReLU est basé sur ses performances d'apprentissage supérieures à celles d'autres fonctions d'activation telles que la sigmoïde logistique et la tangente hyperbolique. La fonction d'activation ReLU est définie comme suit :

Equation :

$$y = \text{ReLU}(x) = \max(0, x) \quad (\text{III.5})$$

Dérivée :

$$y' = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x > 0 \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

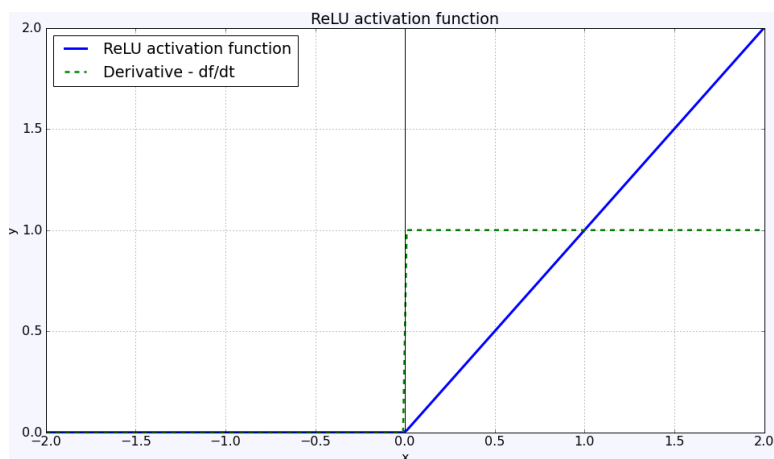


Figure III.7 : La fonction d'activation ReLU

**c. La fonction d'activation la tangente hyperbolique :**

Cette fonction est similaire à la sigmoïde mais a une plage de valeurs plus étendue (-1 à 1 au lieu de 0 à 1). Le principal avantage par rapport à la la fonction sigmoïde est que sa dérivée est plus raide, comme le montre la figure III.8, ce qui signifie qu'elle peut obtenir plus de valeurs. Cette fonction peut être définie comme suit :

Equation : 
$$y = \tanh(x) = \frac{1 - e^{-2x}}{1 + e^{-2x}} \tag{III.7}$$

Dérivée : 
$$y' = 1 - \frac{(e^x - e^{-x})^2}{(e^x + e^{-x})^2} \tag{III.8}$$

Ou 
$$y' = 1 - \tanh^2(x)$$

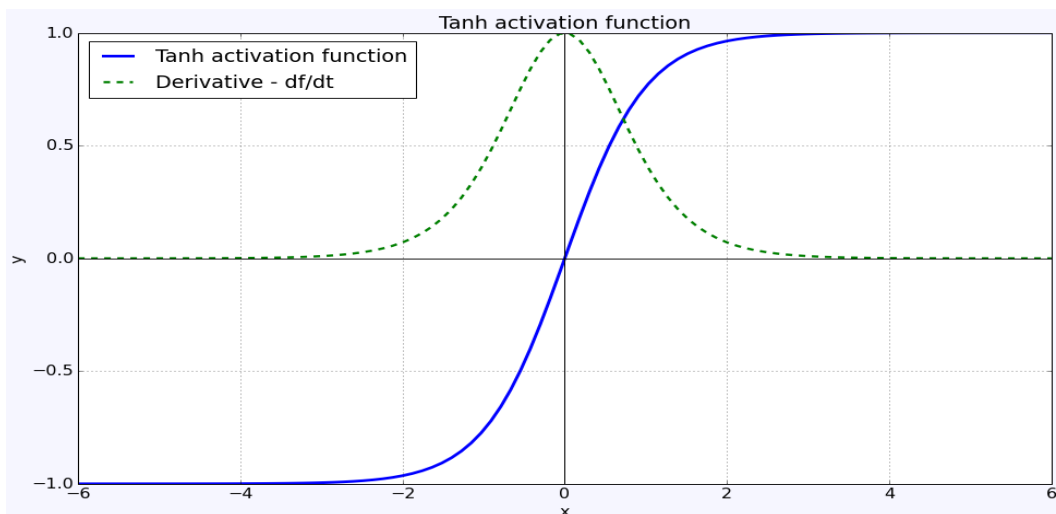


Figure III.8: La fonction d'activation la tangente

#### d. La fonction d'activation linéaire :

La fonction d'activation linéaire, également appelée identité linéaire, est une fonction d'activation couramment utilisée dans les réseaux de neurones. Elle effectue une transformation linéaire simple en conservant la même valeur que celle qui lui est donnée en entrée.

Mathématiquement, la fonction d'activation linéaire est définie comme :

$$\text{Equation :} \quad y = f(x) = x \quad (\text{III.9})$$

$$\text{Dérivée :} \quad y' = 1 \quad (\text{III.10})$$

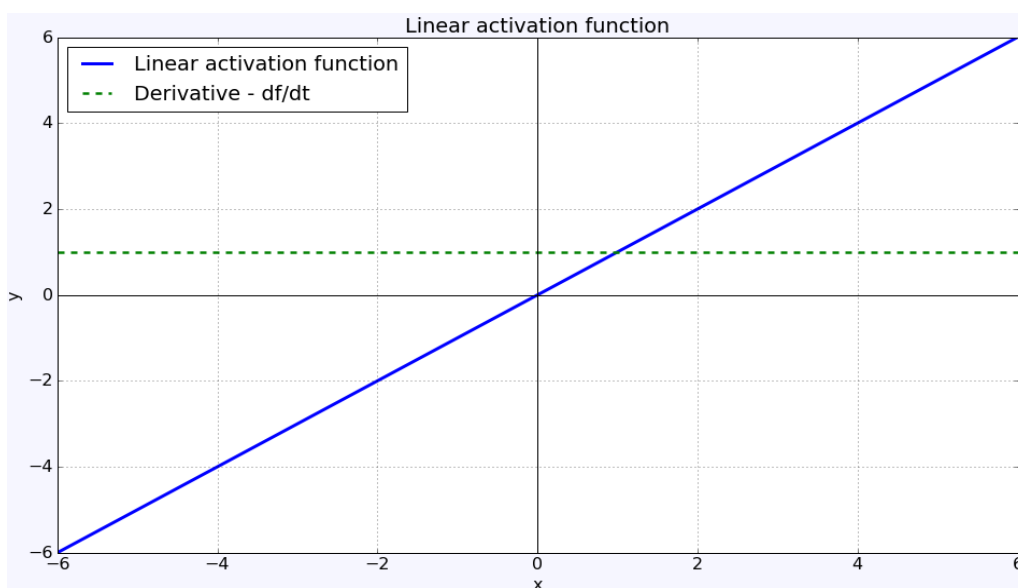


Figure III.9 : La fonction d'activation linéaire.

### III.3 Apprentissage des réseaux neuronaux artificiels :

L'apprentissage des réseaux neuronaux artificiels consiste à ajuster les poids des connexions entre les neurones du réseau afin qu'il puisse apprendre à effectuer des tâches spécifiques. Le processus d'apprentissage implique généralement deux phases principales : la phase de propagation avant (forward propagation) et la phase de rétropropagation du gradient (backpropagation) [41].

#### a. Propagation avant (Forward propagation) :

- Lors de la propagation avant, les données d'entrée sont introduites dans le réseau et se propagent couche par couche, de l'entrée à la sortie.
- Chaque neurone calcule une combinaison linéaire de ses entrées pondérées par les poids des connexions, puis applique une fonction d'activation non linéaire à cette combinaison pour

produire une sortie.

- Les sorties des neurones de chaque couche deviennent les entrées de la couche suivante, et le processus se répète jusqu'à ce que la sortie finale du réseau soit obtenue.

### **b. Rétropropagation du gradient (Backpropagation) :**

- La rétropropagation du gradient est utilisée pour ajuster les poids du réseau en fonction de l'erreur entre les sorties prédites et les sorties attendues.
- L'erreur est mesurée à l'aide d'une fonction de perte, qui évalue la différence entre les prédictions du réseau et les valeurs réelles.
- À partir de l'erreur calculée, le gradient de cette fonction de perte par rapport aux poids des connexions est calculé à l'aide de la règle de dérivation des fonctions composées.
- Le gradient est ensuite utilisé pour mettre à jour les poids des connexions.
- Ce processus de rétropropagation du gradient est répété sur l'ensemble des données d'apprentissage, itérativement, afin de minimiser l'erreur globale et d'ajuster les poids pour améliorer les performances du réseau.

L'apprentissage des réseaux neuronaux artificiels nécessite généralement un grand nombre de données d'apprentissage pour obtenir de bons résultats. Les réseaux plus profonds avec plus de couches et plus de neurones peuvent capturer des caractéristiques plus complexes, mais cela peut également rendre l'apprentissage plus difficile et nécessiter une plus grande capacité de calcul. Une fois que le réseau neuronal est entraîné avec succès, il peut être utilisé pour effectuer des prédictions sur de nouvelles données en utilisant simplement la propagation avant, sans rétropropagation du gradient.

### **III.3.1 Vocabulaire des Réseaux Neuronaux :**

Il est essentiel de se familiariser avec les concepts et le vocabulaire liés à l'apprentissage d'un réseau neuronal pour comprendre la conception de l'apprentissage profond. En comprenant ces termes, nous serons en mesure de mieux appréhender l'architecture d'un réseau de neurones et son fonctionnement dans le cadre de l'apprentissage profond.

#### **a. Fonction Coût (Cost Function)**

Nous avons abordé la notion d'erreur entre le modèle et les données. L'agrégation de ces erreurs est quantifiée par une fonction de coût (également appelée fonction de perte ou loss function en anglais). Cette fonction peut être définie à l'aide de différentes métriques, parmi lesquelles l'erreur quadratique moyenne (Mean Squared Error) est l'une des plus couramment utilisées.



Elle est calculée en prenant la moyenne des erreurs individuelles pour chaque neurone en sortie.

$$E = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^N (y_{ref} - y)^2 \quad (\text{III.11})$$

La valeur de  $y_{ref}$  change à chaque mise à jour des paramètres .

### **b. Batches**

Un batch dans les réseaux de neurones fait référence à un sous-ensemble d'exemples d'entraînement qui sont traités ensemble lors de la phase d'apprentissage. Plutôt que de mettre à jour les paramètres du modèle après chaque exemple individuel, les batches permettent des calculs plus efficaces en mettant à jour les paramètres en fonction des gradients moyens calculés sur un groupe d'exemples. La taille du batch, appelée batch size, détermine le nombre d'exemples inclus dans chaque batch. L'utilisation de batches présente des avantages tels que la parallélisation, la stabilisation du processus d'apprentissage et la régularisation du modèle. Cependant, le choix de la taille de batch est un compromis entre la stabilité des gradients, le temps d'entraînement et la généralisation du modèle. En somme, l'utilisation de batches permet de trouver un équilibre entre l'efficacité computationnelle et les performances du modèle lors de l'entraînement des réseaux de neurones [42].

### **c. Epochs**

Les "epochs" (ou époques) dans les réseaux de neurones font référence au nombre de fois où tout l'ensemble de données d'entraînement est passé à travers le réseau pendant la phase d'apprentissage. Chaque époque permet d'ajuster les poids du réseau en fonction des erreurs commises sur les données d'entraînement. Le choix du nombre d'époques dépend de la complexité du problème et de la convergence du modèle, afin d'obtenir de bonnes performances sur de nouvelles données [43].

## **III.3.2 Types d'apprentissage :**

En deep learning, il existe plusieurs types d'apprentissage qui peuvent être utilisés en fonction du type de tâche que vous souhaitez résoudre. Voici les principaux types d'apprentissage en deep learning :

- **Apprentissage supervisé :**

C'est le type d'apprentissage le plus couramment utilisé en deep learning. Dans l'apprentissage supervisé, un modèle est entraîné à prédire une sortie souhaitée à partir d'un ensemble de données d'entraînement étiquetées. Le modèle apprend à associer les entrées aux sorties en ajustant ses poids et

ses biais à l'aide de techniques d'optimisation telles que la rétro propagation du gradient.

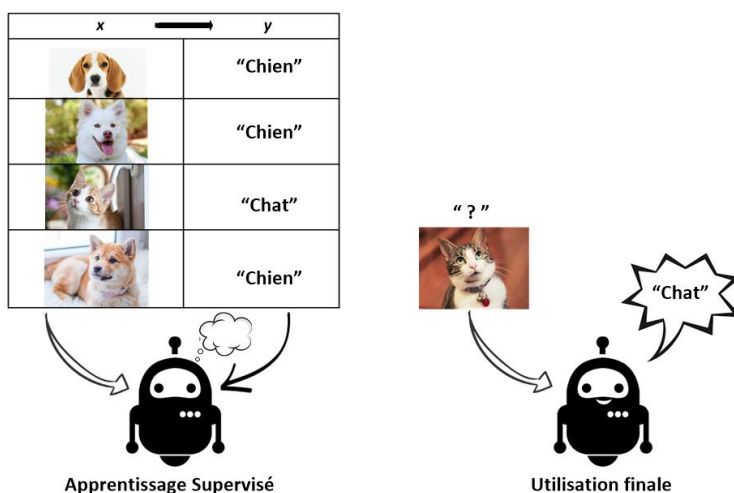


Figure III.10 : Apprentissage supervisé

- **Apprentissage non supervisé :**

Contrairement à l'apprentissage supervisé, l'apprentissage non supervisé ne nécessite pas d'étiquettes pour les données d'entraînement. Au lieu de cela, le modèle est chargé de découvrir des schémas et des structures inhérents aux données sans aucune information a priori. Cela peut inclure des techniques telles que la réduction de dimensionnalité, la détection d'anomalies, le regroupement (clustering), etc

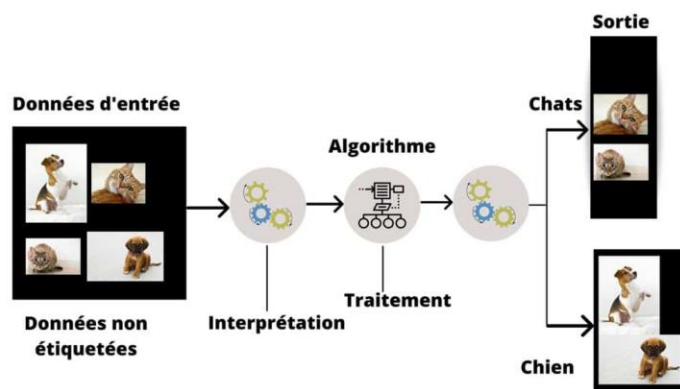


Figure III.11 : Apprentissage non supervisé

- **Apprentissage par renforcement :**

L'apprentissage par renforcement est une forme d'apprentissage où un agent apprend à prendre des décisions en interagissant avec un environnement. L'agent reçoit des récompenses ou des sanctions en fonction de ses actions, et son objectif est de maximiser la récompense totale à long terme. Dans le

deep learning, cela peut être réalisé en utilisant des techniques telles que les réseaux de neurones profonds Q-learning (deep Q-learning) ou les réseaux de neurones de politique (policy networks).

- **Apprentissage semi-supervisé :**

Dans l'apprentissage semi-supervisé, vous disposez à la fois de données étiquetées et de données non étiquetées pour l'entraînement du modèle. L'idée est d'utiliser les données étiquetées pour guider l'apprentissage, tout en exploitant les données non étiquetées pour capturer des informations supplémentaires et améliorer les performances du modèle.

- **Apprentissage par transfert :**

L'apprentissage par transfert consiste à utiliser les connaissances acquises par un modèle préalablement formé sur une tâche pour améliorer les performances d'un autre modèle sur une tâche similaire ou connexe. Cela peut être particulièrement utile lorsque les données d'entraînement sont limitées pour le nouveau modèle, car le transfert des connaissances peut aider à accélérer l'apprentissage et à améliorer la généralisation.

Ces différents types d'apprentissage en deep learning offrent des approches variées pour résoudre différents types de problèmes et exploiter les caractéristiques des données disponibles. Il est souvent nécessaire de choisir le type d'apprentissage approprié en fonction de la nature du problème et des ressources disponibles.

### **III.4 L'auto encodeur :**

Un autoencodeur est une architecture de réseau de neurones artificiels dans laquelle la couche d'entrée et la couche de sortie ont le même nombre de neurones. Il est utilisé pour l'apprentissage non supervisé et a pour objectif de reconstruire l'entrée avec une erreur minimale. En d'autres termes, un autoencodeur cherche à apprendre une approximation de la fonction identité.

L'autoencodeur fonctionne en utilisant un réseau neuronal artificiel qui est entraîné pour reconstruire l'entrée en la comprimant en une représentation latente de petite dimension, puis en la décompressant pour la reconstruire.

L'autoencodeur peut être utilisé pour diverses tâches, telles que la réduction de dimension, la détection d'anomalies, la génération de données, la compression de données, etc. Il est également utilisé comme prétraitement pour des tâches de classification et de régression supervisées en réduisant la dimensionnalité des données d'entrée tout en préservant les caractéristiques les plus importantes [44].

### III.4.1 L'architecture d'un auto-encodeur :

L'auto encodeur est composée de deux parties principales : un encodeur  $f_\theta$  et un décodeur  $g_\psi$ . L'encodeur calcule  $z_j = f_\theta(x_i)$  pour chaque échantillon d'apprentissage en entrée ( $x_i$ ), avec  $i \in [1, n]$ ; et  $j \in [1, p]$ , le décodeur vise à reconstitué l'entité à partir de code  $z_i : \hat{x}_i = g_\psi(z_i)$ .

Les paramètres de l'encodeur et du décodeur sont ajustés simultanément lors de la tâche de reconstruction, en cherchant à minimiser la fonction objective.

$$\mathcal{L}_{AE}(\theta, \psi) = \sum_{i=1}^n \mathcal{L}(x_i, g_\psi(f_\theta(x_i))) = \sum_{i=1}^n \mathcal{L}(x_i, g_\psi(z_i)) = \sum_{i=1}^n \mathcal{L}(x_i, \hat{x}_i) \quad (\text{III.12})$$

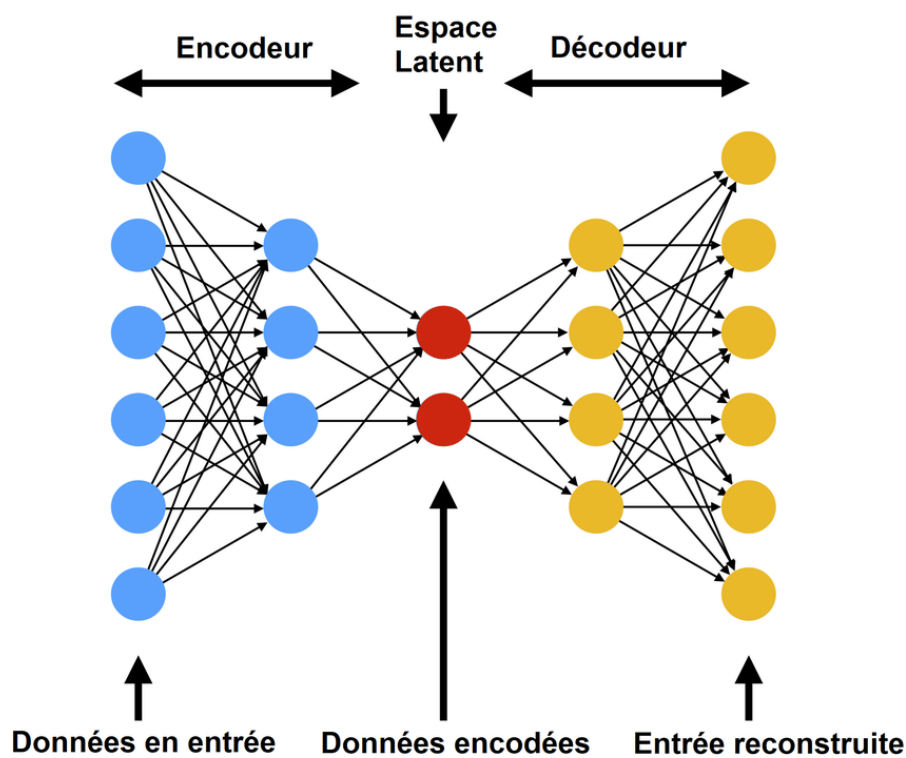


Figure III.12 : L'architecture d'un auto-encodeur

- L'encodeur

L'encodeur joue un rôle essentiel dans la compression des données d'entrée en une représentation plus concise. En effectuant cette compression, il identifie les caractéristiques les plus significatives à partir des données initiales, ce qui conduit à la création d'une représentation condensée appelée "bottleneck" ou espace latent.

- **Le décodeur**

Contrairement à l'encodeur, le décodeur a pour rôle de décompresser le bottleneck afin de reconstituer les données d'origine. Sa principale difficulté réside dans l'utilisation des caractéristiques contenues dans le vecteur condensé pour reconstruire les données de manière aussi fidèle que possible.

- **L'espace latent**

L'espace latent fait référence aux données compressées, c'est-à-dire à l'espace qui se situe entre l'encodeur et le décodeur. L'objectif de la création de cet espace latent est de restreindre le flux d'informations entre les deux composants de l'auto-encodeur. Cette restriction se traduit par l'élimination du bruit afin de ne laisser passer que les informations essentielles et significatives.

### **III.4.2 Principe de fonctionnement d'un auto-encodeur :**

Le principe de fonctionnement de la méthode auto encodeur est le suivant :

- L'encodeur prend en entrée les données et les transforme en une représentation compressée (le code latent). Cette compression est réalisée en passant les données à travers plusieurs couches de traitement qui réduisent la dimensionnalité de la représentation. Le code latent est souvent une représentation vectorielle de taille réduite.
- Le décodeur prend en entrée le code latent et produit une version reconstruite des données d'origine. Cette reconstruction est réalisée en inversant le processus de l'encodeur, c'est-à-dire en passant le code latent à travers plusieurs couches de traitement qui augmentent la dimensionnalité de la représentation jusqu'à ce que la version reconstruite des données d'origine soit obtenue.
- L'auto encodeur est entraînée en minimisant l'erreur de reconstruction entre les données d'origine et les données reconstruites. Cette erreur est souvent mesurée par la distance euclidienne ou une autre mesure de distance entre les deux. L'objectif est de trouver les poids des neurones de l'encodeur et du décodeur qui minimisent cette erreur.
- Une fois que l'auto encodeur est entraînée, il peut être utilisé pour diverses tâches, telles que la réduction de dimensions, la détection d'anomalies, la génération de données, etc. Par exemple, la représentation compressée peut être utilisée comme entrée pour d'autres modèles ou algorithmes qui nécessitent des données de taille réduite.

### III.4.3 Paramètres d'entraînement pour un auto-encodeur :

Lors de l'entraînement d'un auto-encodeur, l'algorithme de descente de gradient, largement utilisé dans les réseaux de neurones en général, est souvent employé. Quatre paramètres clés doivent être pris en compte :

- La taille du code (couche cachée) : cela correspond au nombre de neurones dans la couche de code, qui représente la représentation latente des données.
- Le nombre de couches : un auto-encodeur peut avoir une seule couche ou plusieurs couches, selon sa complexité et sa capacité à capturer les caractéristiques des données.
- Le nombre de neurones par couche : généralement, le nombre de neurones diminue dans l'encodeur et augmente dans le décodeur, avec la couche de code comme point central, créant ainsi une symétrie entre l'encodeur et le décodeur.
- La fonction objective : un auto-encodeur est entraîné pour minimiser une fonction objective, qui est généralement l'erreur quadratique moyenne. Cependant, si les données d'entrée sont des probabilités (comprises entre 0 et 1), la fonction de perte la plus appropriée est l'entropie croisée.
- Le nombre d'époques : il s'agit du nombre de fois où le réseau de neurones est entraîné sur l'ensemble complet des données. Le choix du nombre d'époques dépend de la complexité du problème et de la convergence du modèle.

En résumé, lors de l'entraînement d'un auto-encodeur, plusieurs paramètres tels que la taille du code, le nombre de couches, le nombre de neurones par couche, la fonction objective et le nombre d'époques doivent être pris en considération pour obtenir des résultats optimaux.

### III.5 Conclusion

Nous avons pu voir dans ce chapitre les principes fondamentaux nécessaires à la compréhension des réseaux de neurones, avec une attention particulière accordée aux auto-encodeurs. Dans le prochain chapitre, nous allons implémenter l'auto-encodeur dans la chaîne OFDM et voir ce que donne les résultats en terme de qualité de débruitage de bruit impulsif.

Résultats de simulation

## IV.1 Introduction

Le présent chapitre se concentre sur les résultats obtenus lors de la simulation de notre chaîne OFDM. Pour réaliser cette simulation, nous avons utilisé le langage MATLAB. Dans cette section, nous commencerons par une brève introduction du simulateur que nous avons employé, suivi de l'exposition des divers graphiques et figures obtenue de notre technique proposée.

## IV.2 Présentation de Matlab

MATLAB, abréviation de MATrix LABoratory, est un langage informatique spécialisé dans les sciences appliquées. Il s'agit d'un logiciel puissant dédié à la manipulation de données numériques, au calcul, à la programmation, à l'analyse des données, à la visualisation et aux calculs numériques. MATLAB est conçu pour simplifier la traduction des problèmes mathématiques en langage informatique, en utilisant une syntaxe proche du langage naturel scientifique. Il offre des fonctionnalités avancées qui facilitent la résolution de problèmes complexes et améliorent le processus d'apprentissage. En comparaison avec d'autres langages de programmation tels que Fortran, MATLAB permet de résoudre plus rapidement et facilement des problèmes numériques. Le logiciel est compatible avec les systèmes d'exploitation Windows et Linux, et son interface utilisateur utilise les fonctionnalités habituelles du multitâche. Il convient de noter que MATLAB traite des données de manière discrète, ce qui signifie que toutes les entrées et sorties de codes MATLAB sont discrètes.

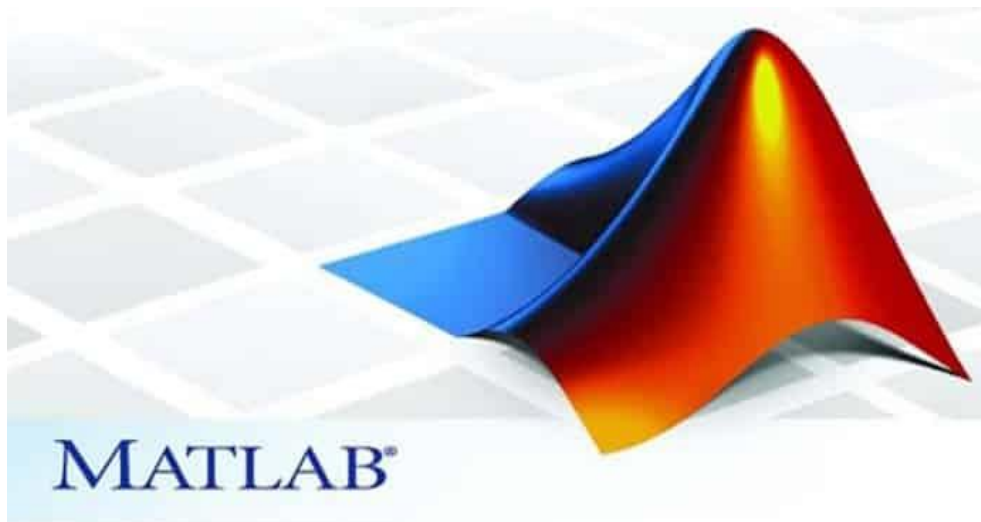


Figure IV.1 : Logo MATLAB.

## IV.3 Simulation et Résultats

Les signaux purs n'existent qu'en théorie. Autrement dit, lorsque vous effectuez des activités liées au traitement du signal, il est très probable que vous subissiez du bruit. Que le bruit soit causé par l'appareil de mesure (ou de réception) ou par le support dans lequel vous effectuez les mesures, vous



voulez qu'il disparaisse. Diverses astuces mathématiques existent pour filtrer le bruit d'un signal. Lorsque le bruit est relativement constant sur une plage de signaux, par exemple, vous pouvez prendre la moyenne de tous les signaux et la déduire de chaque signal individuel - ce qui supprime probablement les facteurs qui contribuent au bruit.

Cependant, ces astuces fonctionnent en connaissant quelques éléments sur le bruit à l'avance. Dans de nombreux cas, la forme exacte de votre bruit est inconnue ou ne peut pas être estimée car elle est relativement cachée est-ce le cas dans le bruit impulsif. Dans ces cas, la solution peut résider dans l'apprentissage du bruit à partir de données d'exemple. Et c'est ce qu'on va faire lors de notre simulation.

### IV.3.1 Simulation de la chaîne OFDM

Dans cette section, nous avons effectué une simulation de la chaîne OFDM dans un canal de Rayleigh avec un bruit blanc gaussien. La simulation a été réalisée pour la bande de fréquence [27,5-28,35] GHz, qui a été attribuée et licenciée par les États-Unis pour la cinquième génération. Les paramètres utilisés sont présentés dans le tableau ci-dessous :

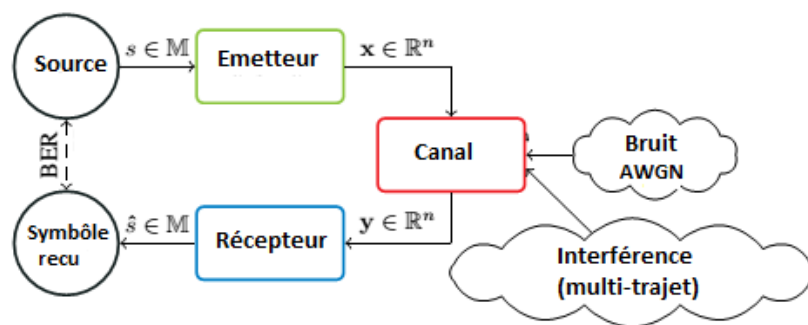


Figure IV.2 : Schéma bloc de la chaîne de transmission.

Paramètres	Valeurs
Technique de modulation	BPSK, QPSK, M-QAM
Nombres de sous-porteuses	16
Longueur de préfix cyclique	128
Nombres d'FFT	512
Bande de fréquence	[27,5-28,35] GHz
Modèle de Canal	Canal de Rayleigh

Tableau IV.1 : Paramètres de simulation.

Dans ce qui suit nous avons s'intéressés par les performances en termes de taux d'erreur en fonction de rapport Signal sur Bruit.

### Le taux d'erreur binaire (TEB ou BER)

Le terme BER (Bit Error Rate) ou TEB (Taux d'Erreur Binaire) est utilisé pour quantifier les erreurs qui surviennent dans un système de transmission. Il s'agit d'un paramètre essentiel pour évaluer les systèmes qui assurent le transfert de données numériques d'un emplacement à un autre [45]. La formule suivante définit le taux d'erreur binaire :

$$BER = TEB = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre de bits totaux envoyés}} \quad (IV.1)$$

### Le rapport signal sur bruit (SNR)

SNR(Signal to Noise Ratio) est une mesure du rapport signal sur bruit, qui correspond à la division de la puissance du signal utile ( $P_s$ ) par la puissance du bruit ( $N$ ). Cette mesure permet d'évaluer la contribution du bruit et son impact sur la dégradation du signal.

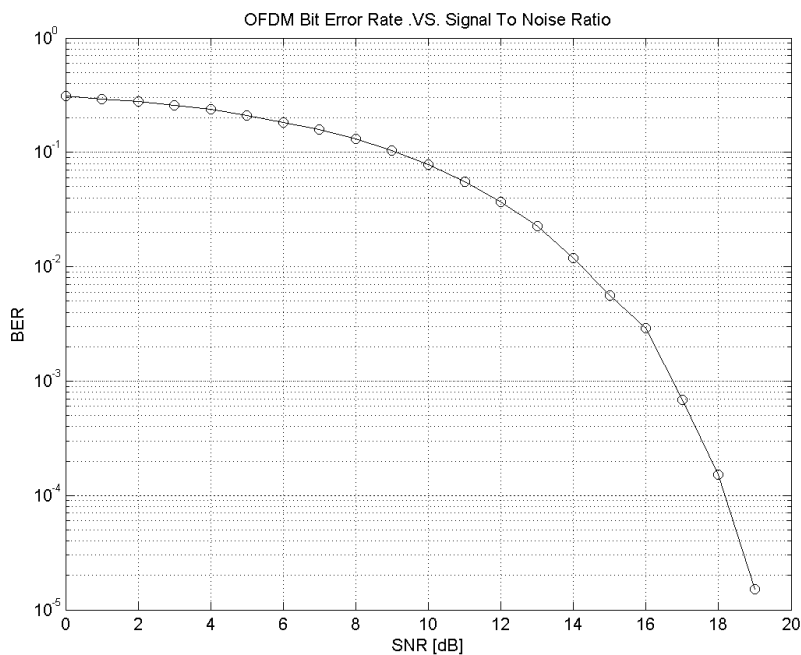
$$SNR = \frac{P_s}{n_0} \quad (IV.2)$$

Ce rapport est généralement exprimé en dB :

$$SNR = 10 \log\left(\frac{P_s}{n_0}\right) \quad (IV.3)$$

Le SNR (Signal to Noise Ratio) est une mesure essentielle permettant d'évaluer la dégradation soudaine causée par le bruit. En effet, lorsque le rapport signal sur bruit est faible, le signal est davantage affecté par le bruit, rendant ainsi plus difficile l'élimination de son influence. Pour garantir l'intégrité du signal reçu en tant que "copie fidèle" du signal transmis, il est essentiel de maintenir un rapport signal sur bruit élevé [46].

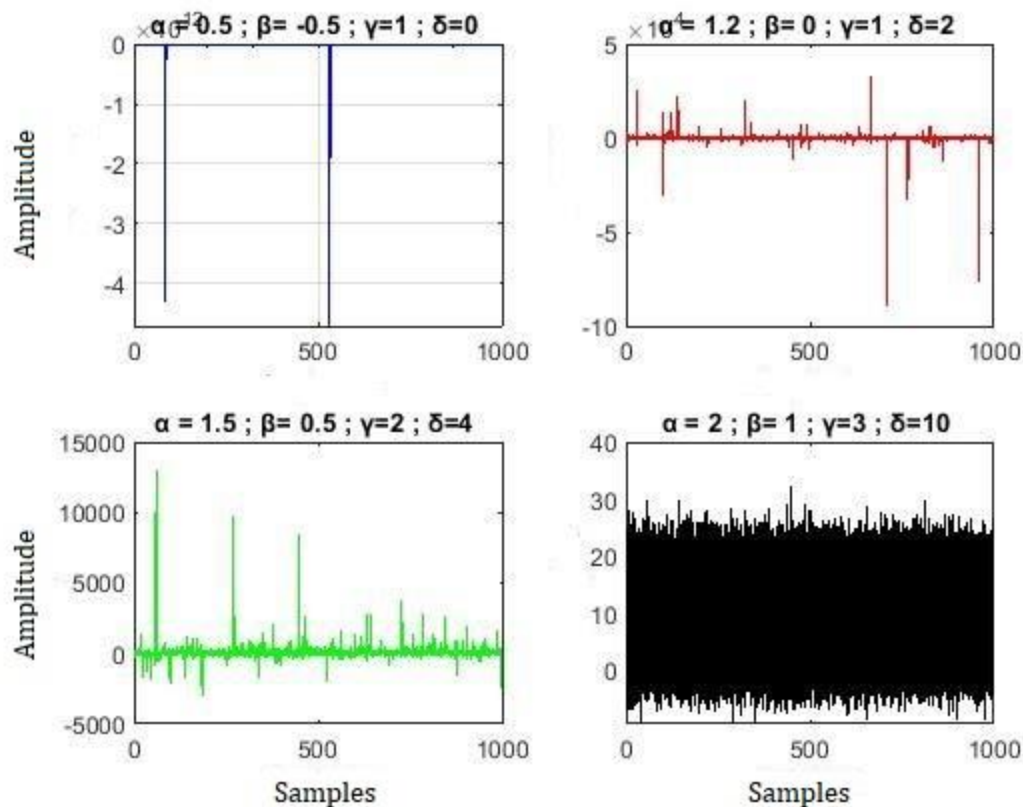
La figure IV.3 représente le BER en fonction de SNR pour un bruit blanc AWGN en utilisant la modulation 16-QAM on remarque que la relation entre le BER et SNR est nettement inversement proportionnelle, plus le SNR augment plus le BER diminue.



**Figure IV.3:** BER vs SNR

### IV.3.2 Simulation de bruit impulsif

Nous avons utilisé les fonctions développées par Mark S. Veillette, disponibles dans [47], pour simuler les lois  $\alpha$ -stables. Ces fonctions permettent de générer un bruit S $\alpha$ S à partir des fonctions de densité de probabilité (PDF). L'algorithme "stablpdf" est utilisé pour calculer les intégrales numériques décrites dans [48]. La Figure IV.4 illustre le bruit impulsif généré par les distributions  $\alpha$ -stables, en faisant varier les valeurs des paramètres  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  et  $\delta$ . Lorsque nous comparons les quatre tracés en fonction de  $\alpha$ , nous pouvons facilement observer que plus  $\alpha$  est petit, plus le bruit devient fortement impulsif. En ce qui concerne la variance, on peut remarquer sur le quatrième tracé ( $\alpha = 2$ ) que la variance converge vers une valeur fixe autour de 18. Cela démontre que la distribution tend vers une distribution gaussienne avec une variance de  $2\gamma^2$ , où  $\gamma$  est égal à 3. Pour les valeurs  $\alpha$  inférieures à 2, on observe une divergence de la variance.



**Figure IV.4:** Bruit impulsif

La notion de rapport signal sur bruit SNR géométrique (GSNR) a été introduite pour la première fois dans [49] et a été utilisée dans [50] pour caractériser le système de transmission et présenter ses performances dans le contexte d'un processus impulsif de variance infinie. Le GSNR est défini par l'expression suivante :

$$GSNR = \frac{1}{2 C_g} \cdot \frac{E_b}{S_0} \quad (IV.4)$$

Avec :

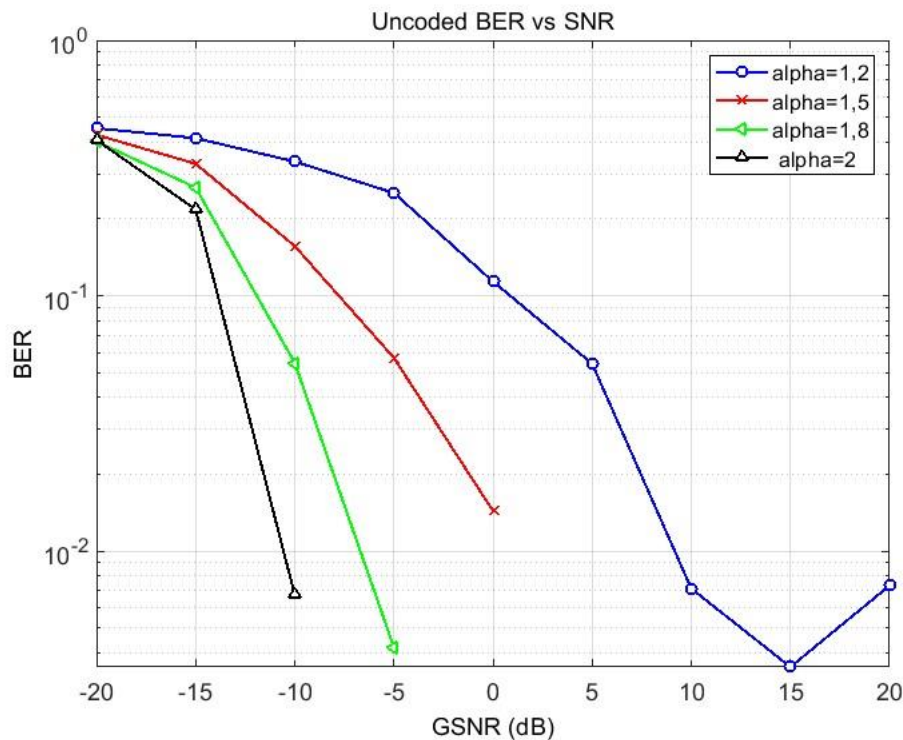
- $C_g$  : est une constante qui représente l'exponentielle de la constante d'Eulere  $e^{C_e} = 1.7811$ .
- $E_b$  : est la puissance du signal utile reçu.
- $S_0$  : l'expression de la puissance géométrique d'un bruit  $\alpha$ -stable symétrique est déterminée en fonction des paramètres  $\alpha$  et  $\gamma$ .

$$S_0 = e^{2E(\ln|x|)} = \gamma^2 C_g^{\frac{2}{\alpha}-2} \quad (IV.5)$$

Dans le cas de  $\alpha = 2$ , il redevient le SNR standard (VI.3).

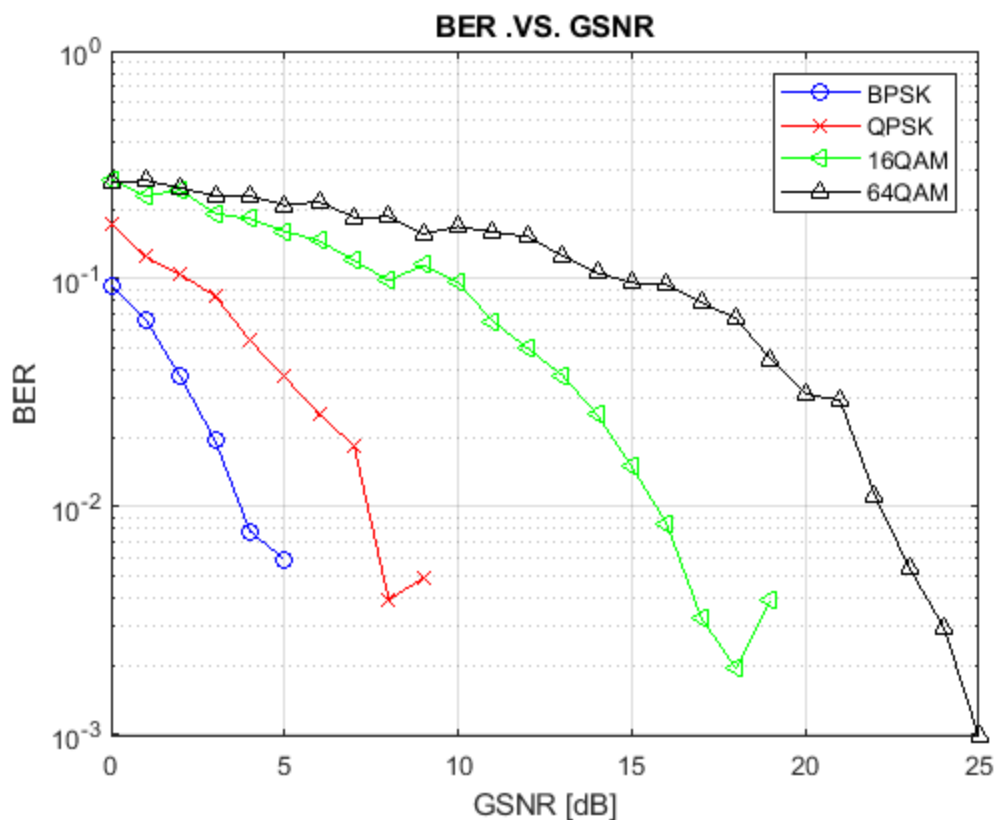
Cette section présente les résultats des simulations dans un canal de Rayleigh, soumis à l'effet de bruit  $\alpha$ S. Nous explorons les caractéristiques de bruit en considérant divers scénarios, correspondant à différents degrés d'impulsivité et les résultats sont illustrés dans la figure IV.5.

À partir de la figure, nous pouvons clairement observer que le taux d'erreur binaire (BER) est fortement influencé par le degré d'impulsivité de l'environnement. Nous constatons que le BER obtenu dans les environnements très impulsifs avec  $\alpha=1,2$  est nettement plus élevé que celui obtenu dans les environnements moyennement impulsifs avec  $\alpha=1,5$  et  $1,8$ . Par exemple nous obtenons un BER de  $10^{-1}$  pour une valeur de GSNR de  $-14$  dB pour  $\alpha=2$ , alors que la même valeur est obtenue pour un GSNR de  $1$  dB dans le cas  $\alpha=1,2$ .



**Figure IV.5 :** Comparaison de BER pour des différentes valeurs de  $\alpha$

Afin d'évaluer l'impact du type de modulation sur le taux d'erreur binaire (BER), nous avons réalisé une simulation en utilisant les modulations suivantes : BPSK, QPSK, 16QAM et 64QAM. Les résultats de cette simulation sont présentés dans la figure suivante :



**Figure IV.6 :** Comparaison de BER pour des différents schémas de modulation pour un milieu fortement impulsif  $\alpha = 1,2$

Figure IV.6 représente la comparaison des performances BER pour différents schémas de modulations (BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM). Les résultats montrent une diminution de BER pour toutes les modulations. Par exemple nous obtenons un BER de  $10^{-2}$  pour un GSNR de :

BPSK  $\rightarrow$  4 dB

QPSK  $\rightarrow$  7 dB

16QAM  $\rightarrow$  16 dB

64QAM  $\rightarrow$  23 dB

Donc le BPSK est le plus performant.

### IV.3.3 Implémentation de l'auto-encodeur dans la chaîne OFDM

Dans l'environnement réel, de nombreux types de bruits sont mélangés au signal cible, ce qui rend difficile la suppression des bruits. Cependant, la plupart des travaux précédents ont modélisé une petite quantité de bruit non stationnaire, ce qui est difficile à appliquer dans le monde réel. Pour faire face à ce problème, nous proposons un nouveau modèle d'apprentissage en profondeur pour éliminer ces bruits et plus précisément le bruit impulsif.

Le but d'un DAE (Denoising Auto-encoder) est de supprimer le bruit. Vous pouvez également le considérer comme un algorithme de débruitage personnalisé adapté à vos données. Nous voulons dire par le mot personnalisé que si nous formons un DAE sur un ensemble spécifique de données, il sera optimisé pour supprimer le bruit de données similaires. Par exemple, si nous l'entraînons à supprimer le bruit d'un signal OFDM, cela fonctionnera bien sur des signaux similaires mais ne conviendra pas au nettoyage des images par exemple.

Supposons que nous alimentons le réseau de neurones en données bruyantes en tant qu'entités, tandis que nous disposons des données pures en tant que cibles. Le réseau de neurones apprendra un état codé basé sur le signal bruité et tentera de le décoder pour mieux correspondre aux données pures. Quelle est la chose qui se situe entre les données pures et les données bruyantes ? En effet, le bruit. En effet, l'auto-encodeur apprendra ainsi à reconnaître le bruit et à le supprimer de signal d'entrée.

Pour l'implémentation de l'auto-encodeur nous avons suivi le modèle trouvé dans [51] en introduisons le bloc AE avant la modulation OFDM figure IV.7.

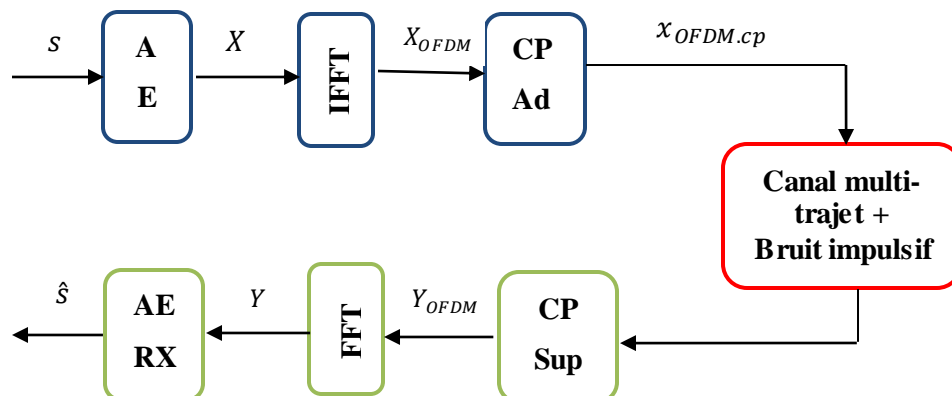


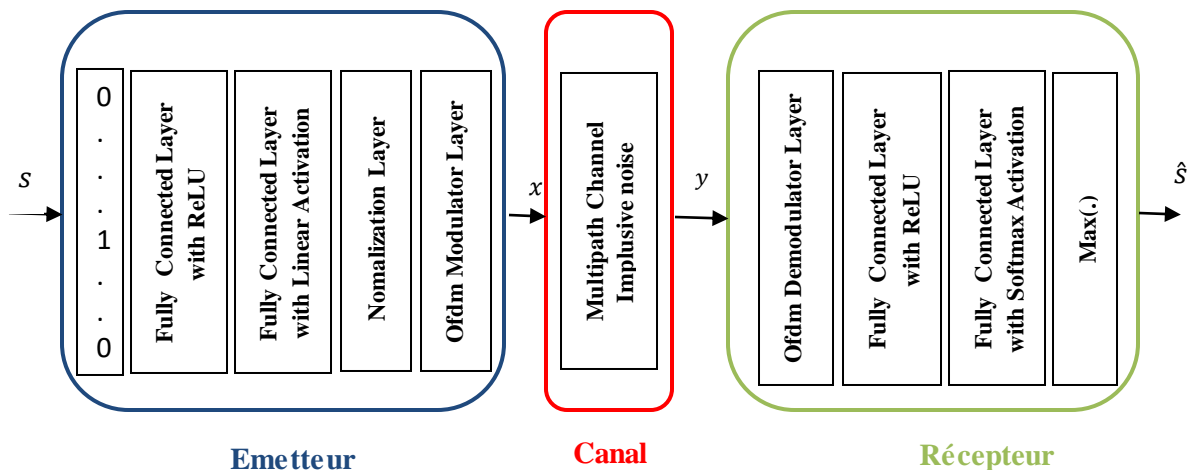
Figure IV.7 : Schéma fonctionnel

Le schéma fonctionnel montre figure IV.8 un système de communication sans fil avec encodeur automatique. Le codeur (émetteur) mappe d'abord chaque k ensemble de bits d'information dans une séquence en un message  $s$  tel que  $s \in \{0, \dots, M - 1\}$ , où  $M = 2^k$  pour former  $T$  messages. Chacun des  $T$  Chacun des messages  $T, s$ , est mappé à  $n$  utilisations de canal à valeur réelle,  $x = f(s) \in \mathbb{R}^n$ , ce qui donne un taux de codage effectif de  $R = k/n$  bits de données par utilisation réelle de canal. Ensuite, deux utilisations réelles du canal sont mappées dans un symbole complexe pour créer  $x_c = g(s) \in \mathbb{C}^{\frac{n}{2}}$ . La couche de normalisation du codeur impose des contraintes sur  $x$  pour restreindre davantage les symboles codés. Pour illustrer les possibilités, ces contraintes sont implémentées à l'aide de la couche de normalisation :

- Contrainte énergétique :  $\|x_i\|_2^2 = 1; \forall i$  ;

- Contrainte de puissance moyenne :  $\mathbb{E}[|x_i|^2] = 1; \forall i$

Les symboles normalisés sont mappés sur les sous-porteuses OFDM et transmis via le canal.



**Figure IV.8** : Schéma fonctionnel de OFDM basée AE

L'émetteur code ses symboles codés  $x$ . Le canal altère les symboles codés pour générer  $y \in \mathbb{R}^n$ . Le récepteur décode  $y$  et produit une estimation,  $\hat{s}$  du message transmis  $s$ .

Notre modèle utilise une version modifiée du réseau neuronal auto-encodeur proposé dans [51]. Nous avons défini le nombre de sous-porteuses,  $N_{fft}$ , à 256. Les deux couches entièrement connectées transforment  $k$  bits (sous la forme de tableaux one-hot de longueur  $M$ ) en  $n$  nombres réels, ce qui donne un système de communication avec  $= k/n$ . Après normalisation, la couche modulateur OFDM transforme ces  $n$  nombres réels en symboles à valeur complexe de taille  $n/2$  et attribue chaque symbole à une sous-porteuse. Pour garantir que la couche modulateur OFDM produise des symboles OFDM complets, on a défini la longueur minimale d'entrée,  $MinLength$ , de la couche d'entrée de séquence dans la troisième dimension ( $T$ ) à  $N_{fft}$ . Par conséquent, l'entrée du réseau neuronal est une séquence de valeurs one-hot de taille  $M \times N_{fft}$ . Ce réseau utilise la fonction `sequenceInputLayer` avec  $M$  nombre de caractéristiques et une longueur de séquence  $N_{fft}$ .

Une comparaison de BER est représentée sur la figure IV.9. Nous avons tracé le BER pour le système AE, le système OFDM avec codage convolutif et sans codage (figure IV.9). Les résultats montrent bien l'efficacité de notre système OFDM basée AE. Par exemple, nous avons atteint un BER de  $10^{-2}$  pour une valeur de GSNR de 4 dB tandis que la même valeur est obtenue pour un GSNR d'à peu près 10 dB sans codage, ce qui nous offre un gain de 6 dB sans codage et d'environ 3dB par rapport au codage convolutif.



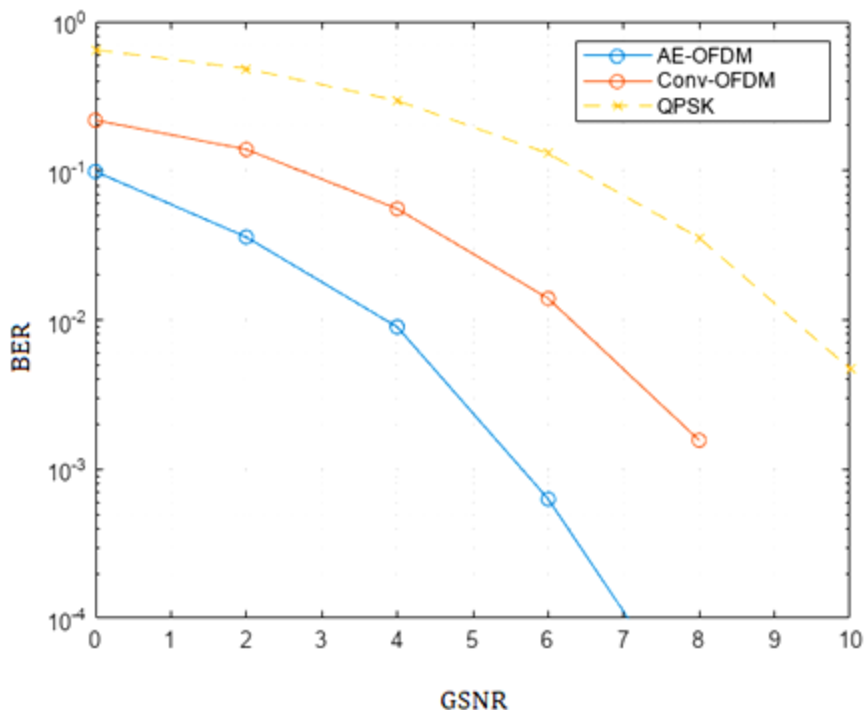


Figure IV.9 : BER vs GSNR pour  $\alpha = 1,2$

#### IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par la simulation de la chaîne OFDM dans le cas de bruit AWGN, ensuite nous avons ajouté le bruit impulsif qui a été généré à partir de modélisation  $\alpha$ -stable et nous avons analysé les performances en termes de BER pour différents degrés d'impulsivité et différents schémas de modulation. Par la suite une présentation de l'OFDM basée AE a été faite. Nous avons fourni une comparaison du BER entre trois scénarios avec AE, avec CC et sans codage, ce qui nous a permis de constater que DAE améliore la qualité de la transmission à la présence de bruit impulsif.

Conclusion générale

Le monde des télécommunications progresse à un rythme de plus en plus rapide. De nos jours, un abonné peut non seulement établir une connexion à tout moment et n'importe où, mais il peut également bénéficier d'une multitude de services à travers le même réseau tel que la visioconférence, jeux vidéo,... C'est le principe de la convergence des réseaux, auquel répondent les réseaux des nouvelles générations. Cette évolution pousse les chercheurs à constamment améliorer les systèmes de communication existants et à trouver de meilleures solutions pour les normes futures.

Dans ce contexte, notre travail nous a permis d'approfondir notre compréhension de la nouvelle technologie 5G et plus particulièrement de la technique OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Notre travail se divise en deux grandes parties : une partie théorique et une deuxième partie axée sur la simulation afin d'obtenir des résultats.

Le premier chapitre de notre travail a consisté en un état de l'art sur l'évolution des différentes générations de réseaux de communication, de la 1G à la 5G. Ensuite, le deuxième chapitre s'est concentré sur la technique OFDM. Nous avons présenté en détail ses performances, son principe de fonctionnement et expliqué la chaîne de transmission, comprenant l'émetteur (codage, modulation, modulation OFDM), le canal de transmission (distribution de canal de Rayleigh, canal de Rice, canal Nakagami-m, bruit AWGN et bruit impulsif) et le récepteur (démodulation, décodage, ...). Dans le troisième chapitre, nous avons abordé les fondements théoriques des réseaux de neurones et des auto-encodeurs. La simulation de la chaîne de transmission a été réalisée à l'aide du logiciel MATLAB, et les résultats ont été discutés dans la quatrième partie de notre mémoire. Les résultats obtenus affirment l'efficacité de l'auto-encodeur dans la suppression du bruit impulsif.

Cette étude nous a offert un aperçu du domaine de la recherche scientifique dans le contexte du débruitage des systèmes OFDM. À travers ce travail modeste, nous avons également exploré l'utilisation et la mise en œuvre de l'apprentissage profond (Deep Learning) à l'aide de réseaux de neurones pour atténuer les bruits impulsifs, avec des résultats encourageants.

Néanmoins, Nous avons fait face à des défis lors de notre travail, notamment dans la partie matérielle, où nous étions limités en termes de performances de la machine pour exécuter efficacement les algorithmes. Cependant, malgré ces contraintes, nous avons réussi à obtenir des résultats de débruitage très satisfaisants, comme en témoigne l'évaluation des critères tels que le taux d'erreur binaire (BER).

Comme perspectives, il serait intéressant d'élargir notre étude à d'autres types de données image, vidéo, .... Il serait également envisageable de mener une étude comparative entre l'auto-encodeur et d'autre code traditionnel. Dans la littérature, les systèmes MIMO sont traditionnellement analysés pour un bruit gaussien donc il serait pertinent d'étudier ces systèmes en prenant en compte des scénarios de bruit impulsif, voire mixte.

Références  
Bibliographiques

- [1] ECC Report 225, “Establishing criteria for the accuracy and reliability of the caller location information in support of emergency services,” tech. rep., CEPT Electronic Communications Committee, Oct. 2014.
- [2] del Peral-Rosado, JA, Raulefs, R., López-Salcedo, JA et Seco-Granados, G. (2017). Etude des méthodes de localisation radio mobile cellulaire : De la 1G à la 5G. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* , 20 (2), 1124-1148.
- [3] Scourias, J. (1995) Overview of the global system for mobile communications. University of Waterloo, 4, 7.
- [4] Cristian, T. O. M. A. (2007) Secure Architectures for Mobile Applications. *Informatica Economica*, 11 (4), 89-92.
- [5] Sanchez, J., & Thioune, M. (2013). UMTS. John Wiley & Sons.
- [6] Spiceworks “what is UMTS Universal Mobile Telecommunication System? Meaning, working ,Importance, and Application ”.
- [7] Kuuboore, M., Odai, D. A., & Kotey, A. N. (2023). Telecommunications Wireless Generations: Overview, Technological Differences, Evolutional Triggers, and the Future. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 105-114.
- [8] Cox, C. (2014). An introduction to LTE: LTE, LTE-advanced, SAE, VoLTE and 4G mobile communications. John Wiley & Sons.
- [9] Launay, F., & Pérez, A. (2019). LTE-Advanced Pro: une étape vers le réseau de mobiles 5G. ISTE Group.
- [10] Singh, R., Thompson, M., Mathews, SA, Agbogidi, O., Bhadane, K. et Namuduri, K. (2017, septembre). Stations de base aériennes pour permettre les communications cellulaires en cas d'urgence. En 2017 Conférence internationale sur la vision, l'image et le traitement du signal (ICVISIP) (pp. 103-108) IEEE.
- [11] Ng voice/whaat is an IP Multimedia Subsystem (IMS).
- [12] Agarwal, A. (2017) The 5th Generation Mobile Wireless Networks- Key Concepts, Network Architecture and Challenges (Pubs.sciepub.com) Retrieved from <http://pubs.sciepub.com/ajeec/3/2/1/>.

- [13] Hong, W., Ko, S., Lee, Y., & Baek, K. (2015). Multi-polarized antenna array configuration for mmWave 5G mobile terminals. 2015 International Workshop on Antenna Technology (iWAT).
- [14] 3GPP TS 38.401: "NG-RAN; Architecture description", version 15.3.0 Release 15 (p10).
- [15] Brown, G. (2017). Service-based architecture for 5g core networks. Huawei White Paper, 1.
- [16] 5G Core and EPC interworking variant, Heavy Reading.
- [17] D. L. Goeckel et G. Ananthaswamy, "On the Design of Multidimensionnel Signal Sets for OFDM Systems", IEEE Transactions on Communications, Vol. 50, No. 3, pp. 442-452, mars 2002.
- [18] Hanzo, L., & Keller, T. (2007). OFDM et MC-CDMA : une introduction . John Wiley et fils.
- [19] Traverso, S. (2007). Transposition de fréquence et compensation du déséquilibre IQ pour des systèmes multiporteuses sur canal sélectif en fréquence (Doctoral dissertation, Université de Cergy Pontoise).
- [20] Francis Cottet, TRAITEMENT DU SIGNAL SCIENCES SUP Série Aide-mémoire chapitre 4 : Modulation des signaux, pp .57-90.
- [21] Francis Cottet, Traitement des signaux et acquisition de données, chapitre 5 : La modulation , pp 85-117.
- [22] Tesserault, G. (2008) Modélisation multi-fréquences du canal de propagation (Doctoral dissertation, Poitiers).
- [23] Fading cannel Models – shodhganga.
- [24] J. D. Parsons. The Mobile Radio Propagation Channel. John Wiley, 2000.
- [25] Bhat, AA et Ahmad, SP (2020). UNE NOUVELLE GÉNÉRALISATION DE LA DISTRIBUTION DE RAYLEIGH : PROPRIÉTÉS ET APPLICATIONS. Revue pakistanaise des statistiques , 36 (3).
- [26] Mirza, A., Kabir, S. M., & Sheikh, S. A. (2015). Reduction of impulsive noise in OFDM system using adaptive algorithm. International Journal of Electronics and Communication Engineering, 9(6), 1427-1431.
- [27] Chitre, MA, Potter, JR, & Ong, SH (2006). Détection de signal optimale et quasi optimale dans le bruit ambiant dominé par les crevettes claquantes. IEEE Journal of oceanic engineering , 31 (2), 497-503.

- [28] Saunders, S. R., & Aragón-Zavala, A. (2007). Antennas and propagation for wireless communication systems. John Wiley & Sons.
- [29] Berry, LA (1981). Comprendre la formule canonique de Middleton pour le bruit de classe A. Transactions IEEE sur la compatibilité électromagnétique , (4), 337-344.
- [30] Ndo, G., Labeau, F., & Kassouf, M. (2013). Un modèle de Markov-Middleton pour le bruit impulsif en rafale : modélisation et conception du récepteur. IEEE Transactions on Power Delivery , 28 (4), 2317-2325.
- [31] Andrei, M., Trifina, L. et Tarniceriu, D. (2015). Capacité du canal de bruit impulsif Middleton de classe A avec entrée binaire. Mathématiques appliquées et sciences de l'information , 9 (3), 1291.
- [32] Andrei, M., Trifina, L. et Tarniceriu, D. (2014). Analyse des performances des canaux de relais de décodage et de transfert turbo-codés avec le bruit impulsif Middleton de classe A. Avancées en génie électrique et informatique , 14 (4), 35-43.
- [33] En ligne Ghosh, M. (1996). Analyse de l'effet du bruit impulsionnel sur les systèmes QAM multiporteuse et monoporteuse. Transactions IEEE sur les communications , 44 (2), 145-147.
- [34] Shao, M., & Nikias, CL (1993). Traitement du signal avec moments fractionnaires d'ordre inférieur : processus stables et leurs applications. Actes de l' IEEE , 81 (7), 986-1010.
- [35] Farhang-Boroujeny, B. (2013). Adaptive filters: theory and applications. John Wiley & Sons.
- [36] Brighta, JM et Killinger, S. (2019). Rectificatif à "Sur la recherche de caractéristiques représentatives des systèmes PV : collecte de données et analyse de l'azimut, de l'inclinaison, de la capacité, du rendement et de l'ombrage du système PV"[Sol. Énergie 173 (2018) 1087-1106]. Énergie solaire , 187 , 290-292.
- [37] Shinde, P. P., & Shah, S. (2018, August). A review of machine learning and deep learning applications. In 2018 Fourth international conference on computing communication control and automation (ICCUBEA) (pp. 1-6). IEEE.
- [38] Balázs HIDASI et al. «Session-based recommendations with recurrent neural networks». In ©2015). eprint: 1511.06939.
- [39] LONTCHI, C. M. CONTRIBUTION À LA PRÉDICTION DES PERTES DE PUISSANCE SUR UN RÉSEAU ÉLECTRIQUE PAR UN MODÈLE À BASE DE RÉSEAU DE NEURONES.

- [40] Rasamoelina, A. D., Adjailia, F., & Sinčák, P. (2020, January) A review of activation function for artificial neural network In 2020 IEEE 18<sup>th</sup> World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI) (pp. 281-286).
- [41] Mueller, J. P., & Massaron, L. (2019) Deep learning for dummies. John Wiley & Sons.
- [42] H. Kinsley and D. Kukiela, "Neural Networks from Scratch in Python," p. 658, 2020.
- [43] J. J. Heckman, R. Pinto, and P. A. Savelyev, "Artificial Intelligence, IOT and Machine Learning" *Angew. Chemie Int. Ed.* 6(11), 951–952., 1967.
- [44] Dertat, A. (2017). Applied deep learning-part 3: Autoencoders. Towards data science.
- [45] Boyer, A. (2010). « Canaux de transmission bruités. Institut national des sciences appliquées de Toulouse ».
- [46] Ezzaouia,(2018) « Allocation de ressource opportuniste dans les réseaux sans fil multicellulaires », Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique Bretagne Pays de la Loire.
- [47] Mark Veillette., Alpha-Stable distributions in MATLAB, Available at: <http://math.bu.edu/people/mveillet/html/alphastablepub.html>
- [48] J. P. Nolan (1997) "Numerical Calculation of Stable Densities and Distribution Functions" *Commun. Statist. - Stochastic Modles*, 13(4), 759-774.
- [49] Gonzalez, J. (1997). Robust Techniques for Wireless Communications in NonGaussian Environments. PhD Electrical Engin., University of Delaware, USA.
- [50] J. Gonzalez, J. Paredes, and G. Arce, "Zero-order statistics: A mathematical framework for the processing and characterization of very impulsive signals," *Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 54, no. 10, pp. 3839 –3851, Oct. 2006.
- [51] A. Felix, S. Cammerer, S. Dörner, J. Hoydis and S. Ten Brink, "OFDM-Autoencoder for End-to-End Learning of Communications Systems," 2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/SPAWC.2018.8445920.