



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI (UAC)

\*\*\*\*\*

Ecole Doctorale des Sciences De l'Ingénieur (ED-SDI)

\*\*\*\*\*

Master de Recherche Télécommunications et Réseaux Informatiques (TRI)

\*\*\*\*\*

**Rapport de Stage**

Thème :

**Performances de la SIM-OFDM dans un canal AWGN :  
Implémentation d'une nouvelle technique de décision**

Rédigé et soutenu le 05 Juillet 2023 par :

**MAGNIDET Fifamè Merci-Ange**

Ingénieure en Télécommunications option Photonique

JURY composé de :

<b>Pr ASSOGBA Kokou</b>	Enseignant Chercheur à l'EPAC/UAC, Maître de Conférences (CAMES)	Président du jury
<b>Dr SOTINDJO Patrick</b>	Enseignant Chercheur à ENSET/UNSTIM Maître Assistant (CAMES)	Examineur
<b>Pr DOSSOU Michel</b>	Enseignant Chercheur à l'EPAC/UAC Maître de Conférences (CAMES)	Superviseur
<b>Dr SANYA Max Fréjus</b>	Enseignant Chercheur à l'EPAC/UAC, Maître Assistant (CAMES)	Maître de mémoire



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI (UAC)

\*\*\*\*\*

Ecole Doctorale des Sciences De l'Ingénieur (ED-SDI)

\*\*\*\*\*

Master de Recherche Télécommunications et Réseaux Informatiques (TRI)

\*\*\*\*\*

**Rapport de Stage**

Thème :

**Performances de la SIM-OFDM dans un canal AWGN :  
Implémentation d'une nouvelle technique de décision**

Rédigé par :

**MAGNIDET Fifamè Merci-Ange**

Ingénieure en Télécommunications option Photonique

Encadré par :

**Dr SANYA Max Fréjus O.**

Maitre Assistant (CAMES), Enseignant Chercheur, Coordonnateur Adjoint du Master TRI/ED-SDI

Sous la direction de :

**Pr DOSSOU Michel**

Maitre de Conférences (CAMES), Enseignant Chercheur, Responsable de l'unité de recherche URPHORAN

**Laboratoire d'Electrotechnique, de Télécommunications et Informatique Appliquée (LETIA)**

# Sommaire

<b>Sommaire</b> .....	iii
<b>Dédicaces</b> .....	iv
<b>Remerciements</b> .....	v
<b>Liste des sigles et acronymes</b> .....	vi
<b>Table des figures</b> .....	ix
<b>Liste des tableaux</b> .....	x
<b>Résumé</b> .....	1
<b>Abstract</b> .....	2
<b>Introduction</b> .....	3
<b>Chapitre 1 : Introduction à la SIM-OFDM : description d'une nouvelle approche</b> .....	6
<b>1.1. Principe des modulations multiporteuses</b> .....	6
<b>1.2. Modulation OFDM</b> .....	7
<b>1.3. Subcarrier Index Modulation OFDM (SIM-OFDM)</b> .....	12
<b>1.4. Etat de l'art sur la SIM-OFDM</b> .....	17
<b>1.5. Canal AWGN</b> .....	22
<b>1.6. Approche proposée</b> .....	27
<b>Chapitre 2 : Implémentation et évaluation des performances de la nouvelle approche SIM-OFDM</b> .....	31
<b>2.1. Langage Python</b> .....	31
<b>2.2. Paramètres de simulation</b> .....	32
<b>2.3. Performances de la SIM-OFDM conventionnelle</b> .....	33
<b>2.4. Performances de la nouvelle approche SIM-OFDM</b> .....	33
<b>2.5. Etude comparative des performances « SIM new » versus « SIM conv »</b> .....	34
<b>2.6. Etude de performances PRP vs PSP de la nouvelle approche de la SIM-OFDM</b> .....	35
<b>Conclusion</b> .....	38
<b>Bibliographie</b> .....	39
<b>Table des matières</b> .....	46
<b>Annexe</b> .....	48

## Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- ✓ mes adorables parents ;
- ✓ ma gueule d'amour et notre petit Jojo.
- ✓ mes frères et sœurs ;

*Trouver ici une preuve de mon amour pour vous.*

# Remerciements

J'adresse mes sincères remerciements à l'endroit de :

- Dieu Tout Puissant pour ses innombrables grâces ;
- mes aimables parents Aurélien et Gèneviève ;
- Dr Max Fréjus SANYA : mon maitre de mémoire, mentor et modèle ;
- Pr Michel DOSSOU, mon superviseur ;
- Pr Tahirou DJARA, Coordonnateur du master TRI ;
- familles MAGNIDET, SANYA et ZANOU ;
- aux membres du jury ;
- mes camarades du master TRI ;
- tous ceux qui de loin ou de près m'ont aidée d'une façon ou d'une autre.

**Que le Seigneur vous le rende au centuple !**

## Liste des sigles et acronymes

<b>ACO-OFDM</b>	Asymmetrically Clipped Optical OFDM
<b>AWGN</b>	Additive White Gaussian Noise
<b>b/s/Hz</b>	Bit/seconde/Hertz
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>BOOK</b>	Bloc OOK
<b>BPSK</b>	Binary Phase Shift Keying
<b>BQAM</b>	Bloc QAM
<b>CCDF</b>	Cumulative Complementary Distribution Function
<b>CDF</b>	Cumulative Distribution Function
<b>CO-OFDM</b>	Coherent Optical OFDM
<b>CP-OFDM</b>	Cyclic Prefix OFDM
<b>CS</b>	Compressed Sensing
<b>CSI</b>	Channel State Information
<b>dB</b>	Décibel
<b>DEL</b>	Diode Électroluminescente
<b>DFT</b>	Discrete Fourier transform
<b>DML</b>	Directly Modulated Lasers
<b>DMT</b>	Discrete Multitone
<b>DSIM</b>	Differential Subcarrier Index Modulation
<b>DSP</b>	Densité Spectrale De Puissance
<b>Eb/No</b>	SNR binaire
<b>EE</b>	Energy Efficiency
<b>ESIM-OFDM</b>	Enhanced Subcarrier Index modulation OFDM
<b>EVM</b>	Error Vector Magnitude
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform
<b>FrFT-OFDM</b>	Fractional Fourier Transform OFDM
<b>FSK</b>	Frequency-Shift Keying
<b>GUI</b>	Graphical User Interface
<b>ICI</b>	Inter Carrier Interference
<b>IDE</b>	Integrated Development Environment
<b>IFFT</b>	Inverse fast Fourier transform

<b>IM-OFDM-SS</b>	Index Modulation-OFDM-Spread Spectrum
<b>IoT</b>	Internet of Things
<b>IRC</b>	Iterative Residual Check
<b>ISI</b>	Inter Symbol Interference
<b>O-OFDM-IM</b>	Optical OFDM-IM
<b>MC-CDMA</b>	Multi-Carrier Code Division Multiple Access
<b>MIMO</b>	Multiple-Input Multiple-Output
<b>MTD</b>	Machine Type Devices
<b>NC-OFDM</b>	N-continuous OFDM
<b>NOFDM-SIM</b>	Non-Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>OFDM-GIM</b>	OFDM- Generalization of Index-Modulation
<b>OFDM-IIM</b>	OFDM- Improved Index Modulation
<b>OFDM-IM</b>	OFDM-Index Modulation
<b>OFDM-SNM</b>	OFDM-Subcarrier Number Modulation
<b>OFDM-SPM</b>	OFDM-Subcarrier Power Modulation
<b>OOK</b>	On-Off Key
<b>OWC</b>	Optical Wireless Communication
<b>PAM</b>	Pulse-Amplitude Modulation
<b>PAPR</b>	Peak to Average Power Ratio
<b>PD</b>	Photodétecteur
<b>PON</b>	Passive Optical Network
<b>PRP</b>	Power Reallocation Policy
<b>PSK</b>	Phase Shift Keying
<b>PSP</b>	Power Saving Policy
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase Shift Keying
<b>RIM-OFDM</b>	Reduced Subcarrier Index Modulation OFDM
<b>RoF</b>	Radio over Fiber
<b>RS</b>	Reed-Solomon
<b>SAP</b>	Subcarrier Activation Pattern
<b>SE</b>	Spectral Efficiency
<b>SEFDM-SIM</b>	Spectral Efficient Frequency Division Multiplexing

<b>SFN</b>	Single-Frequency Networks
<b>SIM-OFDM</b>	Subcarrier Index Modulation OFDM
<b>SIPM-OFDM</b>	Subcarrier Index Power Modulation OFDM
<b>SM</b>	Spatial Modulation
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>TEB</b>	Taux d'Erreur Binaire
<b>TNT</b>	Télévision Numérique Terrestre
<b>T<sub>s</sub></b>	Temps symbole
<b>V2X</b>	Vehicle-to-Infrastructure
<b>VLC IM/DD</b>	Visible Light Communication Intensity Modulation / Direct Detection
<b>Wi-Fi</b>	Wireless Fidelity

## Table des figures

<b>Figure 1.1</b> : Modulateur OFDM [5].....	8
<b>Figure 1.2</b> : Spectre du signal OFDM [9].....	9
<b>Figure 1.3</b> : Démodulateur OFDM [5] .....	10
<b>Figure 1.4</b> : Principe de la SIM-OFDM [10].....	13
<b>Figure 1.5</b> : Schéma blocs d'une liaison SIM-OFDM en canal AWGN.....	15
<b>Figure 1.6</b> : Modèle du canal AWGN [63].....	23
<b>Figure 1.7</b> : Règle de décision de la SIM conventionnelle .....	28
<b>Figure 1.8</b> : Règle de décision de la nouvelle approche .....	29
<b>Figure 2.1</b> : $TEB=f(E_b/N_0)$ de la SIM conv pour différents QAM en mode PSP .....	33
<b>Figure 2.2</b> : $TEB=f(E_b/N_0)$ de la SIM new pour différents formats QAM en mode PSP .....	34
<b>Figure 2.3</b> : $TEB=f(E_b/N_0)$ en <b>SIM new</b> vs <b>SIM conv</b> pour différentes QAM en mode PSP .....	35
<b>Figure 2.4</b> : $TEB=f(E_b/N_0)$ de la « SIM new » selon deux configurations (PRP vs PSP) en 4 et 16 QAM.....	36
<b>Figure 2.5</b> : $TEB=f(E_b/N_0)$ de la « SIM new » selon deux configurations (PRP vs PSP) en 64 et 256 QAM.....	36
<b>Figure 2.6</b> : $TEB=f(E_b/N_0)$ de la « SIM new » selon PRP (50% de puissance) et PSP pour différents QAM .....	37

## Liste des tableaux

<i>Tableau 1.1</i> : SER théorique pour divers schémas de modulation numérique [63] .....	26
<i>Tableau 2.1</i> : Paramètres de simulation .....	32

## Résumé

Dans cette étude, nous avons implémenté dans un environnement « Python », la SIM-OFDM conventionnelle puis évalué ses performances dans un canal AWGN. Ensuite, nous avons utilisé une nouvelle approche SIM-OFDM moins complexe en temps de calcul comparée à l'approche conventionnelle pour la détermination de l'état actif ou non des sous-porteuses à la réception. Les résultats obtenus avec la nouvelle approche pour différentes QAM selon une politique d'économie d'énergie (PSP : Power Saving Policy) montrent des performances BER (Bit Error Rate) quasi-identiques, voire un gain de 1 à 2dB en termes de « rapport signal sur bruit binaire ( $E_b/N_0$ ) » comparées à l'approche conventionnelle. De plus, la nouvelle approche selon une politique de réutilisation de l'énergie des sous-porteuses non actives (PRP : Power Reallocation Policy) permet quelle que soit la QAM, de réaliser un gain en  $E_b/N_0$  d'environ 3dB comparée à la politique PSP. Ainsi, il en ressort que la nouvelle approche comparée à la conventionnelle, est un meilleur candidat car en plus d'être moins complexe, elle présente de meilleures performances en termes de BER à efficacité spectrale identique. De plus, pour des applications exigeantes en BER sans réelle limitation en termes d'énergie, la « PRP SIM-OFDM » serait le choix, le plus judicieux.

**Mots-clés :** SIM-OFDM, AWGN, QAM, PSP, PRP, BER.

## Abstract

In this work, we have implemented conventional SIM-OFDM in a Python environment and then evaluated its performance in an AWGN channel. We have then used a new SIM-OFDM approach, less complex in computation time than the conventional approach, to determine the active or inactive state of subcarriers at reception. The results obtained with the new approach for different QAM constellations based on a power saving policy (PSP) show almost identical bit error rate (BER) performance, and even a gain of 1 to 2dB in terms of energy-per-bit to noise power spectral density ( $E_b/N_0$ ) compared to the conventional approach. In addition, the new power reallocation policy (PRP) approach delivers an  $E_b/N_0$  gain of around 3dB for all QAM, compared to the PSP policy. This shows that the new approach is a better candidate than the conventional one, because in addition to being less complex, it offers better BER performance for the same spectral efficiency. Also, for better BER-demanding applications with no real energy limitations, SIM-OFDM PRP would be the wisest choice.

**Keywords:** SIM-OFDM, AWGN, QAM, PSP, PRP, BER.

# Introduction

L'histoire des techniques de modulation dans le domaine des télécommunications est très riche et complexe. Elle s'étend sur plus d'un siècle et a été marquée par de nombreuses avancées technologiques et scientifiques. La modulation est une technique qui permet de transporter des informations (voix, données, images, etc.) sur une onde porteuse (signal électromagnétique) afin de les transmettre à distance. Cette technique est utilisée dans les systèmes de télécommunication depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle. La croissance rapide des communications sans fil a conduit à la recherche de techniques de modulation plus efficaces et plus robustes pour lutter contre les problèmes liés à la propagation des ondes radio. L'une de ces techniques est la modulation « Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) » [1], qui utilise des sous-porteuses orthogonales pour transmettre des données à haute vitesse sur des canaux de communication à bande passante limitée. Cependant, la consommation d'énergie et la complexité de l'OFDM sont des limites importantes pour les applications à faible puissance, de même que l'interférence inter-symbole (ISI en anglais) et l'interférence entre porteuses (ICI en anglais) en raison de la nature à bande étroite de chaque sous-porteuse. Pour répondre à ces défis, une nouvelle technique de modulation a été proposée en 2009 [2], appelée « Subcarrier Index Modulation Orthogonal Frequency Division Multiplexing (SIM-OFDM) » pour une meilleure robustesse contre le délai d'étalement généré par un canal et un débit intéressant avec une consommation énergétique efficace [3]. Contrairement aux systèmes OFDM conventionnels, les indices des sous-porteuses dans la modulation SIM-OFDM sont également utilisés pour transmettre virtuellement les bits d'information. Ces bits OOK (On-Off Key) sont utilisés pour contrôler l'état des sous-porteuses. Cette structure innovante permet un meilleur compromis entre les performances du système et l'efficacité énergétique. De plus, le PAPR (Peak to Average Power Ratio) qui est un paramètre capital des signaux OFDM se voit réduit grâce à ce système [2][4][5]. La modulation SIM-OFDM peut être implémentée avec des modifications mineures à la conception de l'OFDM existant, ce qui peut réduire les coûts de développement et de mise en œuvre.

Cependant, avec tant d'avantages, la technique SIM-OFDM est confrontée à un problème majeur à savoir : la détection correcte des sous-porteuses actives ou non à la réception afin de pouvoir récupérer les bits du bloc OOK (On-Off Keying) et les symboles du bloc QAM (Quadrature Amplitude Modulation). Beaucoup d'études et très variées ont été effectuées par

bon nombre de chercheurs en vue d'apporter une amélioration aux performances de la SIM-OFDM. Ce travail s'inscrit dans la même logique en proposant un nouveau schéma pour la SIM-OFDM basée sur une nouvelle règle de décision pour déterminer si oui ou non, une sous-porteuse est active et éventuellement, améliorer le taux d'erreur binaire. D'où le thème « **Performances de la SIM-OFDM dans un canal AWGN : Implémentation d'une nouvelle technique de décision.** »

## **Objectifs**

L'objectif principal de cette étude consiste à évaluer les performances de la SIM-OFDM avec une nouvelle règle de décision pour l'état des sous-porteuses et ensuite d'améliorer le taux d'erreur binaire via une méthode de réallocation d'énergie. Pour cela, nous allons :

1. Etudier la technique SIM-OFDM, son principe, ses avantages et challenges, de même que son évolution ;
2. Implémenter la SIM-OFDM dans un environnement de programmation « open-source » tel que « Python » puis évaluer ses performances comparées à celles d'une nouvelle approche de décision.

# Plan du document

Le présent document est organisé en deux (02) chapitres :

## **Chapitre I** : Introduction à la SIM-OFDM : Description d'une nouvelle approche

Ce chapitre débute par une brève description des modulations multiporteuses, qui permettent de pallier les perturbations du canal causées par les trajets multiples, avant de présenter la technique OFDM. L'accent est mis sur la technique SIM-OFDM, en soulignant ses avantages et les défis qu'elle doit relever. Une revue de l'état de l'art sur la SIM-OFDM y est également effectuée pour présenter les différentes recherches déjà menées dans ce domaine. En outre, le canal AWGN (Additive White Gaussian Noise) est utilisé pour simuler les performances du système proposé dans le cadre de ce projet d'étude. Enfin, le chapitre finit par une description de l'approche proposée basée sur une nouvelle règle de décision de l'état des sous-porteuses.

## **Chapitre II** : Evaluation des performances de la nouvelle SIM-OFDM

Dans ce chapitre, une implémentation de la SIM-OFDM est faite avec Python dans un environnement « open-source ». Ensuite, une analyse comparative des performances de la SIM-OFDM conventionnelle avec la nouvelle approche SIM-OFDM est faite dans un canal AWGN. Pour finir, une étude comparative selon différentes politiques d'allocation de puissance est abordée avec la nouvelle approche SIM-OFDM pour investiguer sur les performances obtenues.

# Chapitre 1 : Introduction à la SIM-OFDM : description d'une nouvelle approche

## Introduction

Depuis l'invention de la modulation d'amplitude dans les années 1900, l'histoire des techniques de modulation dans les télécommunications a connu une évolution constante jusqu'à l'émergence de l'OFDM dans les années 1970. Cette technique de modulation numérique permet de transmettre plusieurs signaux simultanément sur un seul canal de transmission. Elle est largement utilisée dans les réseaux de télécommunications sans fil tels que : le Wi-Fi (Wireless Fidelity), la 4G et la 5G, ainsi que dans la diffusion de la télévision numérique terrestre (TNT). L'OFDM repose sur la transformée de Fourier discrète (DFT) et la propriété d'orthogonalité des signaux en bande passante. Des versions améliorées de cette technique de modulation ont été développées.

### 1.1. Principe des modulations multiporteuses

Les modulations multiporteuses offrent une solution pour simplifier le problème d'égalisation dans les canaux sélectifs en fréquence, où l'étalement des retards est important par rapport à la durée du symbole. Cette technique consiste à transmettre plusieurs symboles simultanément sur des ondes porteuses différentes. Ce qui permet d'utiliser des symboles plus longs sans affecter le débit, contrairement à la modulation monoporteuse. En utilisant un grand nombre,  $N$  de porteuses, la durée des symboles devient supérieure à l'étalement des retards, réduisant ainsi les interférences causées par les échos. De plus, la bande spectrale  $\Delta f$  est partagée entre les différentes porteuses, ce qui permet à chacune d'occuper une bande de fréquence inférieure à la bande de cohérence du canal, même si  $\Delta f$  est supérieure à la bande de cohérence  $B_x$  [5]. L'implémentation de la modulation et de la démodulation se fait à l'aide de la transformée de Fourier rapide FFT (Fast Fourier Transform). Il existe plusieurs techniques de modulation multiporteuse qui utilisent la FFT pour décomposer la fréquence de la signalisation multiporteuse. Voici quelques-unes de ces techniques :

- ✓ modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) : Il s'agit d'une technique de modulation numérique qui utilise une FFT pour créer des sous-porteuses orthogonales. La communication a lieu sur toutes ces sous-porteuses, puis les signaux sont combinés en un signal multiporteuse [1] ;

- ✓ modulation DMT (Discrete Multitone) : cette technique de modulation utilise également une FFT pour créer des sous-porteuses. Cependant, contrairement à l'OFDM, les sous-porteuses ne sont pas nécessairement orthogonales. La technologie DMT est souvent utilisée pour transmettre sur des canaux avec une bande passante limitée [6] ;
- ✓ modulation MC-CDMA (Multi-Carrier Code Division Multiple Access) : Cette technique de modulation utilise une combinaison de modulation multiporteuse et de multiplexage CDMA. Les utilisateurs partagent la même bande de fréquence en utilisant différents codes CDMA. Les signaux sont ensuite modulés sur les sous-porteuses et une FFT est utilisée pour séparer les signaux pour chaque utilisateur [7] ;
- ✓ etc.

En communications sans fil, l'OFDM s'est imposée comme l'une des techniques de modulation multiporteuse les plus utilisées. L'OFDM présente des caractéristiques uniques qui en font un choix attrayant pour les systèmes de communication modernes. Notre étude s'intéresse à la technique de modulation multiporteuse OFDM.

## 1.2. Modulation OFDM

Les réseaux sans fil font face à un problème majeur connu sous le nom d'évanouissement par trajets multiples. Afin de surmonter ce défi, une technique de modulation appelée OFDM basée sur la fonction orthogonale et la transformée de Fourier rapide inverse (IFFT) a été développée. Cette méthode permet de distribuer les données sur un grand nombre de sous-porteuses séparées en fréquence, avec des bandes qui se chevauchent. En utilisant la FFT pour moduler les données, les sous-porteuses sont maintenues orthogonales les unes par rapport aux autres, empêchant ainsi les démodulateurs de détecter des fréquences autres que les leurs. Le multiplexage fréquentiel regroupe les données numériques en  $M$  paquets appelés symboles OFDM, qui sont ensuite modulés simultanément sur chaque porteuse avec des données différentes. Considérons  $M$  séquences de données  $I_0, I_1, \dots, I_{M-1}$  et  $T_s$  la durée du symbole, c'est-à-dire le temps séparant 2 séquences de  $M$  données. Chaque point  $I_m$  module le signal avec la fréquence  $f_m$ . Chaque signal est écrit sous forme complexe :  $I_m e^{j2\pi m t / T_s}$ . Le signal total  $S_1(t)$ , qui correspond à l'information de l'ensemble du symbole OFDM, est la somme des signaux individuels [5] :

$$S_1(t) = \sum_{m=0}^{M-1} I_m[l] e^{j2\pi m \frac{t}{T_s}} \quad \text{Si } t \in [0, T_s] \text{ et } 0 \text{ ailleurs} \quad (1)$$

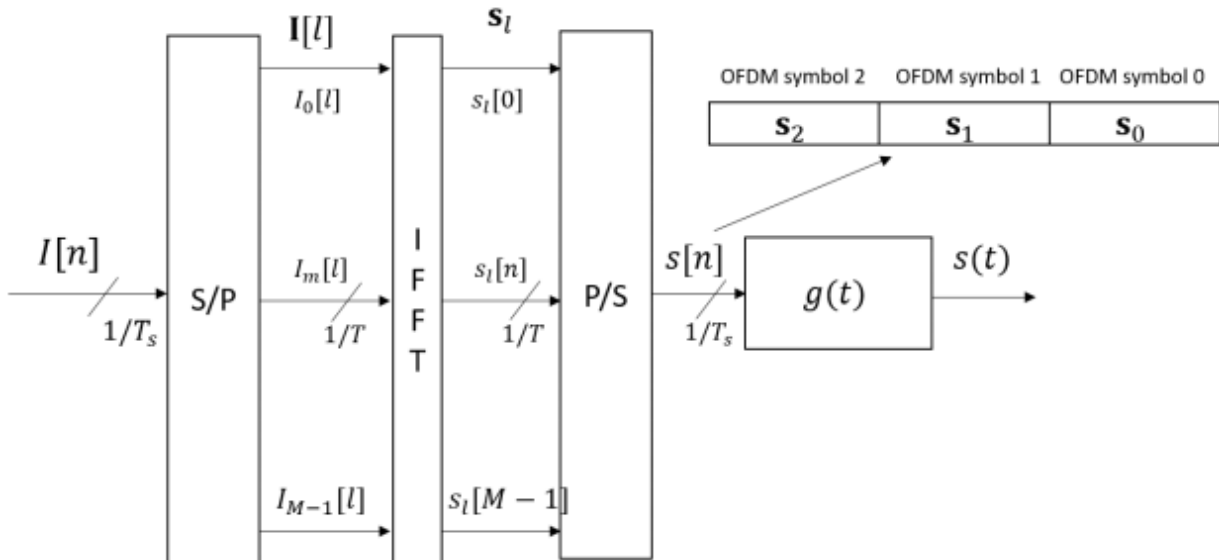
Le multiplexage est orthogonal si l'espace entre les fréquences est  $1/T_s$ .  $f_m = f_0 + \frac{m}{T_s}$  et le signal  $S(t)$  correspondant à l'ensemble des symboles OFDM est exprimé par :

$$S(t) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=0}^{M-1} I_m[l] g(t - lT) e^{j2\pi m \frac{t}{T_s}} \quad (2)$$

Où  $g(t)$  représente la fonction prototype (filtre rectangulaire) associée.

Les données numériques  $I_m$  sont des nombres complexes définis par une constellation de modulation d'amplitude en quadrature QAM multi-états (mappage) d'éléments binaires (4, 16, 64, ..., typiquement  $2^k$  états). Ces données sont des symboles formés par regroupement de  $k$  bits. Ceux-ci sont appelés symboles numériques. Ils ne doivent pas être confondus avec un symbole OFDM, qui est un regroupement de  $M$  symboles numériques sur  $M$  porteuses (Cf. Figure 1.1 ). La transformée de Fourier discrète de  $S(t)$  donne [5] :

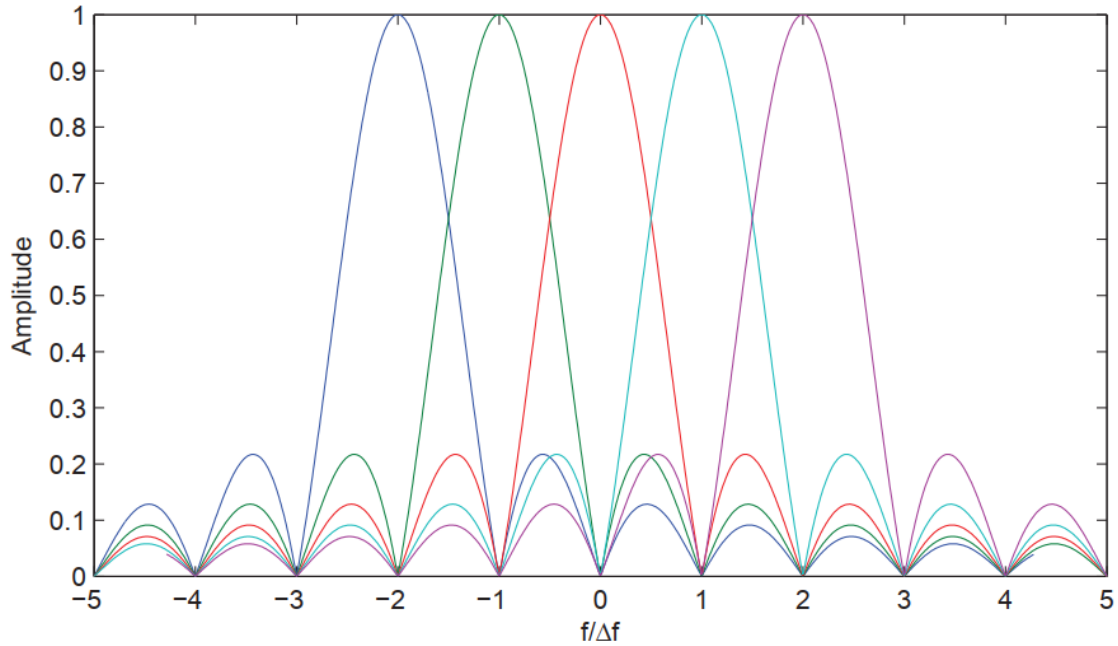
$$S[n] \equiv \sum_{l=-\infty}^{+\infty} S_l[n - lM] \quad (3)$$



**Figure 1.1** : Modulateur OFDM [5]

Pour chaque porteuse modulée dans une fenêtre de durée  $T_s$ , le spectre est la transformée de Fourier de la fenêtre et le spectre total est la somme des spectres individuels. La Figure 1.2 illustre la condition d'orthogonalité. En effet, l'espace entre chaque sous-porteuse  $1/T_s$  est tel

que, lorsque l'amplitude du spectre d'une sous-porteuse est à son maximum, l'amplitude de toutes les autres est annulée. Cette condition d'orthogonalité permet le chevauchement des spectres de différentes sous-porteuses.



**Figure 1.2** : Spectre du signal OFDM [9]

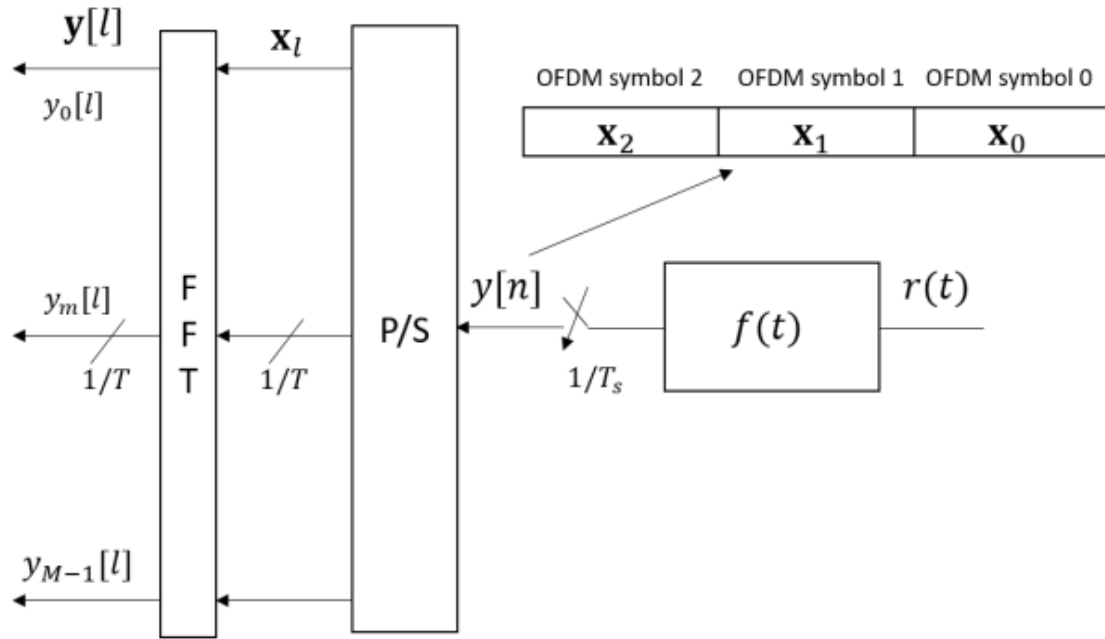
Le signal reçu  $r(t)$  n'est alors rien que le filtrage du signal émis  $s(t)$  par le canal de propagation  $c(t)$ . Ce signal est filtré par un filtre passe-bas  $f(t)$ , pour éliminer le bruit introduit par le canal comme l'indique la Figure 1.3 Chaque symbole OFDM devient [5]:

$$y_m(l) = \int_{lT_s}^{lT_s+T_s} r(t) e^{-j2\pi m \frac{t}{T_s}} dt \quad (1)$$

Le signal obtenu est ensuite échantillonné à une cadence de  $1/T_s$ , ce qui est simplement la Transformée de Fourier Discrète d'un bloc de taille  $M$  de symboles reçus [5] (Cf. Eq. 3).

$$y[n] = y(nT_s) \text{ avec } n \in [0, M - 1] \quad (2)$$

$$y_m[l] = \sum_{n=lM}^{lM+M-1} y[n - lM] e^{-j2\pi m \frac{n}{M}} \quad (3)$$



**Figure 1.3** : Démodulateur OFDM [5]

Le canal étant multitrajet, le signal reçu est  $y[n] = s[n] \otimes h[n]$  avec  $\otimes$  le produit de convolution et  $h(n)$  le canal de transmission défini par :

$$h[n] = g[n] \otimes c[n] \otimes f[n] \tag{7}$$

Les blocs de symboles reçus ne peuvent plus alors être indépendants à cause de l'interférence entre symboles (ISI).

Un intervalle de garde est ajouté après chaque symbole OFDM pour réduire les interférences entre les symboles OFDM. Cet intervalle de garde doit être plus long que le délai multi-trajet. Ainsi, les symboles d'un bloc ne doivent pas affecter les symboles du bloc suivant, donc le mélange entre symboles est exclu. Cependant, l'augmentation de l'intervalle de garde entraîne une perte d'efficacité en termes de débit [5]. La CP-OFDM (Cyclic Prefix-OFDM) utilise une portion d'échantillons qui est ajoutée au début de chaque symbole OFDM dans le but d'éviter l'interférence inter-symbole. Cette copie est appelée préfixe cyclique. Cela crée un symbole OFDM étendu qui est plus long que le symbole de données d'origine. Ce préfixe cyclique a deux propriétés : **éliminer les ISI** (Inter-Symbol Interference) **et simplifier l'égalisation**. Le préfixe cyclique et l'utilisation de la transformée de Fourier permettent de transformer le produit de convolution linéaire de l'égalisation, en un produit de convolution circulaire facile à égaliser. Celle-ci devient alors simplifiée, car il suffit d'effectuer des inversions scalaires au lieu d'inversions matricielles pour extraire le signal [9].

### **Avantages de l'OFDM**

- ✓ Utilisation efficace de la bande passante : L'OFDM utilise des sous-porteuses orthogonales qui peuvent être placées très proches les unes des autres, permettant ainsi une utilisation efficace de la bande passante disponible ;
- ✓ Robustesse face aux interférences : L'OFDM est moins sensible aux interférences de propagation que les autres techniques de modulation numérique. Les symboles OFDM sont espacés dans le domaine fréquentiel, ce qui permet une meilleure récupération des données en cas d'interférences ;
- ✓ Gestion de l'atténuation sélective de canal : L'OFDM permet de gérer l'atténuation sélective de canal en utilisant des techniques telles que la répartition des bits de données sur différentes sous-porteuses afin de minimiser les effets de l'atténuation ;
- ✓ Adaptabilité aux conditions de canal : L'OFDM permet une adaptation dynamique aux conditions de canal en modifiant le nombre de sous-porteuses ou la longueur de la période cyclique pour maintenir un taux d'erreur binaire acceptable.

### **Inconvénients de l'OFDM**

- ✓ Sensibilité à la synchronisation : il nécessite une synchronisation précise de l'horloge entre l'émetteur et le récepteur pour éviter la distorsion du signal. L'absence de synchronisation peut entraîner une perte de données et une détérioration de la qualité du signal ;
- ✓ Sensibilité à l'effet Doppler : il peut être sensible à l'effet Doppler dans les systèmes de communications mobiles. L'effet Doppler peut provoquer un décalage de fréquence qui peut affecter la qualité de la transmission ;
- ✓ Complexité de l'implémentation : il peut être plus complexe à mettre en œuvre que les autres techniques de modulation numérique. La complexité peut provenir de la nécessité de synchronisation précise, de la gestion de la dispersion des signaux ou de la gestion des distorsions non linéaires ;
- ✓ Energivore : l'enveloppe du signal OFDM présente de grands pics (PAPR élevé), ce qui sature rapidement les amplificateurs de puissance.

Ces dernières décennies ont été marquées par l'apparition de plusieurs versions de l'OFDM, dans le but de proposer des alternatives plus performantes en matière d'efficacité spectrale ou énergétique. L'OFDM continue d'être au centre de recherches approfondies. Dans ce qui suit, nous présentons une méthode qui a été mise au point pour atténuer les pics de puissance

générés par l'OFDM et améliorer son efficacité énergétique en exploitant une dimension supplémentaire : la SIM-OFDM.

### **1.3. Subcarrier Index Modulation OFDM (SIM-OFDM)**

La SIM-OFDM est une technique de modulation qui combine les avantages de la modulation par indice de sous-porteuses (SIM) et de l'OFDM. Elle permet de réduire le nombre de sous-porteuses utilisées pour transmettre les données, tout en maintenant une performance relativement élevée en termes d'efficacité spectrale et de robustesse face aux interférences. En OFDM conventionnel, les données sont divisées en plusieurs blocs et transmises simultanément sur différentes sous-porteuses orthogonales. Chaque sous-porteuse transporte une partie des données, ce qui permet de transmettre des données à un débit élevé tout en évitant l'interférence inter-symbole. Cependant, le nombre de sous-porteuses peut être élevé, ce qui peut rendre la transmission de données plus complexe et nécessiter une plus grande bande passante. En SIM-OFDM, les données sont également transmises sur des sous-porteuses orthogonales, mais toutes les sous-porteuses ne sont pas utilisées pour transmettre des données.

#### **1.3.1. Principe de la SIM-OFDM**

La SIM-OFDM s'inspire de la modulation spatiale (SM), qui utilise l'indice des antennes dans un système MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) comme dimension supplémentaire pour transmettre des données. Il est clair que cette dimension supplémentaire peut être étendue du domaine spatial au domaine fréquentiel dans un système OFDM [5]. La SIM-OFDM utilise une "nouvelle" dimension de la modulation OFDM basée sur l'état de chaque sous-porteuse : active ou passive. Cette dimension supplémentaire est utilisée pour transférer des informations au format OOK. Ce nouveau concept est motivé par une tentative d'optimisation de l'énergie, ce qui est crucial dans le climat actuel de « *communication verte* ». Chaque sous-porteuse active, reçoit l'énergie du symbole M-QAM et l'énergie du bit supplémentaire codée au format OOK [10].

Le principe de la SIM-OFDM consiste à diviser la trame binaire entrant, en différents blocs de  $N_{IFFT} \left( \frac{\log_2(M)}{2} + 1 \right)$  chacun, où  $N_{IFFT}$  représente le nombre total de sous-porteuses dans un paquet OFDM et M la taille de la constellation QAM utilisée. Chacun des blocs de bits précédents est ensuite divisé en deux parties :

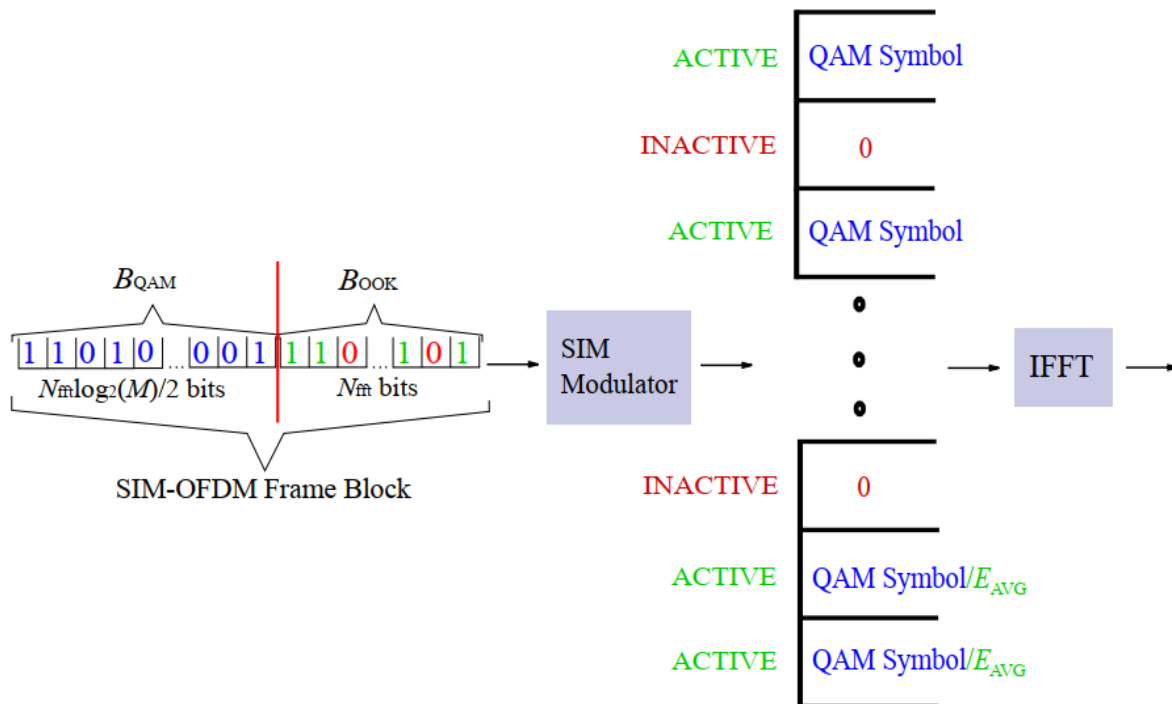
- les premiers  $N_{IFFT}$  bits de chaque bloc constituent un sous-bloc, qu'on appellera BOOK ;

- les  $N_{IFFT} \frac{\log_2(M)}{2}$  bits restants quant à eux forment le sous-bloc qui sera appelé BQAM, tel illustré à la Figure 1.4 .

Chaque sous-bloc BOOK est ensuite analysé pour déterminer le type de bit majoritaire : il s'agit du bit (soit **1** ou **0**) *apparaissant le plus dans BOOK*. Toutes les sous-porteuses d'un paquet OFDM dont les positions correspondent à celles du *bit sélectionné* (de type majoritaire) dans BOOK, sont classées comme « *actives* » tandis que les autres sont déclarées « *inactives* » (Cf. Figure 1.4 ). Les sous-porteuses inactives reçoivent une valeur d'amplitude de  $(0 + 0j)$  avec  $j = \sqrt{-1}$ . *Les premières  $\frac{N_{IFFT}}{2}$  sous-porteuses actives* se voient attribuer une amplitude correspondant à celle des symboles de la constellation M-QAM utilisée pour le codage du sous-bloc BQAM. *Le reste des sous-porteuses actives* est utilisé pour *signaler le type du bit majoritaire* au récepteur. Pour ce faire, ces sous-porteuses reçoivent une *amplitude correspondant à l'énergie moyenne de la constellation M-QAM utilisée*. Une autre alternative possible consiste à signaler le type de bit majoritaire soit :

- via des canaux de communication sécurisés ;
- ou en réservant une sous-porteuse spécifique et en transmettant la valeur souhaitée avec un rapport signal sur bruit (SNR) suffisamment élevé [2][3] [5].

Dans cette étude, on supposera qu'en employant l'une quelconque des alternatives sus-décrites, que le type du bit majoritaire de BOOK est connu du récepteur.



**Figure 1.4** : Principe de la SIM-OFDM [10]

A la réception (Cf. Figure 1.5 ), le signal subit une transformée de Fourier (FFT) comme en OFDM conventionnel. Ensuite, toutes les sous-porteuses sont scrutées :

- celles ayant une puissance supérieure à un seuil prédéfini (soigneusement choisi et devant être inférieur à la puissance minimale de la constellation utilisée) sont considérées comme « actives » et les autres comme « inactives » ;
- ensuite, chaque sous-bloc BOOK est reconstruit à partir de l'état des porteuses détectées et du bit majoritaire connu ;
- les  $N_{FFT}/2$  premières sous-porteuses actives sont démodulées selon le format M-QAM utilisé dans le but de reconstruire le sous-bloc BQAM correspondant [2][5][10].

La mesure du PAPR est un élément crucial dans les systèmes de communication sans fil utilisant l'OFDM, car il peut avoir une incidence sur la qualité de la transmission du signal. Le PAPR dépend du nombre de sous-porteuses utilisées pour la transmission des données ainsi que de l'indice de modulation appliqué à chaque sous-porteuse.

En général, l'augmentation du nombre de sous-porteuses ou de l'indice de modulation entraîne une augmentation du PAPR. Le PAPR en modulation SIM-OFDM vaut (Cf. Eq. 8) tandis que celui en système OFDM est présenté (Cf. Eq. 9) :

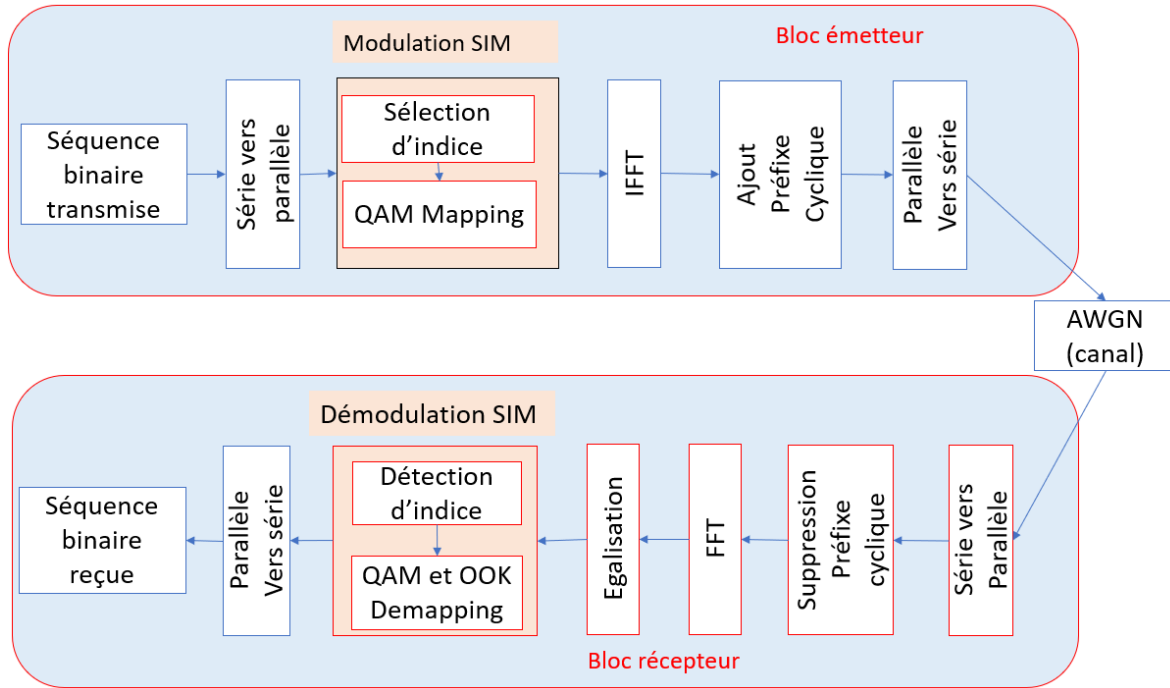
$$\mathbf{PAPR}_{SIM} = \mathbf{10 \log_{10}(N_{SIM})} \quad \mathbf{(8)}$$

$$\mathbf{PAPR}_{OFDM} = \mathbf{10 \log_{10}(N_{FFT})} \quad \mathbf{(9)}$$

$$\mathbf{Avec \frac{N_{FFT}}{2} \leq N_{SIM} < N_{FFT}} \quad \mathbf{(10)}$$

Où  $N_{SIM}$  correspond au nombre de sous-porteuses actives et  $N_{FFT}$  correspond au nombre total de sous-porteuses. On remarque clairement que la SIM-OFDM est la meilleure option face à l'OFDM en termes de réduction :

- du PAPR (rapport de puissance crête sur puissance moyenne) et ;
- des interférences inter-porteuses (ICI) parce qu'activant/désactivant certaines sous-porteuses OFDM.



**Figure 1.5** : Schéma blocs d'une liaison SIM-OFDM en canal AWGN

### 1.3.2. Politiques d'allocation de puissance en SIM-OFDM

Pour améliorer l'efficacité énergétique ou les performances en termes de taux d'erreur binaire des systèmes SIM-OFDM, deux politiques d'allocation de puissance peuvent être utilisées, étant donné que toutes les sous-porteuses ne sont pas actives. On distingue : la politique d'économie d'énergie PSP entendue « Power Saving Policy » et la politique de réallocation efficace d'énergie PRP entendue « Power Reallocation Policy ».

- **La politique d'économie d'énergie (PSP)** a pour objectif de minimiser la consommation d'énergie en réduisant la puissance transmise sur certaines sous-porteuses lorsqu'elles ne sont pas utilisées pour le transport de l'information. Ainsi, En PSP-SIM-OFDM, on supprime simplement la puissance initialement allouée aux sous-porteuses inactives, ce qui se traduit par une meilleure efficacité énergétique. Par conséquent, le rapport signal sur bruit moyen par sous-porteuse active en mode PSP, peut être écrit comme suit [2] :

$$SNR_{PSP} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_T}{E[N_{FFT}]} \right) - 10 \log_{10}(n) \quad (11)$$

Où  $P_T$  est la puissance totale allouée à un symbole OFDM émis,  $N_{IFFT}$  le nombre de sous-porteuses totales et  $n$  la puissance du bruit blanc gaussien additif et  $E[*]$ , la fonction « Espérance mathématique ».

- *La politique de redistribution efficace d'énergie (PRP)* consiste à améliorer la qualité de la transmission en réallouant la puissance initialement allouée aux sous-porteuses « inactives » de manière équitable aux sous-porteuses dites « actives ». Ainsi, la puissance allouée à chaque sous-porteuse active est augmentée, en comparaison avec l'OFDM conventionnel. Cela se traduit par une meilleure performance du taux d'erreur binaire (BER) [2] dû à un meilleur SNR en mode PRP (Cf. Eq.12) :

$$SNR_{PRP} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_T}{E [N_{maj}]} \right) - 10 \log_{10}(n) \quad (12)$$

Où  $N_{maj}$  représente le nombre de sous-porteuses actives.

L'allocation de puissance est cruciale pour garantir une transmission de qualité et une utilisation efficace des ressources dans les systèmes SIM-OFDM.

Malgré ses avantages, la SIM-OFDM est confrontée à certains challenges :

- Tout d'abord, il est difficile de déterminer le seuil approprié au niveau du récepteur lors de la détection des bits OOK, surtout lorsque le rapport signal sur bruit est faible. Le seuil doit être inférieur à la puissance du symbole M-QAM ayant la plus basse puissance, mais au-dessus de la puissance du bruit gaussien. Lorsqu'une sous-porteuse est mal détectée, cela peut conduire à une démodulation incorrecte des bits OOK ainsi qu'à des erreurs sur les symboles QAM suivants. Pour une démodulation correcte d'un symbole M-QAM, il est crucial de détecter correctement toutes les sous-porteuses précédentes, qu'elles soient actives ou inactives, en particulier avec l'augmentation du nombre de sous-porteuses ;
- Deuxièmement, le processus de décision du type de bit majoritaire au niveau de l'émission implique une complexité supplémentaire au système. En cas de corruption du bit majoritaire, la démodulation des bits OOK sera incorrecte [4][5][10].

Ces deux défis de la technologie SIM-OFDM ont incité de nombreux chercheurs ces dernières années à réfléchir à son amélioration en proposant des approches visant à augmenter son efficacité en termes de taux d'erreur binaire, d'efficacité spectrale et/ou énergétique, de synchronisation, et bien d'autres aspects [11]-[62].

#### 1.4. Etat de l'art sur la SIM-OFDM

De nombreux travaux de recherche ont été réalisés pour améliorer les performances des systèmes OFDM. Parmi eux, la modulation de l'indice des sous-porteuses OFDM, présentée dans [2], a suscité beaucoup d'intérêt dans la communauté de recherche en communications sans fil. Il ressort de cette étude, que cette méthode permet d'améliorer la probabilité d'erreur de 4 dB par rapport aux systèmes OFDM 4-QAM pour les données codées et non codées, sans politique d'économie d'énergie. En utilisant la politique d'économie d'énergie, un gain moyen de 1 dB peut être obtenu tout en réduisant la puissance d'émission de 3 dB par symbole OFDM. Les auteurs de [11] ont proposé une version améliorée de la SIM-OFDM, appelée ESIM-OFDM, qui consacre deux (02) sous-porteuses par bit de chaque sous-bloc BOOK. Ceci implique une diminution de la puissance de crête du système tout en évitant le phénomène de propagation d'erreur constatée quelque fois à la réception, en SIM-OFDM conventionnel. Dans [4], une nouvelle règle de décision pour déterminer l'état de la sous-porteuse a été proposée et évaluée, montrant une amélioration non négligeable du taux d'erreur binaire comparativement à la règle de décision conventionnelle basée sur la puissance des sous-porteuses pour l'ESIM-OFDM. La SIM-OFDM a également été démontrée comme étant robuste contre le bruit de phase des sources laser dans [3], et également tolérante à l'atténuation des non-linéarités de la fibre dans un système CO-OFDM (Coherent Optical OFDM) longue distance. Les performances de la probabilité de détection des erreurs et le TEB (Taux d'Erreur Binaire) d'index pour la SIM-OFDM généralisée ont été simulées et analysées dans [46]. Les auteurs dans [14], ont démontré une nouvelle technique SIM-OFDM basée sur la modulation par intervalles d'impulsions double face, présentant une efficacité spectrale supérieure à celle de la SIM-OFDM conventionnelle. De plus, dans [18], un schéma a été présenté pour l'utilisation de la SIM-OFDM dans une transmission en liaison montante multi-utilisateur dans les systèmes MIMO, permettant de réduire le PAPR, améliorer l'efficacité énergétique et les performances de détection tout en maintenant une bonne efficacité spectrale. Dans l'article [21], les auteurs ont proposé un système de modulation différentielle de l'indice de sous-porteuse (DSIM) pour éliminer la nécessité d'estimer le canal au niveau du récepteur, ce qui économise du temps et de l'énergie. Le bloc transmis est modulé à l'aide d'une modulation de signal ordinaire pour une partie, tandis que l'autre partie est transmise en sélectionnant une permutation spécifique des sous-porteuses actives. Cependant, la démodulation différentielle SIM proposée, présente un impact négatif sur la performance en termes d'erreur. Une autre version de la SIM-OFDM [22] utilise un schéma de modulation hybride QAM et FSK. L'idée derrière la modulation FSK visait l'amélioration considérable de l'efficacité spectrale (SE : Spectral Efficiency). Dans [24], l'effet de

l'étalement Doppler dans les systèmes SIM-OFDM a été comparé à celui de l'OFDM conventionnel. La SIM-OFDM a un PAPR moins élevé que l'OFDM conventionnel, mais elle reste une technique à fort PAPR. Dans [25], une nouvelle méthode SIM-OFDM est présentée avec un mappage sélectif des séquences de phase qui réduit efficacement le PAPR sans dégradation du TEB. Les auteurs dans [30] comparent l'OFDM avec les méthodes SIM-OFDM et ESIM-OFDM en termes de complexité, d'efficacité spectrale et de taux d'erreur binaire pour un canal AWGN. Les résultats de la simulation montrent que la SIM-OFDM et l'ESIM-OFDM réalisent des gains en Eb/No (rapport signal sur bruit binaire) par rapport à l'OFDM 4-QAM dans le cadre d'une politique PRP, mais l'OFDM traditionnel a une meilleure efficacité spectrale pour les ordres M-aires élevés. Des études de performances ont été effectuées dans [32] pour identifier la zone de fonctionnement bénéfique au schéma SIM-OFDM comparé à l'OFDM conventionnel, fournissant ainsi des lignes directrices pour le choix de déployer la SIM. Il a été démontré que la SIM-OFDM est avantageux pour un taux de transmission relativement faible, inférieur à 2 b/s/Hz. Dans l'article [37], des études de performances ont été menées non seulement en termes de probabilité de détection d'erreurs et de taux d'erreur binaire de la SIM-OFDM. Dans l'article [39], les auteurs ont présenté un système de radio sur fibre (RoF) utilisant un signal SIM-OFDM, qui a été expérimentalement démontré. Les résultats ont montré que l'efficacité spectrale de la SIM-OFDM peut être améliorée jusqu'à 14,5 % pour 128 sous-porteuses avec 21 sous-porteuses silencieuses ou 15,6 % pour 512 sous-porteuses avec 97 sous-porteuses silencieuses, par rapport aux systèmes OFDM conventionnels. Dans l'article [44], une méthode de génération de constellations QAM en couches est proposée pour les systèmes SIM-OFDM. Il ressort de l'article [55], la réalisation d'un prototype expérimental démontrant un système VLC IM/DD (Visible Light Communication Intensity Modulation / Direct Detection) utilisant la SIM-OFDM. Dans l'article [36], un schéma de modulation associant la technique SIM au multiplexage OFDM optique à écrêtage asymétrique (ACO-OFDM) a été proposé pour les systèmes de communication optique sans fil (OWC). Les auteurs de [45], ont développé une SIM-OFDM adaptative utilisant le codage entropique pour améliorer les performances dudit système. Enfin, dans l'article [51], une nouvelle séquence de données pilotes Zadoff-Chu a été proposée pour l'estimation du canal en liaison SIM-OFDM. Il en ressort que la solution proposée est plus performante que l'utilisation de symboles pilotes utilisés en SIM-OFDM conventionnel.

Pour pallier le problème de fuite de puissance élevée, causé par les lobes secondaires présents dans le spectre de la SIM-OFDM, les auteurs dans [53] ont introduit le concept de l'OFDM N-continu (baptisé NC-OFDM) pour supprimer ces lobes secondaires et améliorer les

performances en termes d'erreur. L'article [56] a utilisé la technique SIM pour réduire les interférences entre les porteuses et améliorer le taux d'erreur binaire (BER) des systèmes OFDM basés sur la transformée de Fourier fractionnaire (FrFT-OFDM). Pour améliorer l'efficacité énergétique du système SIM-OFDM, les auteurs dans [57] proposent une stratégie de signalisation assistée par la détection comprimée (CS) et d'un algorithme de détection peu complexe, appelé détecteur basé sur la vérification itérative des résidus (IRC). Dans l'article [58], les auteurs ont présenté un nouvel algorithme de SIM réduit-OFDM (RIM-OFDM), qui offre une réduction considérable de la valeur du PAPR et une meilleure utilisation de la bande passante. L'article [60] propose un système SIM-OFDM à haute efficacité spectrale (SEFDM-SIM) pour les réseaux sans fil à entrées et sorties multiples (MIMO) qui s'est avéré plus performant que la MIMO-OFDM et la MIMO-OFDM-SIM en termes de TEB. L'article [59] a introduit une nouvelle SIM-OFDM utilisant des pilotes superposés de suppression de données pour améliorer la détection des pilotes et exploiter efficacement l'indice des sous-porteuses correspondant aux pilotes superposés, pour transmettre des informations supplémentaires. Par ailleurs, l'article [61] a proposé un nouveau schéma de la SIM-OFDM à spectre étalé pour améliorer la diversité par rapport aux schémas basés sur la SIM conventionnelle. Les résultats de simulation ont montré de bonnes performances en matière d'erreurs. Cependant, cette approche est moins efficace en termes d'efficacité spectrale comparé à l'OFDM classique et à l'OFDM-IM (OFDM-Index Modulation).

D'autre part, l'article [54] présente une expérimentation de l'OFDM optique utilisant une allocation de puissance basée sur l'indice des sous-porteuses (SIPM-OFDM). Il en ressort que la SIPM-OFDM présente une performance en taux d'erreur binaire, supérieure à celle de la 8PSK-OFDM lorsque le rapport entre les seuils de puissance est de 3. Le débit binaire du signal SIPM-OFDM est également supérieur à celui de la 8-PSK-OFDM, atteignant 3,3Gb/s, soit une augmentation d'environ 17%. Dans une autre étude [47], une nouvelle technique de transmission, appelée OFDM optique modulé par l'indice de puissance de la sous-porteuse avec double multiplexage par superposition (SIPM-OOFDM-DSPM), a été proposée en réseaux optiques passifs (PON). Ladite technique améliore considérablement la capacité de transmission du signal, le budget de puissance du système et la tolérance de performance à la dispersion chromatique et à la non-linéarité de la fibre par rapport aux systèmes PON IMDD simples. L'article [43] propose une nouvelle technique de modulation OFDM appelée modulation de puissance de sous-porteuse (OFDM-SPM), qui vise à offrir une transmission de données à haut rendement spectral avec une faible latence et une complexité réduite pour les systèmes de communication sans fil 6G. Cette technique utilise la puissance des sous-porteuses dans les blocs OFDM comme troisième dimension pour transmettre des bits

d'information supplémentaires, tout en réduisant la complexité et la latence par rapport aux systèmes conventionnels. Le système proposé améliore considérablement l'efficacité spectrale, pouvant la doubler. De plus, l'OFDM-SPM présente une complexité négligeable dans le système, n'entraîne pas de propagation d'erreur, réduit le délai de transmission et diminue la puissance de transmission de moitié. Dans l'objectif de vérifier si les avantages de l'OFDM-SPM persistent lorsqu'il est associé à des schémas de modulation d'ordre supérieur, notamment des schémas de constellation de signaux bidimensionnels tels que la M-aire PSK, les auteurs dans [35] ont combiné l'OFDM-SPM avec la modulation QPSK (Quadrature PSK). L'analyse des performances de ce système a été réalisée pour différentes politiques d'attribution de puissance dans des canaux AWGN et de Rayleigh. Il a été démontré que l'OFDM-SPM peut être utilisé avec des schémas de modulation d'ordre supérieur tout en conservant tous les avantages de l'OFDM-SPM avec BPSK. Cela confère à l'OFDM-SPM un avantage unique par rapport à l'OFDM-IM qui perd en efficacité spectrale lorsque l'ordre de modulation devient plus élevé.

Dans [28], une technique améliorée OFDM-SNM a été proposée, qui utilise la disposition flexible des sous-porteuses pour obtenir un gain de codage dans la région des SNR élevés. Une méthodologie a été définie pour optimiser le schéma d'activation des sous-porteuses (SAP) en utilisant les informations d'état de canal instantanées (CSI), où les sous-porteuses avec des gains de puissance de canal plus élevés ont la priorité d'être activées. L'OFDM-SNM améliorée est très fiable et est un candidat prometteur pour l'Internet des objets (IoT) avec des dispositifs MTD (Machine Type Devices) soumis à une atténuation lente. Dans [62], un système NOFDM-SIM pré-codé est proposé pour augmenter l'efficacité spectrale des systèmes multiporteuses. Les résultats de simulation montrent que le système NOFDM-SIM pré-codé a un PAPR similaire à celui des systèmes SIM-OFDM équivalents, tout en atteignant la limite du taux d'erreur binaire de l'OFDM zéro ICI dans un contexte de décodage du canal.

Peu de temps après l'avènement de la SIM-OFDM, un nouveau concept appelé OFDM-IM (OFDM with Index Modulation) [12][41] a été introduit et suscite maintenant autant d'intérêt que la SIM. Ce schéma a été conçu pour fonctionner sur des canaux soumis à des évanouissements sélectifs en fréquence et à une variation temporelle rapide. En OFDM-IM, l'information est transmise non seulement par des constellations M-aires comme en OFDM classique, mais également par les indices des sous-porteuses qui sont activés en fonction du flux binaire entrant, tout comme en SIM-OFDM. Bien que le système proposé permette d'obtenir un taux d'erreur inférieur à celui de l'OFDM classique dans des conditions

de canal idéales et réalistes, il est bien plus complexe que la SIM-OFDM. Des versions améliorées ont été proposées pour augmenter la robustesse de l'OFDM-IM dans [15], et pour optimiser son efficacité énergétique dans [13][16][17]. De plus, un nouveau schéma appelé « Layered Orthogonal Frequency Division Multiplexing With Index Modulation » a été proposé [19] pour améliorer l'efficacité spectrale des systèmes OFDM-IM. De même [20], les performances de l'OFDM-IM dans les réseaux multi-utilisateurs pour les scénarios de liaisons montante et descendante ont été étudiées. Pour améliorer davantage l'OFDM-IM, des travaux de recherche ont proposé plusieurs schémas innovants. Tout d'abord, dans [23], un schéma d'entrelacement simple et efficace est introduit au niveau des sous-porteuses pour augmenter les distances euclidiennes entre les symboles modulés. Ensuite, dans [26], une nouvelle proposition d'un schéma d'étalement du spectre à multiplexage orthogonal par répartition en fréquence modulé par l'indice (IM-OFDM-SS) est présentée. Un nouveau schéma de transmission est proposé dans [27] pour une transmission efficace des données en transmettant des bits d'information supplémentaires par changement conjoint de l'index et du nombre de sous-porteuses actives dans chaque sous-bloc OFDM. Une version améliorée de l'OFDM-IM est également notée dans [31] intégrant des sous-porteuses silencieuses et des constellations à signaux multiples dans le but de résoudre partiellement le problème de manque de diversité de transmission. Toujours pour améliorer les performances de l'OFDM-IM, des auteurs ont proposé d'y intégrer un algorithme d'allocation de sous-porteuse simplifié [33]. Ensuite, le codage de Reed-Solomon (RS) [34] y est implémenté dans un contexte de VLC (Communication par la lumière visible). Dans [38], un nouveau schéma est proposé pour l'OFDM-IM, qui non seulement résout les problèmes d'interférence inter-canaux (ICI), mais offre également un compromis intéressant entre l'efficacité spectrale et les performances d'annulation de l'ICI. En [40], une généralisation de l'OFDM-IM appelée OFDM avec modulation à index généralisé (OFDM-GIM) a été proposée. Cette généralisation permet d'avoir un nombre variable de sous-porteuses actives dans chaque sous-bloc OFDM, ce qui permet d'obtenir une efficacité spectrale supérieure à celle de l'OFDM-IM. Dans [42], une technique OFDM avec IM généralisée (OFDM-GIM) est présentée pour obtenir une efficacité spectrale supérieure à celle de l'OFDM-IIM, tout en réduisant la complexité de détection et compatible aux communications à faible débit de données avec des exigences élevées en matière d'efficacité énergétique. En outre, un cadre de détection basé sur un réseau neuronal convolutif est proposé en communication sans fil basé OFDM-IM [48]. Pour les systèmes de communication en lumière visible (VLC) utilisant des diodes électroluminescentes (DEL) et des photodétecteurs (PD), l'O-OFDM-IM a été proposé dans [49]. Enfin, pour atténuer l'interférence entre les porteuses causée par les effets Doppler dans les communications de

« véhicule à véhicule » et « véhicule à infrastructure (V2X) », une combinaison de la SM-OFDM et de la SIM-OFDM a été proposée dans [29]. Le document [50] présente une vue d'ensemble de la technique de modulation OFDM-IM ainsi que ses différentes évolutions et spécificités. Des défis sont abordés et différentes orientations de recherche sont envisagées pour améliorer l'efficacité de l'OFDM-IM et explorer ses applications potentielles dans les réseaux sans fil du futur.

Il est important de noter que la technique « Subcarrier Index Modulation » est très prometteuse et a suscité un grand intérêt dans la communauté de recherche. L'état de l'art ci-dessus donne une idée sur les dernières avancées de cette technique et ses applications potentielles, en particulier dans les systèmes de communication sans fil. Les études effectuées dans la littérature utilisent plusieurs canaux de transmission et en grand nombre, le canal AWGN pour la simulation des schémas proposés. C'est l'objet de la section suivante.

## **1.5. Canal AWGN**

Le canal AWGN (Additive White Gaussian Noise) est un modèle couramment utilisé pour caractériser le bruit dans les systèmes de communication. C'est un modèle théorique qui simplifie la modélisation des perturbations aléatoires qui affectent les signaux transmis. Ce modèle suppose que le bruit dans le canal de transmission est blanc et gaussien, c'est-à-dire qu'il est aléatoire, sans mémoire et que sa distribution suit une loi normale. Le bruit blanc est un signal aléatoire dont les valeurs à chaque instant sont totalement indépendantes entre elles. Autrement dit, il ne présente aucune corrélation entre les différentes valeurs qu'il prend à différents instants. Il est souvent utilisé pour modéliser les fluctuations aléatoires dans un système. Par exemple, dans le contexte de la communication sans fil, le bruit blanc peut être utilisé pour modéliser les fluctuations du signal, dues à l'interférence avec d'autres signaux.

### **1.5.1. Modélisation du canal AWGN**

La modélisation du canal AWGN peut être réalisée en utilisant des techniques de génération de nombres aléatoires conformes à une distribution gaussienne. Ces nombres aléatoires sont ensuite ajoutés au signal transmis pour simuler les perturbations causées par le bruit. La distribution gaussienne est une distribution statistique qui suit une courbe en forme de cloche. Elle est souvent utilisée pour modéliser des variables aléatoires réelles. Elle est caractérisée par deux paramètres : la moyenne et l'écart type (Cf. Figure 1.6 ).

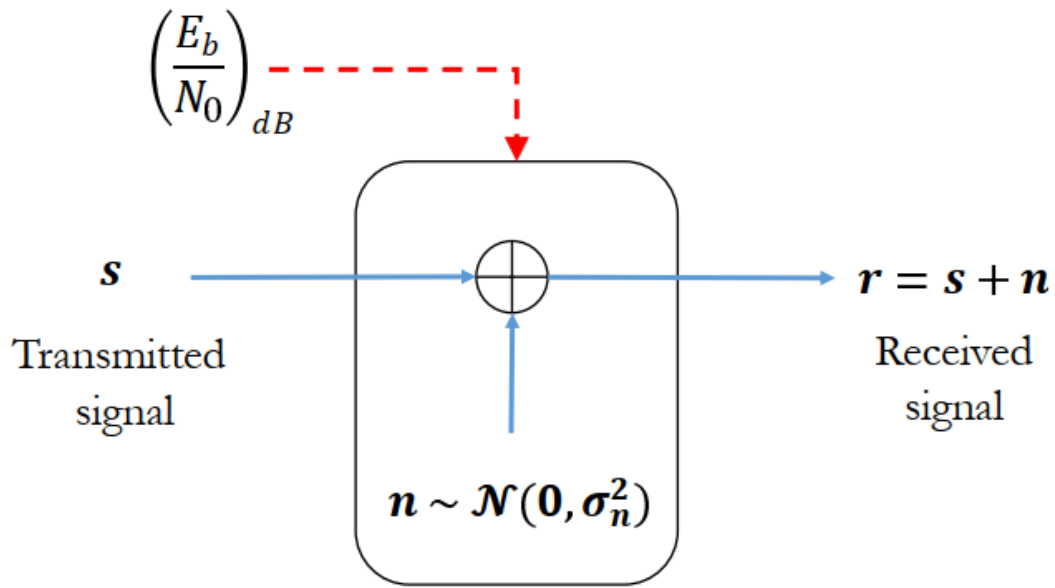


Figure 1.6 : Modèle du canal AWGN [63]

La moyenne représente la valeur attendue de la distribution, tandis que l'écart type mesure la dispersion des valeurs autour de la moyenne. Dans le cas du canal AWGN, le bruit est supposé suivre une distribution gaussienne et être additif, c'est-à-dire qu'il s'ajoute au signal transmis sans altérer sa forme. Ainsi, le signal reçu par le récepteur est une somme du signal transmis et du bruit.

Pour simuler un rapport signal sur bruit (SNR) spécifique dans des simulations de performance, il est nécessaire d'ajouter un bruit aléatoire de niveau spécifique au signal modulé émis par le transmetteur. Le niveau de bruit généré dépend du niveau SNR souhaité, qui est généralement fourni en entrée pour de telles simulations. En pratique, les SNR sont exprimés en dB [63].

### 1.5.2. Critères d'évaluation de performance

Dans le domaine des télécommunications, l'évaluation de la qualité de transmission revêt une importance capitale. Les réseaux de télécommunication sont conçus pour acheminer des informations sur de longues distances, en utilisant différents types de médias de transmission tels que les fils de cuivre, les fibres optiques ou les ondes radio. Pour assurer une communication efficace, il est essentiel de disposer d'un critère d'évaluation permettant d'estimer les performances de la transmission. Le critère d'évaluation d'une transmission en télécommunications se concentre sur plusieurs aspects clés qui déterminent la qualité globale du système de communication. Ces aspects peuvent inclure le SNR, le taux d'erreur,

l'efficacité énergétique et ou spectrale, la vitesse de transmission des données, la fiabilité de la connexion, la robustesse face aux interférences et aux perturbations, ainsi que la latence ou le délai de propagation etc.

### 1.5.2.1. Rapport signal sur bruit (SNR)

En supposant un canal de bande passante  $B$ , une puissance de signal reçu  $P_r$  et une densité spectrale de puissance (DSP) de bruit  $\frac{N_0}{2}$ , le SNR est donné par l'équation 13 :

$$\gamma = \frac{P_r}{N_0 \times B} \quad (13)$$

Soient  $E_b$  l'énergie par bit du signal et  $E_s$  l'énergie par symbole alors  $\gamma_b = E_b/N_0$  et  $\gamma_s = E_s/N_0$  représentent respectivement le SNR par bit et le SNR par symbole. Pour un schéma de modulation M-aire non codé avec  $k = \log_2(M)$  bits par symbole, l'énergie moyenne du symbole modulé est donnée par :

$$E_s = k \times E_b \quad (14)$$

Le SNR par symbole est donné par :

$$\gamma_s = \frac{E_s}{N_0} = k \times \frac{E_b}{N_0} = k \times \gamma_b \quad (15)$$

La puissance moyenne électrique du signal  $s$  (s'assurer qu'il soit un vecteur) à l'entrée du canal vaut :

$$P = L \times \frac{1}{N} \times \sum_{i=0}^{N-1} |s_i|^2 \quad (16)$$

Où  $N$  est la longueur du signal et  $L$  le facteur de suréchantillonnage.

La densité spectrale de puissance du bruit est calculée comme suit :

$$N_0 = \frac{P}{\gamma} \quad (17)$$

Il faut noter que  $\gamma$  fait référence à  $\gamma_b$  pour les cas où  $k$  le nombre de bit par symbole vaut 1 (comme en BPSK) et à  $\gamma_s$  pour les cas où  $k > 2$ .

Le bruit aléatoire gaussien  $\mathbf{n}$ , de longueur  $N$  dont les échantillons suivent une distribution normale avec une moyenne nulle et un écart-type  $\sigma$  tel que  $\sigma^2 = \frac{N_0}{2}$  est donné par :

$$\mathbf{n} = \begin{cases} \sigma \times [\mathcal{N}_N(\mathbf{0}, \mathbf{1})] & \text{si } s \text{ est réel} \\ \sigma \times [\mathcal{N}_N(\mathbf{0}, \mathbf{1}) + j * \mathcal{N}_N(\mathbf{0}, \mathbf{1})] & \text{si } s \text{ est complexe} \end{cases} \quad (18)$$

Le signal bruité à la sortie du canal est déterminé par :

$$\mathbf{r} = \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (19)$$

### 1.5.2.2. Taux d'erreur binaire

Le taux d'erreur binaire (ou TEB et en anglais, BER : Bit Error Rate) est le critère basique utilisé pour évaluer la qualité de la transmission d'un signal numérique dans un canal de communication. Il représente le pourcentage de bits erronés après la transmission par rapport au nombre total de bits transmis. Le taux d'erreur binaire est une mesure importante de la qualité de la transmission car il peut être utilisé pour déterminer si la transmission est suffisamment robuste pour transmettre les données de manière fiable. En général, plus le TEB est faible, meilleure est la qualité de la transmission. Il se détermine de plusieurs façons parmi lesquelles on peut citer (les plus utilisées) :

- la méthode de Monte-Carlo ;
- la méthode de l'EVM (Error Vector Magnitude).

La valeur maximale du taux d'erreur binaire exigée en communications sans fil doit être inférieure à  $10^{-9}$  mais cette valeur est acceptable à  $10^{-6}$  sous réserve d'utilisation d'un code correcteur d'erreur [64].

### 1.5.2.3. Taux d'erreur symbole

Contrairement au BER, qui mesure le taux d'erreur binaire pour chaque bit transmis, le taux d'erreur symbole (ou SER : Symbol Error Rate) mesure le taux d'erreur commis sur un nombre total de symboles transmis. Un symbole peut être défini comme un groupe de bits qui

est transmis ensemble et qui représente une information unique. Le calcul du SER dépend de la modulation utilisée pour transmettre les données. Le Tableau 1.1 donne un aperçu des expressions du taux d'erreur symbole pour certains schémas de modulation.

Comme le BER, le SER est une mesure importante de la qualité de transmission d'un signal numérique. En général, plus le SER est faible, meilleure est la qualité de la transmission. Le SER est particulièrement important pour les communications numériques sans fil, où les conditions de propagation peuvent affecter la qualité de la transmission.

**Tableau 1.1** : SER théorique pour divers schémas de modulation numérique [63]

<b>Modulation</b>	<b>SER</b>
MPAM	$2\left(1 - \frac{1}{M}\right) Q\left(\sqrt{\frac{6}{M^2 - 1}} \gamma_s\right)$
BPSK	$Q(\sqrt{2\gamma_s})$
QPSK	$2Q(\sqrt{2\gamma_b}) - Q^2(\sqrt{2\gamma_b})$
MPSK (M>4)	$2Q\left[\sin\left(\frac{\pi}{M}\right)\sqrt{2\gamma_s}\right]$
MQAM	$1 - \left[1 - 2\left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q\left(\sqrt{\frac{3\gamma_s}{(M-1)}}\right)\right]^2$
MFSK (non cohérent)	$\sum_{i=1}^{M-1} \frac{(-1)^{i+1}}{i+1} \binom{M-1}{i} e^{\left(-\frac{i}{i+1}\gamma_s\right)}$
MFSK (cohérent)	$1 - \int_{-\infty}^{+\infty} [Q(-q - \sqrt{2\gamma_s})]^{M-1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-q^2}{2}\right)} dq$

Avec  $Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)$  (20)

Et **M**, la taille de la constellation de la constellation utilisée.

#### 1.5.2.4. PAPR

Le PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) est une mesure de la crête de la puissance d'un signal qui est utilisée dans les systèmes de communication sans fil à large bande et dans les

systèmes de communication à modulation multiporteuse. Le PAPR mesure le ratio entre la puissance crête maximale et la puissance moyenne du signal. Les signaux avec un PAPR élevé ont une puissance crête maximale plus élevée que les signaux à PAPR faible. Ces signaux peuvent être plus difficiles à amplifier sans distorsion et également nécessiter une plus grande réserve de puissance pour éviter la saturation de l'amplificateur. Le PAPR est exprimé comme suit :

$$PAPR = \frac{\max(|x(n)|^2)}{E(|x(n)|^2)} \quad (21)$$

Où  $n=0, 1, \dots, N-1$  avec  $N$  le nombre de sous-porteuses de l'IFFT. Le PAPR est évalué généralement par la fonction de distribution CDF (Cumulative Distribution Function) ou avec la fonction de distribution cumulative complémentaire CCDF (Cumulative Complementary Distribution Function). La CCDF est la plus utilisée pour montrer la distribution du PAPR. Elle désigne la probabilité que le PAPR soit supérieur à une valeur  $PAPR_0$  donnée telle que :

$$CCDF(PAPR_0) = P_r(PAPR > PAPR_0) \quad (22)$$

Avec  $P_r$  (\*) la fonction de probabilité.

Une faible valeur de PAPR est souhaitée dans les systèmes de communication sans fil, car permettant de réduire les distorsions du signal. Ainsi, il sera possible d'améliorer l'efficacité énergétique et augmenter la capacité du canal. Cependant, il peut être difficile de réduire le PAPR sans affecter les performances de transmission, et les techniques de réduction du PAPR peuvent avoir des coûts de traitement plus élevés. Il convient de noter que le PAPR n'est pas une mesure de la qualité de transmission elle-même, mais plutôt une mesure de la puissance du signal qui peut avoir des implications pour la qualité de la transmission.

Dans la section ci-après, l'ensemble des éléments précédemment abordés a été considéré tout en décrivant l'approche ayant constitué l'ossature de cette étude.

## **1.6. Approche proposée**

S'inspirant de la règle de décision proposée et appliquée à l'ESIM-OFDM dans [4], nous proposons dans cette étude l'utilisation d'une nouvelle règle de décision pour la SIM-OFDM conventionnelle. En effet, pour déterminer laquelle des sous-porteuses est active ou non en

ESIM, les auteurs proposent de considérer plutôt une autre forme de l'amplitude des sous-porteuses au lieu de la puissance électrique ou l'amplitude.

### 1.6.1. Description

En SIM-OFDM conventionnelle, il faut choisir un seuil inférieur à l'énergie minimale de la constellation choisie et les sous-porteuses ayant une puissance inférieure à ce seuil, sont déclarées « inactives » tandis que les autres sont dites « actives ». La Figure 1.7 illustre ce concept pour une constellation 4-QAM : le cercle décrit la plage de symboles des sous-porteuses inactives et l'extérieur du cercle décrit la plage de symboles des sous-porteuses actives pour ledit format 4-QAM.

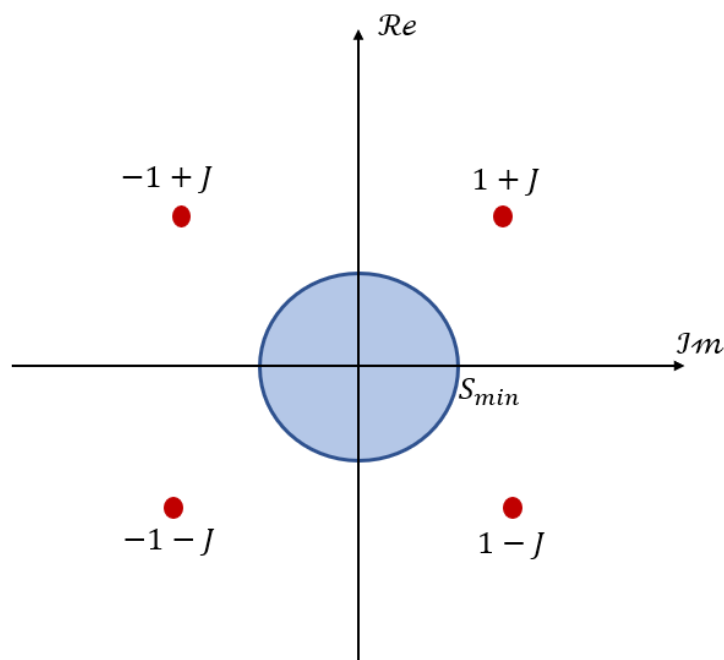


Figure 1.7 : Règle de décision de la SIM conventionnelle

Avec  $S_{min}$  le seuil choisi.

Dans ce travail, nous proposons l'utilisation d'une autre règle de calcul d'amplitude en lieu et place de la puissance électrique ou de l'amplitude conventionnelle d'un symbole au sein des sous-porteuses pour déterminer l'état de ces dernières. L'émission dans ce cas reste identique à celle de la SIM-OFDM conventionnelle. A la réception, pour chaque sous-porteuse, on calculera la « **nouvelle valeur d'amplitude** » d'un symbole  $S$  en faisant la somme des valeurs absolues des parties (imaginaire et réelle) correspondantes, soit :  $|\Re[S(i)]| + |\Im[S(i)]|$ . Cette amplitude sera ensuite comparée au seuil choisi qui doit être inférieur à  $A_{min}$  pour déterminer l'état active ou non de la sous-porteuse. Soient  $C$  l'ensemble des symboles de la constellation QAM choisie et  $A$  l'ensemble de sommes de valeur absolue des parties imaginaire et réelle des différents symboles, on a :

$$A(i) = |\Re[C(i)]| + |\Im[C(i)]|, \quad (23)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

L'amplitude minimale  $A_{min}$  de la constellation correspond dans ce cas au minimum de  $A$ . Le losange (Cf. Figure 1.8 ) décrit la plage de symboles correspondant aux sous-porteuses inactives et l'extérieur, celle des symboles correspondant aux sous-porteuses actives pour le format 4-QAM.

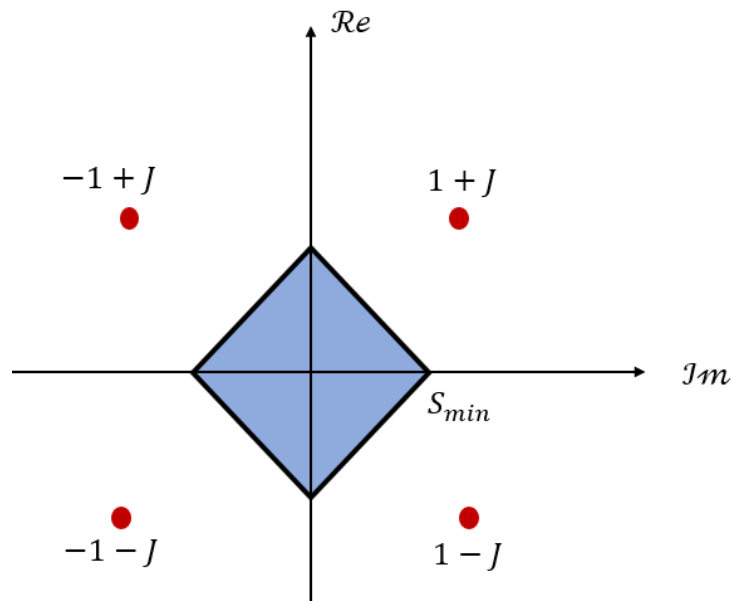


Figure 1.8 : Règle de décision de la nouvelle approche

### 1.6.2. Avantages de la nouvelle approche

L'opération  $a = |x| + |y|$  représentant la nouvelle règle de calcul d'amplitude que nous proposons dans l'approche, consiste à calculer les valeurs absolues respectives de  $x$  et de  $y$ , puis à les additionner.

Cela nécessite deux opérations de valeur absolue et une opération d'addition, ce qui se fait en temps constant. Sur plusieurs itérations, le temps de calcul reste constant pour chaque itération. Par contre l'opération  $b = \sqrt{x^2 + y^2}$  (celle utilisée pour calculer l'amplitude au niveau de la SIM-OFDM conventionnelle) consiste à calculer la racine carrée de la somme des carrés de  $x$  et de  $y$ . Cela nécessite deux opérations de carré, une opération d'addition et une opération de racine carrée. Les opérations de carré et d'addition se font en temps constant, mais la racine carrée peut être coûteuse en temps de calcul. La complexité en temps de calcul de l'opération « racine carrée » dépend de l'algorithme de calcul utilisé. En général, la racine carrée est une opération plus coûteuse que l'addition et la valeur absolue. Sur plusieurs

itérations, le temps de calcul de l'opération  $b$  peut donc augmenter proportionnellement au nombre d'itérations.

En termes de complexité, la nouvelle approche a une complexité constante dû au fait que les fonctions d'absorption sont des fonctions simples qui prennent une valeur en entrée et renvoient une valeur en sortie, sans nécessiter de calcul supplémentaire. En revanche, la règle de décision conventionnelle présente une complexité linéaire due à la nécessité de calculer les carrés, de les ajouter et de prendre la racine carrée de la somme. En termes de temps de calcul sur plusieurs itérations, la nouvelle approche est plus rapide (donc en termes de coût ou de consommation d'énergie) que la règle de décision conventionnelle. Ceci résulte du fait qu'elle a une complexité constante qui ne change pas en fonction de la taille des éléments à son entrée. On verra dans le chapitre suivant, l'étude de performance en termes de taux d'erreur binaire des deux approches.

### **Conclusion**

Pour apporter une solution à l'aspect énergivore de l'OFDM tout en garantissant une bonne efficacité spectrale, des formats améliorés de l'OFDM basés sur le principe de la modulation spatiale, ont vu le jour. Ceci consiste à explorer une dimension supplémentaire pour envoyer des bits au format OOK : cas de la SIM-OFDM. Cette dernière a suscité l'intérêt de la communauté scientifique et ne cesse de s'améliorer dans le temps sur un grand nombre d'aspects ouvrant des opportunités pour de nouvelles technologies dont la 5G et la 6G. Dans le prochain chapitre, une étude de performance de la SIM-OFDM basée sur une nouvelle approche sera abordée dans le cas d'une transmission en canal AWGN.

# Chapitre 2 : Implémentation et évaluation des performances de la nouvelle approche SIM-OFDM

Dans ce chapitre, nous présentons les différents résultats obtenus de l'étude comparative de la nouvelle approche SIM-OFDM avec la méthode conventionnelle. Les différentes simulations ont été effectuées en utilisant un environnement **Python** sous un canal **AWGN**.

## 2.1. Langage Python

Pour nos simulations, nous avons opté pour un environnement de développement « open source » tel que Python. Python est un langage de programmation de haut niveau, interprété et orienté objet. Il a été créé en 1991 par Guido van Rossum et est aujourd'hui largement utilisé dans le développement de logiciels, l'analyse de données, l'intelligence artificielle, le développement web, l'automatisation de tâches et bien d'autres domaines. Python est apprécié pour sa syntaxe simple et claire, qui facilite la lecture et la compréhension du code, ainsi que pour sa grande flexibilité et son extensibilité. Il possède une vaste bibliothèque standard et une communauté active de développeurs qui fournissent des modules et des frameworks pour de nombreuses applications. Python est également multiplateforme : ce qui signifie qu'il peut être utilisé sur différents systèmes d'exploitation tels que Windows, macOS et Linux. Il est souvent utilisé en combinaison avec d'autres technologies telles que : Django pour le développement web, NumPy pour l'analyse de données et TensorFlow pour l'intelligence artificielle.

Il revient de retenir que Python est un langage de programmation flexible, gratuit, performant et facilement intégrable avec d'autres technologies. Ces avantages en font un choix judicieux pour les simulations de chaînes de transmission, en particulier pour les utilisateurs qui ont des contraintes budgétaires ou qui ont besoin d'une grande flexibilité pour leurs simulations.

Dans cette étude, nous avons utilisé les plateformes Spyder et Jupyter Notebook de Anaconda3 [65]. Anaconda est un environnement de développement (IDE) Python populaire utilisé pour la science des données et l'analyse numérique. Il offre plusieurs avantages par rapport à d'autres IDE Python à savoir :

- ✓ gestion facile des paquets : Anaconda est livré avec un gestionnaire de paquets puissant appelé « Conda », qui permet d'installer et de gérer facilement des packages Python. Conda facilite également la création et la gestion d'environnements Python isolés ;

- ✓ pré-installation de packages : Anaconda est livré avec une grande variété de packages Python pré-installés tels que Numpy, Pandas, Matplotlib, Scikit-learn et bien d'autres encore. Cela permet aux utilisateurs de commencer à travailler rapidement sans avoir à installer manuellement tous les packages nécessaires ;
- ✓ multiplateforme : Anaconda est disponible sur divers systèmes d'exploitation et prend en charge la gestion des packages sur différentes architectures matérielles ;
- ✓ gestion des dépendances : Conda permet de gérer les dépendances des packages, ce qui facilite la mise à jour et la maintenance des packages installés ;
- ✓ Interface utilisateur : Anaconda propose une interface utilisateur graphique (GUI) appelée Anaconda Navigator, qui facilite la gestion des environnements et des packages.

Anaconda est un environnement Python complet, facile à utiliser et à configurer. Nous avons utilisé Spyder pour l'implémentation des modules (Modulateur QAM, Démodulateur QAM, Canal AWGN, etc.) et Jupiter pour pouvoir combiner du code exécutable, des visualisations, des commentaires et des explications textuelles. Les notebooks Jupyter permettent l'exécution de code en temps réel, l'affichage de graphiques, de tableaux et de tout autre contenu multimédia.

## **2.2. Paramètres de simulation**

Après avoir implémenté les deux approches de SIM-OFDM (la SIM-OFDM conventionnelle et la nouvelle approche SIM-OFDM), nous avons évalué leurs performances en termes de taux d'erreur binaire (BER) pour un canal plat AWGN dans différents formats QAM. L'évaluation du taux d'erreur binaire a été faite suivant la méthode de Monte Carlo. Nous avons également mené une étude comparative de la nouvelle approche SIM-OFDM (baptisée « **SIM new** ») avec la SIM-OFDM conventionnelle (baptisée « **SIM conv** »). Les différents paramètres utilisés pour nos simulations sont présentés au Tableau 2.1.

*Tableau 2.1*: Paramètres de simulation

<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>
Taille IFFT/FFT	64
Nombre de symboles OFDM	1024
Nombre de symboles Pilotes	0
Taille Préfixe Cyclique	16
Format QAM	4, 16, 64, 256
Eb/No	0 à 30 dB

### 2.3. Performances de la SIM-OFDM conventionnelle

Dans cette section, nous avons évalué les performances de la SIM-OFDM conventionnelle (*SIM conv*) pour différents formats de constellation QAM.

La Figure 2.1 présente l'évolution du taux d'erreur binaire (BER) de la SIM-OFDM conventionnelle en fonction du rapport signal sur bruit binaire ( $E_b/N_0$ ) pour différentes QAM dans un canal AWGN suivant la politique d'allocation de puissance PSP.

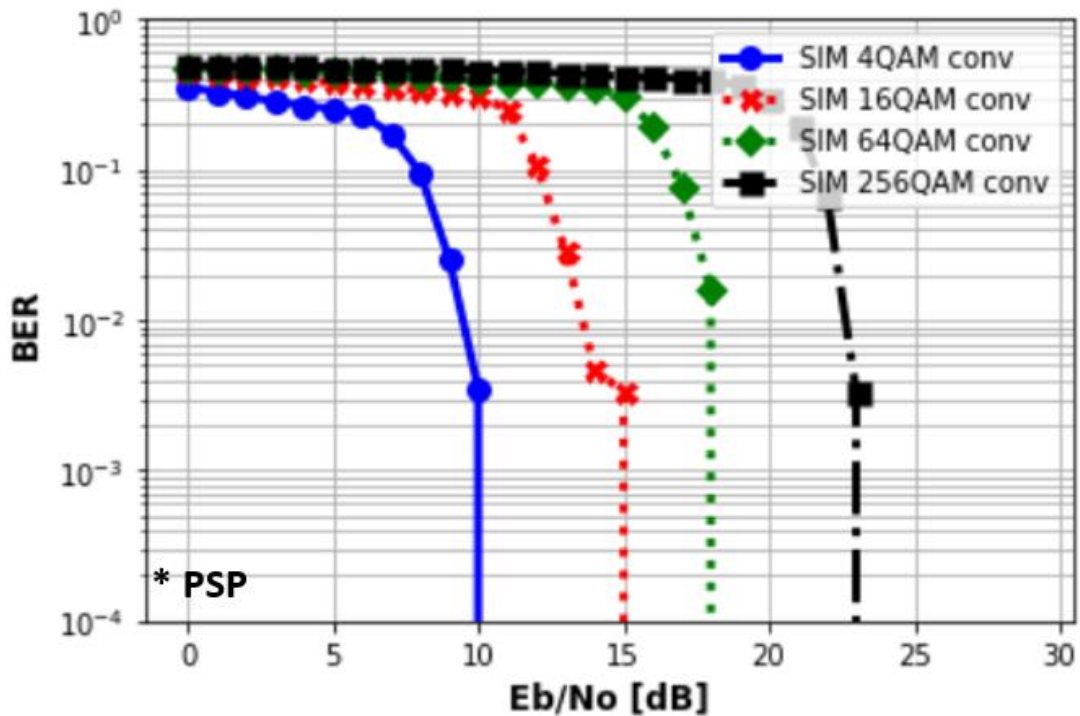


Figure 2.1 : TEB=f ( $E_b/N_0$ ) de la SIM conv pour différents QAM en mode PSP

On remarque que le taux d'erreur binaire se dégrade avec l'augmentation de la taille de la constellation QAM. On constate également que pour garantir un BER fixe, le SNR binaire nécessaire se doit d'être plus élevé avec l'augmentation de la constellation à transmettre. Ceci s'explique par le fait que la transmission d'un bit de plus par symbole QAM, nécessite plus de puissance émise pour que l'impact du bruit soit le plus faible possible. Ainsi, pour un format QAM fixe, on peut observer que les performances du BER s'améliorent avec l'augmentation du  $E_b/N_0$ . C'est ce qui justifie le fait que pour un BER =  $10^{-4}$ , il faudrait un  $E_b/N_0$  de 10 dB en 4QAM et 5dB de plus, soit  $E_b/N_0 = 15$  dB en 16QAM.

### 2.4. Performances de la nouvelle approche SIM-OFDM

Dans cette section, nous avons également évalué les performances de la nouvelle approche SIM-OFDM pour différentes constellations QAM.

La Figure 2.2 illustre les variations du taux d'erreur binaire en fonction du SNR binaire électrique pour différents formats QAM avec la nouvelle approche SIM-OFDM proposée selon la politique d'allocation de puissance PSP.

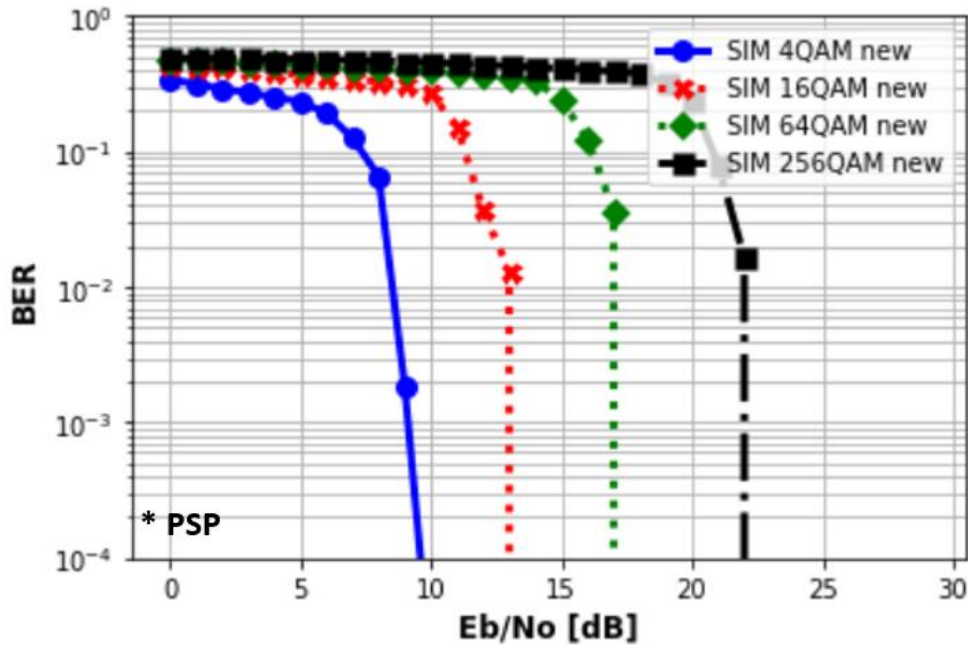


Figure 2.2 : TEB=f (Eb/No) de la SIM new pour différents formats QAM en mode PSP

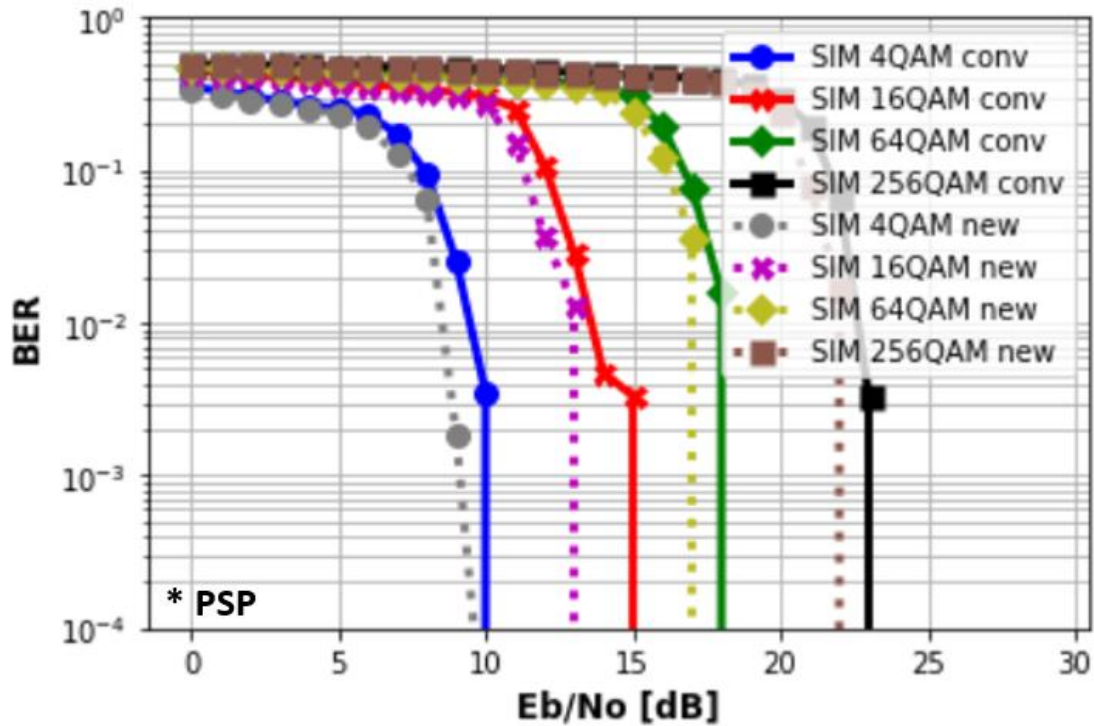
L'analyse de cette Figure 2.2, permet d'observer les mêmes comportements du BER en fonction d' $E_b/N_0$  comme constaté, précédemment à la Figure 2.1, excepté les valeurs empruntées. Ainsi, le taux d'erreur binaire (BER) se dégrade avec l'augmentation de la taille de la constellation et à BER fixe, le rapport signal sur bruit binaire augmente avec la taille de la constellation. Nous essayerons de croiser les résultats obtenus pour une étude comparative dans la section ci-après.

## 2.5. Etude comparative des performances « SIM new » versus « SIM conv »

Dans cette partie, nous faisons une étude comparative des performances de la nouvelle approche avec celle de la SIM-OFDM conventionnelle pour différentes constellations QAM.

La Figure 2.3 présente les variations du taux d'erreur binaire en fonction du rapport signal sur bruit binaire  $E_b/N_0$  avec les deux (02) approches SIM-OFDM et ce, pour différentes constellations suivant la politique d'allocation de puissance PSP.

On remarque que les deux approches présentent quasiment les mêmes performances de BER pour de faibles valeurs de SNR fonction du type de constellation (par exemple jusqu'à environ 6 dB pour la 4-QAM voire 14 dB pour la 16QAM). Il est également possible de noter une légère amélioration par endroits (en fonction du type de QAM) jusqu'à environ 2 dB de la nouvelle approche comparée à l'approche conventionnelle.



**Figure 2.3** : TEB=f (Eb/No) en **SIM new** vs **SIM conv** pour différentes QAM en mode PSP

Il s'agit entre autres, d'un gain en termes d'E<sub>b</sub>/N<sub>0</sub> de 2 dB pour la 16-QAM, 1 dB respectivement pour la 64-QAM et la 256-QAM pour un BER cible de 10<sup>-4</sup>. De plus, en considérant par exemple un E<sub>b</sub>/N<sub>0</sub> de 13 dB, il est possible de réaliser un BER de 10<sup>-4</sup> avec la nouvelle approche au lieu d'un BER de 8x10<sup>-2</sup> avec l'approche conventionnelle, soit plus de deux (02) décades en termes taux d'erreur binaire. Tout ceci permet de conclure que la nouvelle approche comparée à l'approche conventionnelle, est un meilleur candidat car en plus d'être moins complexe et plus rapide en termes de calcul, elle présente de meilleurs BER tout en conservant la même efficacité spectrale.

Dans la prochaine section de cette étude, nous étudions les performances obtenues avec la nouvelle approche en considérant les deux (02) modes d'allocation de puissance (PSP et PRP).

### **2.6. Etude de performances PRP vs PSP de la nouvelle approche de la SIM-OFDM**

Les Figure 2.4 et Figure 2.5 présentent l'évolution du taux d'erreur binaire en fonction du rapport signal sur bruit pour différentes QAM selon les politiques d'allocation de puissance PSP et PRP avec la nouvelle approche SIM-OFDM.

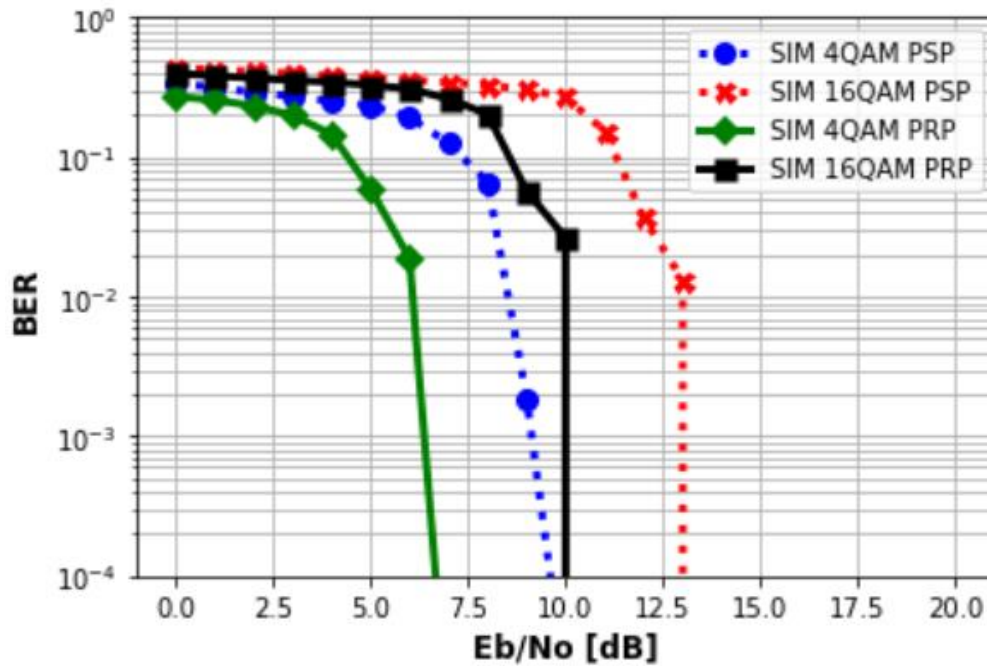


Figure 2.4 :  $TEB=f(E_b/N_0)$  de la « SIM new » selon deux configurations (PRP vs PSP) en 4 et 16 QAM

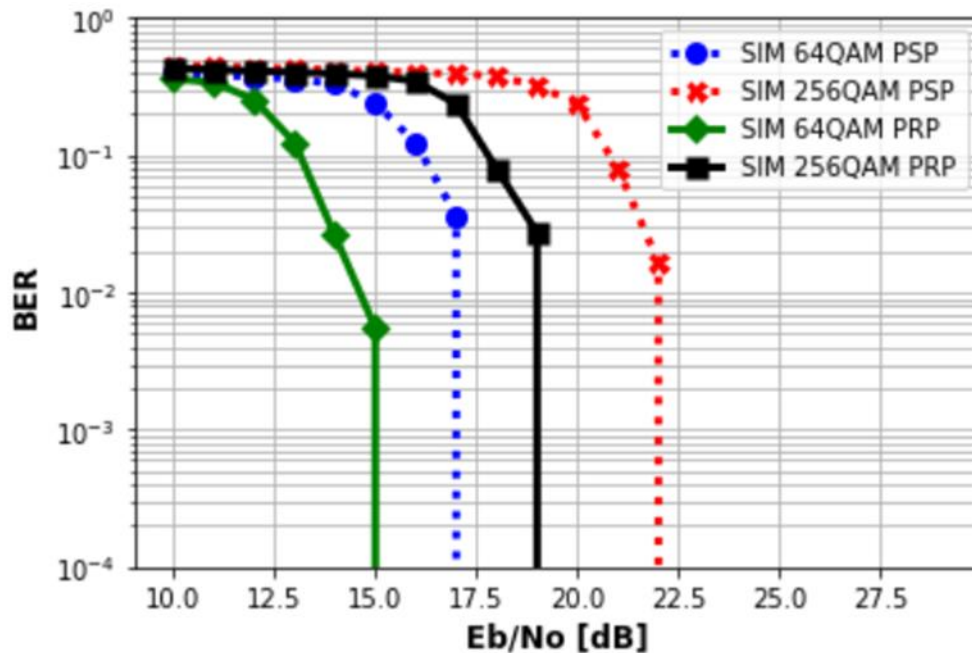
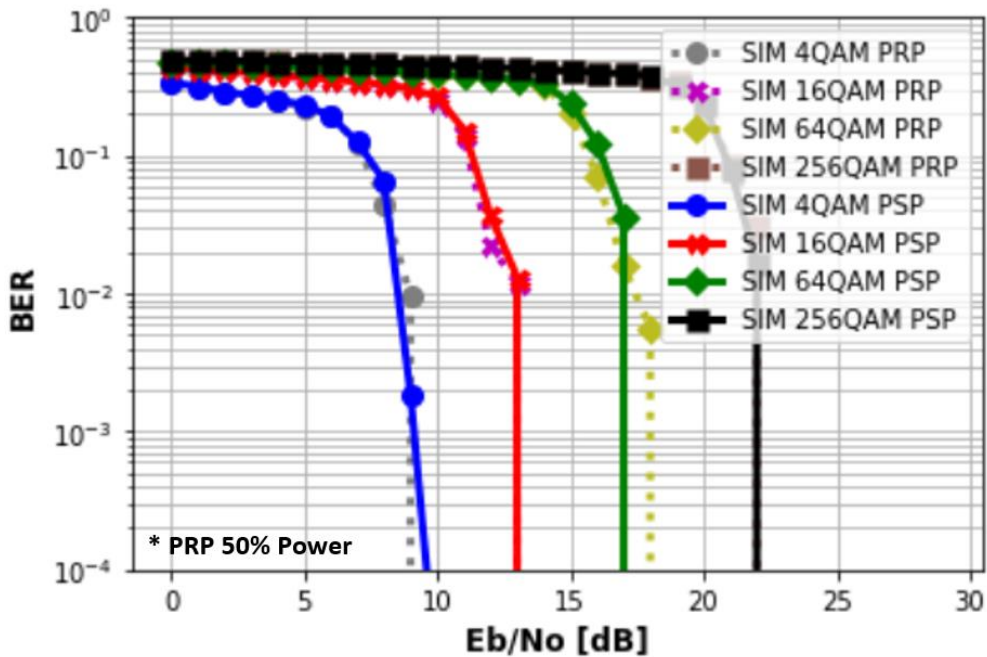


Figure 2.5 :  $TEB=f(E_b/N_0)$  de la « SIM new » selon deux configurations (PRP vs PSP) en 64 et 256 QAM

L'analyse des Figure 2.4 et Figure 2.5 permet d'affirmer quelle que soit la constellation QAM, que la politique d'allocation de puissance PRP présente de meilleures performances en termes de BER comparée à la PSP. La politique PRP présente un gain en  $E_b/N_0$  d'environ 3 dB pour la 4-QAM et la 256-QAM puis 2,3 à 2,6 dB pour respectivement la 64-QAM et la

16-QAM. Ceci permet d'affirmer qu'avec une énergie émise en PRP presque moitié de celle émise en PSP, il serait possible de garantir des BER similaires (Cf. Figure 2.6).



**Figure 2.6** : TEB=f (Eb/No) de la « SIM new » selon PRP (50% de puissance) et PSP pour différents QAM

Il revient de retenir, que la politique PRP présente d'excellentes performances en matière de BER comparée à la politique PSP. Cela se justifie par la réallocation des énergies devant moduler les sous-porteuses dites « inactives » en complément aux énergies fournies sur les sous-porteuses « actives ». Ainsi, pour une application nécessitant une meilleure efficacité énergétique, il faut préférer une solution « PSP SIM new » tandis que pour des applications exigeantes en BER pour lesquelles l'énergie n'est pas une limitation, une approche « PRP SIM new » serait un très bon candidat.

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons implémenté et étudié la SIM-OFDM conventionnelle avec la nouvelle approche SIM-OFDM basée sur une nouvelle règle de décision, et ce pour différentes constellations QAM et politiques d'allocation de puissance (PSP et PRP). L'analyse des performances obtenues en termes de taux d'erreur binaire a montré que la nouvelle approche SIM-OFDM permet de réaliser un gain en SNR d'environ 2dB comparée à la méthode conventionnelle. Mieux, elle offre plus de deux (02) décades en termes de taux d'erreur binaire, en plus d'être moins complexe et plus rapide en termes de calcul tout en conservant la même efficacité spectrale. En outre, l'implémentation de la politique PRP permet d'améliorer le BER ou de réaliser un gain moyen de 2,7 dB en SNR.

## Conclusion

« Subcarrier Index Modulation OFDM » est une technique de modulation très prometteuse qui exploite une dimension (l'indice des sous-porteuses) de plus que l'OFDM conventionnel pour transmettre de l'information. Elle permet comparée à l'OFDM, de réaliser des performances intéressantes en termes de taux d'erreur binaire ou d'efficacité énergétique suivant la politique d'allocation de puissance utilisée tout en ayant une bonne efficacité spectrale. Elle a suscité l'intérêt de nombreuses recherches ces dernières années et continue d'être révolutionnaire pour les systèmes de transmission du futur.

Dans cette étude, nous avons proposé, implémenté et étudié une nouvelle règle de décision pour la SIM-OFDM qui modifie légèrement celle utilisée de manière conventionnelle dans la détermination à la réception d'une sous-porteuse « active » ou non. La nouvelle règle proposée est moins complexe et assure un faible temps de calcul comparée à la règle traditionnellement utilisée en SIM-OFDM. Par ailleurs, l'implémentation et l'analyse des deux approches (la nouvelle avec la conventionnelle) à travers un canal AWGN ont montré que la nouvelle approche présente de meilleures performances en termes de taux d'erreur binaire.

Des résultats obtenus dans ce document, il en ressort que l'approche proposée serait un meilleur candidat pour la SIM-OFDM. Il serait néanmoins intéressant, d'effectuer les mêmes études pour les canaux de type « Rayleigh » ou « Rice » pour des résultats plus réalistes, étant donné que le canal AWGN n'apporte pas de déformation de termes de fonction de transfert au signal. Une autre piste serait d'effectuer les mêmes études pour les canaux optiques comme la fibre optique et les milieux optiques sans fil.

## Bibliographie

- [1] Bingham, John A. C. "Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come." *IEEE Communications Magazine* 28 (1990): 5-14.
- [2] Abu-Alhiga, Rami and Harald Haas. "Subcarrier-index modulation OFDM." 2009 IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (2009): 177-181.
- [3] Jan, Omar et al. "The robustness of subcarrier-index modulation in 16-QAM CO-OFDM system with 1024-point FFT." *Optics express* 20 27 (2012): 28963-28968.
- [4] He, Qinwei and Anke Schmeink. "A Better Decision Rule for OFDM with Subcarrier Index Modulation." *International ITG Workshop on Smart Antennas* (2017): 1-4.
- [5] Fifamè, MAGNIDET. "Etude des performances d'un système de communication optique DWDM-FSO utilisant la technique SIM-OFDM." *Mémoire Master Photonique* (2020): 96.
- [6] Vatankhahghadim, Behraz et al. "A Study of Discrete Multitone Modulation for Wireline Links Beyond 100 Gb/s." *IEEE Open Journal of Circuits and Systems* 2 (2021): 78-90.
- [7] Fettweis, Gerhard P. et al. "On multi-carrier code division multiple access (MC-CDMA) modem design." *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)* (1994): 1670-1674 vol.3.
- [8] Ibañez, Alvaro et al. "Single Frequency Networks for 5G Broadcast: a Software Defined Radio Experiment." 2020 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB) (2020): 1-5.
- [9] Cornillet, Nicolas. "Convergence des réseaux de télécommunications mobiles et de télédiffusion : modélisation et évaluation des performances d'un réseau hybride LTE/DVB-T2. (Convergence of broadcast and mobile broadband: modeling and performance evaluation of a LTE/DVB-T2 hybrid network)." (2013): 137.
- [10] Tsonev, Dobroslav. "High speed energy efficient incoherent optical wireless communications." (2015): 281.
- [11] Tsonev, Dobroslav et al. "Enhanced subcarrier index modulation (SIM) OFDM." 2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps) (2011): 728-732.
- [12] Başar, Ertuğrul et al. "Orthogonal Frequency Division Multiplexing With Index Modulation." *IEEE Transactions on Signal Processing* 61 (2012): 5536-5549.
- [13] Wen, Miaowen et al. "Optimizing the energy efficiency of OFDM with index modulation." 2014 IEEE International Conference on Communication Systems (2014): 31-35.

- [14] Khan, Faisal et al. "A Novel Double-Sided Pulse Interval Modulation (DS-DS-PIM) Aided SIM-OFDM for 6G Light Fidelity (LiFi) Networks." *Electronics* (2022): 1-15.
- [15] Bouhleb, Asma et al. "Performance analysis of DWT based OFDM with index modulation under channel estimation error." *2017 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS)* (2017): 1-5.
- [16] Wen, Miaowen et al. "On the Achievable Rate of OFDM With Index Modulation." *IEEE Transactions on Signal Processing* 64 (2016): 1919-1932.
- [17] Wen, Miaowen et al. "Generalized Multiple-Mode OFDM With Index Modulation." *IEEE Transactions on Wireless Communications* 17 (2018): 6531-6543.
- [18] Zhu, Huiying et al. "Subcarrier Index Modulation OFDM for multiuser MIMO systems with iterative detection." *2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)* (2016): 1-6.
- [19] Li, Jun et al. "Layered Orthogonal Frequency Division Multiplexing With Index Modulation." *IEEE Systems Journal* 13 (2019): 3793-3802.
- [20] Yüzgeçcioglu, Merve and Eduard Axel Jorswieck. "Uplink and downlink transceiver design for OFDM with index modulation in multi-user networks." *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)* (2017): 1-5.
- [21] Althunibat, Saud et al. "Differential Subcarrier Index Modulation." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 67 (2018): 7429-7436.
- [22] Irfan, Mohammad et al. "SubCarrier Index - QAM, A New Hybrid Modulation Scheme for OFDM." (2015).
- [23] Xiao, Yue et al. "OFDM With Interleaved Subcarrier-Index Modulation." *IEEE Communications Letters* 18 (2014): 1447-1450.
- [24] Yu, Sung Yub et al. "Performance Analysis of Subcarrier Index Modulation-OFDM in Doppler Spread Environments." *2016 7th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS)* (2016): 380-382.
- [25] Mishra, Shashwat and Ankur Agarwal. "Peak to average power ratio reduction in sub-carrier Index modulated OFDM using selective mapping." *2017 International Conference on Computer, Communications and Electronics (Comptelix)* (2017): 168-171.
- [26] Li, Qiang et al. "OFDM Spread Spectrum with Index Modulation." *2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)* (2017): 1-6.

- [27] Jaradat, Ahmad M. et al. "OFDM With Hybrid Number and Index Modulation." *IEEE Access* 8 (2019): 55042-55053.
- [28] Dang, Shuping et al. "Enhanced Orthogonal Frequency-Division Multiplexing With Subcarrier Number Modulation." *IEEE Internet of Things Journal* 6 (2019): 7907-7920.
- [29] Liu, Yingtao et al. "Spatial modulation orthogonal frequency division multiplexing with subcarrier index modulation for V2X communications." *2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)* (2016): 1-5.
- [30] Hasan, Rawaa J. and Hikmat N. Abdullah. "Comparative study of selected subcarrier index modulation OFDM schemes." *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)* (2019): 1-8.
- [31] Zheng, Jianping and Ru-Shan Chen. "Achieving Transmit Diversity in OFDM-IM by Utilizing Multiple Signal Constellations." *IEEE Access* 5 (2017): 8978-8988.
- [32] Ishikawa, Naoki et al. "Subcarrier-Index Modulation Aided OFDM - Will It Work?" *IEEE Access* 4 (2016): 2580-2593.
- [33] Ma, Qianli et al. "Subcarrier Allocation for OFDM With Index Modulation." *IEEE Communications Letters* 20 (2016): 1469-1472.
- [34] Taherkhani, Nima and Kamran Kiasaleh. "Performance Improvement of Dimmable OFDM-Visible Light Communication using Subcarrier Index Modulation and Reed Solomon Encoding." *ArXiv abs/2109.11667* (2021): 28.
- [35] Hajar, Abdulwahab and Jehad M. Hamamreh. "The Generalization of Orthogonal Frequency Division Multiplexing With Subcarrier Power Modulation to Quadrature Signal Constellations." (2020): 1-15.
- [36] Guan, Rui et al. "Enhanced subcarrier-index modulation-based asymmetrically clipped optical OFDM using even subcarriers." *Optics Communications* 402 (2017): 600-605.
- [37] Sun, Zhiguo et al. "Performance Analysis of Index Bit Errors Rate of SIM-OFDM on AWGN Channels." *2018 IEEE 18th International Conference on Communication Technology (ICCT)* (2018): 41-45.
- [38] Li, Yuke et al. "Index Modulated OFDM with ICI Self-Cancellation." *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)* (2016): 1-5.
- [39] Tang, Tang et al. "Proposal and Demonstration of Subcarrier Index Modulation OFDM for RoF System With Enhanced Spectral Efficiency." *Journal of Lightwave Technology* 36 (2018): 4501-4506.

- [40] Fan, Rui et al. "Orthogonal frequency division multiplexing with generalized index modulation." *2014 IEEE Global Communications Conference* (2014): 3880-3885.
- [41] Sarankumar, R. "Bit Error Rate Reduction Using Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation." (2014).
- [42] Irfan, Mohammad and Sonia Aïssa. "Generalization of Index-Modulation: Breaking the Conventional Limits on Spectral and Energy Efficiencies." *IEEE Transactions on Wireless Communications* 20 (2021): 3911-3924.
- [43] Hamamreh, Jehad M. et al. "Orthogonal frequency division multiplexing with subcarrier power modulation for doubling the spectral efficiency of 6G and beyond networks." *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies* 31 (2020): 1-31.
- [44] Xin, Wang et al. "Layered constellation generation method based on SIM-OFDM." *Optics Communications* 477 (2020): 126350.
- [45] Kadir, Mohammad Ismat et al. "Entropy Coding Aided Adaptive Subcarrier-Index Modulated OFDM." *IEEE Access* 6 (2018): 7739-7752.
- [46] Sun, Zhiguo et al. "Performance Analysis of Index Bit Errors Rate of SIM-OFDM on AWGN Channels." *2018 IEEE 18th International Conference on Communication Technology (ICCT)* (2018): 41-45.
- [47] Chen, Lin et al. "Subcarrier Index-Power Modulated-Optical OFDM With Dual Superposition Multiplexing for Directly Modulated DFB-Based IMDD PON Systems." *IEEE Photonics Journal* 10 (2018): 1-13.
- [48] Wang, Tengjiao et al. "Deep Convolutional Neural Network-Based Detector for Index Modulation." *IEEE Wireless Communications Letters* 9 (2020): 1705-1709.
- [49] Başar, Ertuğrul and Erdal Panayirci. "Optical OFDM with index modulation for visible light communications." *2015 4th International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW)* (2015): 11-15.
- [50] Li, Qiang et al. "Subcarrier Index Modulation for Future Wireless Networks: Principles, Applications, and Challenges." *IEEE Wireless Communications* 27 (2020): 118-125.
- [51] Mi, Singer et al. "Channel Estimation for Enhanced Subcarrier Index Modulation OFDM Using Zadoff-Chu Sequence Pilot in Nonlinear Channel." *2022 19th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)* (2022): 1-4.

- [52] Inácio, Juliana Camilo et al. “Grouped linear constellation-precoding for subcarrier index modulation OFDM.” *2017 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)* (2017): 308-313.
- [53] Qin, Hongfeng et al. “N-continuous subcarrier index modulation OFDM.” *2013 International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS) 2* (2013): 22-25.
- [54] Tang, Qi et al. “Experimental Research on subcarrier index power modulation OFDM for visible light communication system.” *2021 9th International Conference on Communications and Broadband Networking* (2021): 323–328.
- [55] Chen, Chen et al. “Experimental Demonstration of Optical OFDM with Subcarrier Index Modulation for IM/DD VLC.” *2019 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)* (2019): 1-3.
- [56] Bai, Yingshuang et al. “Performance Analysis of Subcarrier Index Modulation for FrFT-OFDM System.” *2019 8th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)* (2019): 273-276.
- [57] Zhang, Hongming et al. “Compressed Sensing Improves the Performance of Subcarrier Index-Modulation-Assisted OFDM.” *IEEE Access* 4 (2016): 7859-7873.
- [58] Sengupta, Ipsita and Shounak Dasgupta. “Reduced Subcarrier Index Modulation Scheme in OFDM System for Next-Gen Wireless Networks.” *Computers and Devices for Communication* (2019): 127–138.
- [59] Wang, Qingbo et al. “Novel OFDM System Using Data-Nulling Superimposed Pilots With Subcarrier Index Modulation.” *IEEE Communications Letters* 22 (2018): 2164-2167.
- [60] Sarwar, Muhammad Sajid et al. “Subcarrier Index Modulation for Spectral Efficient Frequency Division Multiplexing in Multi-Input Multi-Output Channels.” *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 72 (2023): 2678-2683.
- [61] Ngo, Vu-Duc et al. “Enhancing diversity of OFDM with joint spread spectrum and subcarrier index modulations.” *Wireless Networks* 28 (2022): 3739 - 3751.
- [62] Chaki, Prakash et al. “Precoded Filterbank Multicarrier Index Modulation With Non-Orthogonal Subcarrier Spacing.” *IEEE Transactions on Communications* 71 (2023): 700-713.
- [63] Mathuranathan, Viswanathan. “Digital Modulations using Python.” *Independently published* (2019): 216.

- [64] M. Fréjus, Sanya. “Déploiement de réseaux optiques d'accès NGPON dans des métropoles de pays en développement : proposition de nouvelles techniques d'implémentation de l'OFDM.” France, Université de Limoges (2015): 225.

## Webographie

- [65] Peter Wang et al. “Anaconda.”, <https://www.anaconda.com/download/>. Consulté le 03 Avril 2023.

# Table des matières

Sommaire .....	iii
Dédicaces .....	iv
Remerciements.....	v
Liste des sigles et acronymes .....	vi
Table des figures.....	ix
Liste des tableaux .....	x
Résumé .....	1
Abstract.....	2
Introduction .....	3
Chapitre 1 : Introduction à la SIM-OFDM : description d'une nouvelle approche .....	6
1.1. Principe des modulations multiporteuses.....	6
1.2. Modulation OFDM.....	7
1.3. Subcarrier Index Modulation OFDM (SIM-OFDM).....	12
1.3.1. Principe de la SIM-OFDM .....	12
1.3.2. Politiques d'allocation de puissance en SIM-OFDM.....	15
1.4. Etat de l'art sur la SIM-OFDM .....	17
1.5. Canal AWGN.....	22
1.5.1. Modélisation du canal AWGN .....	22
1.5.2. Critères d'évaluation de performance.....	23
1.5.2.1. Rapport signal sur bruit (SNR).....	24
1.5.2.2. Taux d'erreur binaire .....	25
1.5.2.3. Taux d'erreur symbole.....	25
1.5.2.4. PAPR .....	26
1.6. Approche proposée.....	27
1.6.1. Description .....	28
1.6.2. Avantages de la nouvelle approche .....	29
Chapitre 2 : Implémentation et évaluation des performances de la nouvelle approche SIM-OFDM.....	31
2.1. Langage Python .....	31
2.2. Paramètres de simulation .....	32
2.3. Performances de la SIM-OFDM conventionnelle.....	33
2.4. Performances de la nouvelle approche SIM-OFDM.....	33

<b>2.5. Etude comparative des performances « SIM new » versus « SIM conv »</b> .....	34
<b>2.6. Etude de performances PRP vs PSP de la nouvelle approche de la SIM-OFDM</b> .....	35
<b>Conclusion</b> .....	38
<b>Bibliographie</b> .....	39
<b>Table des matières</b> .....	46
<b>Annexe</b> .....	48

## Annexe

Les lignes à suivre présentent le programme pour simuler la technique SIM-OFDM sous Python suivant les deux approches de décision dans ce document.

### ✓ Modulation SIM-OFDM

```
#-----Librairies-----
import numpy as np      # for numerical computing
from scipy.stats import norm  # for qfunc function
from QAM import *      # QAM is a python module which we have created

#-----Global Parameters-----

M_Format=[4,16,64,256]          # array of M values to simulate
M_OFDM =64                     # number of OFDM symbols
M_IFFT = 1024                  # ifft size
Sub_car=int(M_IFFT/2)

CP=16                          # number of subcarrier for cyclic prefix
Eb_No=[i for i in range(0,30)] # array of Binary SNR
Choice=0                       # equalization parameter
Es=1                            # energy per symbol
N_Pilot=20                     # pilot symbols size

BER_MC=np.zeros((len(M_Format),len(Eb_No)),dtype='float')
BER_EVM=np.zeros((len(M_Format),len(Eb_No)),dtype='float')
BER_OOK=np.zeros((len(M_Format),len(Eb_No)),dtype='float')
BER_QAM=np.zeros((len(M_Format),len(Eb_No)),dtype='float')

#-----Emission-----
for i, M in enumerate(M_Format):
    k=int(np.log2(M))          # Number of bit per symbol
    Seq=np.random.randint(0,2,size=(M_IFFT*M_OFDM*(k//2+1)))
    # BOOK and BQAM reshaping
    BOOK= Seq[0:M_IFFT*M_OFDM]
    BOOKi=BOOK.reshape(M_IFFT,M_OFDM)
```

```
BOOK_EVM=2*BOOKi-1      # BPSK modulation for BER processing with EVM Method
BQAM= Seq[M_IFFT*M_OFDM:]
BQAM1=BQAM.reshape(Sub_car*M_OFDM,k)
BQAM_Mod = Mapping(BQAM1,M)                                # modulate
BQAMi=BQAM_Mod.reshape(Sub_car,M_OFDM)
#-----SIM Modulation-----
# Power processing and its allocation
mapping_table=Table_mapping(M)
Symbols=[]
for m,n in mapping_table.items():
    Symbols.append(n)
Ampli = np.abs(Symbols)
Mean_Power=np.mean(Ampli)
# sending BQAM over BOOK after finding majority bit : SIM Modulation
SIM_Mod=np.zeros((M_IFFT,M_OFDM),dtype='cfloat')
Vector_major_bit=np.zeros(M_OFDM)
N_Maj=[]
for u in range(M_OFDM):
    major_bit,occur_indice = more_occur_indice(BOOKi[:,u])
    occur_indice= list(occur_indice[0])
    N_Maj.append(len(occur_indice))
    for c in range(len(occur_indice)):
        SIM_Mod[occur_indice[c],u]=Mean_Power
    Vector_major_bit[u]= major_bit
    for v in range(Sub_car):
        SIM_Mod[occur_indice[v],u]=BQAMi[v,u]
#-----
Pilot_Seq = np.random.randint(low=0, high = 2, size=(M_IFFT*N_Pilot*k))
Pilot_Mod=Mapping(Pilot_Seq.reshape(M_IFFT*N_Pilot,k),M)
# Pilot_Seq = np.random.randint(low=0, high = 2, size=M_IFFT*N_Pilot)
```

```
# Pilot_Mod=2*Pilot_Seq-1

Pilot=Pilot_Mod.reshape(M_IFFT,N_Pilot)

#-----

Add_Pilot= np.concatenate((Pilot, SIM_Mod), axis=1)

Inv_transf=np.fft.ifft(Add_Pilot,axis=0) #

Add_CP=np.vstack([Inv_transf[-CP:], Inv_transf]) # take the last CP samples and add them to the
beginning

P2S =Add_CP.reshape(1,(M_IFFT+CP)*(M_OFDM+N_Pilot)) # Serie to parallele Conversion

#P2S =P2S/np.mean(P2S)

#-----Channel-----

Sig_ResH=P2S.reshape(M_IFFT+CP,M_OFDM+N_Pilot)

BER_M =[]

BER_E=[]

BER=[]

BER1=[]

BER11=[]

Pilot_maj=[1]*N_Pilot

N_Maj=Pilot_maj+N_Maj

for j in range(len(Eb_No)):

    SNR_dB= 10*np.log10(k)+Eb_No[j]

    Sig_Rec=np.zeros((M_IFFT+CP,M_OFDM+N_Pilot),dtype='cfloat')

    for z in range (M_OFDM+N_Pilot):

        #Sig_Rec[:,z]=awgn(Sig_ResH[:,z],SNR_dB) # AWGN for PSP

        Sig_Rec[:,z]=awgn_PRP(Sig_ResH[:,z],SNR_dB,M_IFFT,N_Maj[z])

    #-----Reception-----

    Rem_CP=Sig_Rec[CP,:]; # Cyclic prefix removal

    F_transf=np.fft.fft(Rem_CP,axis=0) # Fast Fourier Transform

    Pilot_recup=F_transf[:,0:N_Pilot]; # pilot symbols recuperation

    Data_recup=F_transf[:,N_Pilot:] # data recuperation
```

```
if (Choice==1):
    channel = np.sum(((Pilot_recup)/(Pilot)),axis=1)/N_Pilot; # Spectral response for N_Pilot
    channel_inva = 1/channel
    Rec_Sym= np.zeros((M_IFFT,M_OFDM),dtype='cfloat')

    for u in range(M_OFDM):
        Rec_Sym[:,u] =np.dot(np.diag(channel_inva),Data_recup[:,u])
    else:
        Rec_Sym=Data_recup
#-----SIM DEMODULATION-----
#Dec_Rule= (np.abs(Rec_Sym))
#Min_Power=(np.min(Ampli))
Dec_Rule= (np.abs(np.real(Rec_Sym)) +np.abs(np.imag(Rec_Sym)))
Ampli1 = np.abs(np.real(Symbols))+np.abs(np.imag(Symbols))
Min_Power=(np.min(Ampli1))
Treshold=Min_Power*0.5
BQAM_r=np.zeros((Sub_car,M_OFDM),dtype='cfloat')
BOOK_r=np.zeros((M_IFFT,M_OFDM))
for u in range(M_OFDM):
    if (Vector_major_bit[u]==1):
        BOOK_r[:,u]=((Dec_Rule[:,u]-(Treshold)) >= 0)
    else:
        BOOK_r[:,u]=((Dec_Rule[:,u]-(Treshold))< 0)
    major_bit,occur_indice = more_occur_indice(BOOK_r[:,u])
    occur_indice= list(occur_indice[0])
    for v in range (Sub_car):
        BQAM_r[v,u]=Rec_Sym[occur_indice[v],u]

BOOK_bin=BOOK_r.reshape(M_IFFT*M_OFDM)
BOOK_bin= BOOK_bin.astype(int)
```

```
BOOK_EVM_r0=BOOK_r.astype(int)
BOOK_EVM_r=2*BOOK_EVM_r0-1
Sym_P2S=BQAM_r.reshape(Sub_car*M_OFDM)
BQAM_Demod, hardDecision=Demapping(Sym_P2S,M)
Demod_bin=BQAM_Demod.reshape((-1,))
Seq_r=np.hstack([BOOK_bin, Demod_bin])

#-----BER PROCESSING-----
#BER processing with Monte Carlo (MC) method
BER_M.append(np.sum(abs(Seq-Seq_r))/len(Seq))
BER1.append(np.sum(abs(BOOK-BOOK_bin))/len(BOOK))
BER11.append(np.sum(abs(BQAM-Demod_bin))/len(BQAM))

BER_MC[i,:]=BER_M
#BER_EVM[i,:]=BER

BER_OOK[i,:]=BER1
BER_QAM[i,:]=BER11
#plotcurve(M_Format,'QAM',Eb_No,BER_MC)
```

✓ Code python pour réaliser la Modulation/Démodulation QAM

```
import numpy as np

def Table_mapping(M):

    if M==4:

        # 4-QAM symbols

        mapping_table4 = {

            (0,0) : -1-1j,

            (1,0) : -1+1j,
```

**(0,1) : 1-1j,**

**(1,1) : 1+1j}**

**return mapping\_table4**

**elif M==16:**

**# 16-QAM symbols**

**mapping\_table16 = {**

**(0,0,0,0) : -3-3j,**

**(1,0,0,0) : -3-1j,**

**(0,1,0,0) : -3+3j,**

**(1,1,0,0) : -3+1j,**

**(0,0,1,0) : -1-3j,**

**(1,0,1,0) : -1-1j,**

**(0,1,1,0) : -1+3j,**

**(1,1,1,0) : -1+1j,**

**(0,0,0,1) : 3-3j,**

**(1,0,0,1) : 3-1j,**

**(0,1,0,1) : 3+3j,**

**(1,1,0,1) : 3+1j,**

**(0,0,1,1) : 1-3j,**

**(1,0,1,1) : 1-1j,**

**(0,1,1,1) : 1+3j,**

**(1,1,1,1) : 1+1j}**

**return mapping\_table16**

**elif M == 64:**

# 64-QAM symbols

mapping\_table64= {

(0,0,0,0,0,0) : -7+7j,

(1,0,0,0,0,0) : -7+5j,

(0,1,0,0,0,0) : -7+1j,

(1,1,0,0,0,0) : -7+3j,

(0,0,1,0,0,0) : -7-7j,

(1,0,1,0,0,0) : -7-5j,

(0,1,1,0,0,0) : -7-1j,

(1,1,1,0,0,0) : -7-3j,

(0,0,0,1,0,0) : -5+7j,

(1,0,0,1,0,0) : -5+5j,

(0,1,0,1,0,0) : -5+1j,

(1,1,0,1,0,0) : -5+3j,

(0,0,1,1,0,0) : -5-7j,

(1,0,1,1,0,0) : -5-5j,

(0,1,1,1,0,0) : -5-1j,

(1,1,1,1,0,0) : -5-3j,

(0,0,0,0,1,0) : -1+7j,

(1,0,0,0,1,0) : -1+5j,

(0,1,0,0,1,0) : -1+1j,

(1,1,0,0,1,0) : -1+3j,

(0,0,1,0,1,0) : -1-7j,

(1,0,1,0,1,0) : -1-5j,

$(0,1,1,0,1,0) : -1-1j,$

$(1,1,1,0,1,0) : -1-3j,$

$(0,0,0,1,1,0) : -3+7j,$

$(1,0,0,1,1,0) : -3+5j,$

$(0,1,0,1,1,0) : -3+1j,$

$(1,1,0,1,1,0) : -3+3j,$

$(0,0,1,1,1,0) : -3-7j,$

$(1,0,1,1,1,0) : -3-5j,$

$(0,1,1,1,1,0) : -3-1j,$

$(1,1,1,1,1,0) : -3-3j,$

$(0,0,0,0,0,1) : 7+7j,$

$(1,0,0,0,0,1) : 7+5j,$

$(0,1,0,0,0,1) : 7+1j,$

$(1,1,0,0,0,1) : 7+3j,$

$(0,0,1,0,0,1) : 7-7j,$

$(1,0,1,0,0,1) : 7-5j,$

$(0,1,1,0,0,1) : 7-1j,$

$(1,1,1,0,0,1) : 7-3j,$

$(0,0,0,1,0,1) : 5+7j,$

$(1,0,0,1,0,1) : 5+5j,$

$(0,1,0,1,0,1) : 5+1j,$

$(1,1,0,1,0,1) : 5+3j,$

$(0,0,1,1,0,1) : 5-7j,$

$(1,0,1,1,0,1) : 5-5j,$

(0,1,1,1,0,1) : 5-1j,

(1,1,1,1,0,1) : 5-3j,

(0,0,0,0,1,1) : 1+7j,

(1,0,0,0,1,1) : 1+5j,

(0,1,0,0,1,1) : 1+1j,

(1,1,0,0,1,1) : 1+3j,

(0,0,1,0,1,1) : 1-7j,

(1,0,1,0,1,1) : 1-5j,

(0,1,1,0,1,1) : 1-1j,

(1,1,1,0,1,1) : 1-3j,

(0,0,0,1,1,1) : 3+7j,

(1,0,0,1,1,1) : 3+5j,

(0,1,0,1,1,1) : 3+1j,

(1,1,0,1,1,1) : 3+3j,

(0,0,1,1,1,1) : 3-7j,

(1,0,1,1,1,1) : 3-5j,

(0,1,1,1,1,1) : 3-1j,

(1,1,1,1,1,1) : 3-3j}

**return** mapping\_table64

**elif** M==256:

**# 256-QAM symbols**

**mapping\_table256= {**

(0,0,0,0,0,0,0,0): -15.0000-15.0000j,

(1,0,0,0,0,0,0,0): -15.0000-13.0000j,

Performances de la SIM-OFDM dans un canal AWGN : Implémentation d'une nouvelle technique de décision.

---

<b>(0,1,0,0,0,0,0,0):</b>	<b>-15.0000-9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,0,0,0,0,0):</b>	<b>-15.0000-11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,0,0,0,0,0):</b>	<b>-15.0000-1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,0,0,0,0,0):</b>	<b>-15.0000-3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,0,0,0,0,0):</b>	<b>-15.0000-7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,0,0,0,0,0):</b>	<b>-15.0000-5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,1,0,0,0,0):</b>	<b>-15.0000+15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,1,0,0,0,0):</b>	<b>-15.0000+13.0000j,</b>
<b>(0,1,0,1,0,0,0,0):</b>	<b>-15.0000+9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,1,0,0,0,0):</b>	<b>-15.0000+11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,1,0,0,0,0):</b>	<b>-15.0000+1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,1,0,0,0,0):</b>	<b>-15.0000+3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,1,0,0,0,0):</b>	<b>-15.0000+7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,1,0,0,0,0):</b>	<b>-15.0000+5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,0,1,0,0,0):</b>	<b>-13.0000-15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,0,1,0,0,0):</b>	<b>-13.0000-13.0000j,</b>
<b>(0,1,0,0,1,0,0,0):</b>	<b>-13.0000-9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,0,1,0,0,0):</b>	<b>-13.0000-11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,0,1,0,0,0):</b>	<b>-13.0000-1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,0,1,0,0,0):</b>	<b>-13.0000-3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,0,1,0,0,0):</b>	<b>-13.0000-7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,0,1,0,0,0):</b>	<b>-13.0000-5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,1,1,0,0,0):</b>	<b>-13.0000+15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,1,1,0,0,0):</b>	<b>-13.0000+13.0000j,</b>

Performances de la SIM-OFDM dans un canal AWGN : Implémentation d'une nouvelle technique de décision.

---

<b>(0,1,0,1,1,0,0,0):</b>	<b>-13.0000+9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,1,1,0,0,0):</b>	<b>-13.0000+11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,1,1,0,0,0):</b>	<b>-13.0000+1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,1,1,0,0,0):</b>	<b>-13.0000+3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,1,1,0,0,0):</b>	<b>-13.0000+7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,1,1,0,0,0):</b>	<b>-13.0000+5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,0,0,1,0,0):</b>	<b>-9.0000-15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,0,0,1,0,0):</b>	<b>-9.0000-13.0000j,</b>
<b>(0,1,0,0,0,1,0,0):</b>	<b>-9.0000-9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,0,0,1,0,0):</b>	<b>-9.0000-11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,0,0,1,0,0):</b>	<b>-9.0000-1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,0,0,1,0,0):</b>	<b>-9.0000-3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,0,0,1,0,0):</b>	<b>-9.0000-7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,0,0,1,0,0):</b>	<b>-9.0000-5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,1,0,1,0,0):</b>	<b>-9.0000+15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,1,0,1,0,0):</b>	<b>-9.0000+13.0000j,</b>
<b>(0,1,0,1,0,1,0,0):</b>	<b>-9.0000+9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,1,0,1,0,0):</b>	<b>-9.0000+11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,1,0,1,0,0):</b>	<b>-9.0000+1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,1,0,1,0,0):</b>	<b>-9.0000+3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,1,0,1,0,0):</b>	<b>-9.0000+7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,1,0,1,0,0):</b>	<b>-9.0000+5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,0,1,1,0,0):</b>	<b>-11.0000-15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,0,1,1,0,0):</b>	<b>-11.0000-13.0000j,</b>

Performances de la SIM-OFDM dans un canal AWGN : Implémentation d'une nouvelle technique de décision.

---

<b>(0,1,0,0,1,1,0,0):</b>	<b>-11.0000-9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,0,1,1,0,0):</b>	<b>-11.0000-11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,0,1,1,0,0):</b>	<b>-11.0000-1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,0,1,1,0,0):</b>	<b>-11.0000-3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,0,1,1,0,0):</b>	<b>-11.0000-7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,0,1,1,0,0):</b>	<b>-11.0000-5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,1,1,1,0,0):</b>	<b>-11.0000+15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,1,1,1,0,0):</b>	<b>-11.0000+13.0000j,</b>
<b>(0,1,0,1,1,1,0,0):</b>	<b>-11.0000+9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,1,1,1,0,0):</b>	<b>-11.0000+11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,1,1,1,0,0):</b>	<b>-11.0000+1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,1,1,1,0,0):</b>	<b>-11.0000+3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,1,1,1,0,0):</b>	<b>-11.0000+7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,1,1,1,0,0):</b>	<b>-11.0000+5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,0,0,0,1,0):</b>	<b>-1.0000-15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,0,0,0,1,0):</b>	<b>-1.0000-13.0000j,</b>
<b>(0,1,0,0,0,0,1,0):</b>	<b>-1.0000-9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,0,0,0,1,0):</b>	<b>-1.0000-11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,0,0,0,1,0):</b>	<b>-1.0000-1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,0,0,0,1,0):</b>	<b>-1.0000-3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,0,0,0,1,0):</b>	<b>-1.0000-7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,0,0,0,1,0):</b>	<b>-1.0000-5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,1,0,0,1,0):</b>	<b>-1.0000+15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,1,0,0,1,0):</b>	<b>-1.0000+13.0000j,</b>

Performances de la SIM-OFDM dans un canal AWGN : Implémentation d'une nouvelle technique de décision.

---

<b>(0,1,0,1,0,0,1,0):</b>	<b>-1.0000+9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,1,0,0,1,0):</b>	<b>-1.0000+11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,1,0,0,1,0):</b>	<b>-1.0000+1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,1,0,0,1,0):</b>	<b>-1.0000+3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,1,0,0,1,0):</b>	<b>-1.0000+7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,1,0,0,1,0):</b>	<b>-1.0000+5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,0,1,0,1,0):</b>	<b>-3.0000-15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,0,1,0,1,0):</b>	<b>-3.0000-13.0000j,</b>
<b>(0,1,0,0,1,0,1,0):</b>	<b>-3.0000-9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,0,1,0,1,0):</b>	<b>-3.0000-11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,0,1,0,1,0):</b>	<b>-3.0000-1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,0,1,0,1,0):</b>	<b>-3.0000-3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,0,1,0,1,0):</b>	<b>-3.0000-7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,0,1,0,1,0):</b>	<b>-3.0000-5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,1,1,0,1,0):</b>	<b>-3.0000+15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,1,1,0,1,0):</b>	<b>-3.0000+13.0000j,</b>
<b>(0,1,0,1,1,0,1,0):</b>	<b>-3.0000+9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,1,1,0,1,0):</b>	<b>-3.0000+11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,1,1,0,1,0):</b>	<b>-3.0000+1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,1,1,0,1,0):</b>	<b>-3.0000+3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,1,1,0,1,0):</b>	<b>-3.0000+7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,1,1,0,1,0):</b>	<b>-3.0000+5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,0,0,1,1,0):</b>	<b>-7.0000-15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,0,0,1,1,0):</b>	<b>-7.0000-13.0000j,</b>

Performances de la SIM-OFDM dans un canal AWGN : Implémentation d'une nouvelle technique de décision.

---

<b>(0,1,0,0,0,1,1,0):</b>	<b>-7.0000-9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,0,0,1,1,0):</b>	<b>-7.0000-11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,0,0,1,1,0):</b>	<b>-7.0000-1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,0,0,1,1,0):</b>	<b>-7.0000-3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,0,0,1,1,0):</b>	<b>-7.0000-7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,0,0,1,1,0):</b>	<b>-7.0000-5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,1,0,1,1,0):</b>	<b>-7.0000+15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,1,0,1,1,0):</b>	<b>-7.0000+13.0000j,</b>
<b>(0,1,0,1,0,1,1,0):</b>	<b>-7.0000+9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,1,0,1,1,0):</b>	<b>-7.0000+11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,1,0,1,1,0):</b>	<b>-7.0000+1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,1,0,1,1,0):</b>	<b>-7.0000+3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,1,0,1,1,0):</b>	<b>-7.0000+7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,1,0,1,1,0):</b>	<b>-7.0000+5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,0,1,1,1,0):</b>	<b>-5.0000-15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,0,1,1,1,0):</b>	<b>-5.0000-13.0000j,</b>
<b>(0,1,0,0,1,1,1,0):</b>	<b>-5.0000-9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,0,1,1,1,0):</b>	<b>-5.0000-11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,0,1,1,1,0):</b>	<b>-5.0000-1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,0,1,1,1,0):</b>	<b>-5.0000-3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,0,1,1,1,0):</b>	<b>-5.0000-7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,0,1,1,1,0):</b>	<b>-5.0000-5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,1,1,1,1,0):</b>	<b>-5.0000+15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,1,1,1,1,0):</b>	<b>-5.0000+13.0000j,</b>

Performances de la SIM-OFDM dans un canal AWGN : Implémentation d'une nouvelle technique de décision.

---

<b>(0,1,0,1,1,1,1,0):</b>	<b>-5.0000+9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,1,1,1,1,0):</b>	<b>-5.0000+11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,1,1,1,1,0):</b>	<b>-5.0000+1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,1,1,1,1,0):</b>	<b>-5.0000+3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,1,1,1,1,0):</b>	<b>-5.0000+7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,1,1,1,1,0):</b>	<b>-5.0000+5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,0,0,0,0,1):</b>	<b>15.0000-15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,0,0,0,0,1):</b>	<b>15.0000-13.0000j,</b>
<b>(0,1,0,0,0,0,0,1):</b>	<b>15.0000-9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,0,0,0,0,1):</b>	<b>15.0000-11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,0,0,0,0,1):</b>	<b>15.0000-1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,0,0,0,0,1):</b>	<b>15.0000-3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,0,0,0,0,1):</b>	<b>15.0000-7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,0,0,0,0,1):</b>	<b>15.0000-5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,1,0,0,0,1):</b>	<b>15.0000+15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,1,0,0,0,1):</b>	<b>15.0000+13.0000j,</b>
<b>(0,1,0,1,0,0,0,1):</b>	<b>15.0000+9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,1,0,0,0,1):</b>	<b>15.0000+11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,1,0,0,0,1):</b>	<b>15.0000+1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,1,0,0,0,1):</b>	<b>15.0000+3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,1,0,0,0,1):</b>	<b>15.0000+7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,1,0,0,0,1):</b>	<b>15.0000+5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,0,1,0,0,1):</b>	<b>13.0000-15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,0,1,0,0,1):</b>	<b>13.0000-13.0000j,</b>

Performances de la SIM-OFDM dans un canal AWGN : Implémentation d'une nouvelle technique de décision.

---

(0,1,0,0,1,0,0,1):	13.0000-9.0000j,
(1,1,0,0,1,0,0,1):	13.0000-11.0000j,
(0,0,1,0,1,0,0,1):	13.0000-1.0000j,
(1,0,1,0,1,0,0,1):	13.0000-3.0000j,
(0,1,1,0,1,0,0,1):	13.0000-7.0000j,
(1,1,1,0,1,0,0,1):	13.0000-5.0000j,
(0,0,0,1,1,0,0,1):	13.0000+15.0000j,
(1,0,0,1,1,0,0,1):	13.0000+13.0000j,
(0,1,0,1,1,0,0,1):	13.0000+9.0000j,
(1,1,0,1,1,0,0,1):	13.0000+11.0000j,
(0,0,1,1,1,0,0,1):	13.0000+1.0000j,
(1,0,1,1,1,0,0,1):	13.0000+3.0000j,
(0,1,1,1,1,0,0,1):	13.0000+7.0000j,
(1,1,1,1,1,0,0,1):	13.0000+5.0000j,
(0,0,0,0,0,1,0,1):	9.0000-15.0000j,
(1,0,0,0,0,1,0,1):	9.0000-13.0000j,
(0,1,0,0,0,1,0,1):	9.0000-9.0000j ,
(1,1,0,0,0,1,0,1):	9.0000-11.0000j,
(0,0,1,0,0,1,0,1):	9.0000-1.0000j ,
(1,0,1,0,0,1,0,1):	9.0000-3.0000j ,
(0,1,1,0,0,1,0,1):	9.0000-7.0000j ,
(1,1,1,0,0,1,0,1):	9.0000-5.0000j ,
(0,0,0,1,0,1,0,1):	9.0000+15.0000j,
(1,0,0,1,0,1,0,1):	9.0000+13.0000j,

Performances de la SIM-OFDM dans un canal AWGN : Implémentation d'une nouvelle technique de décision.

---

<b>(0,1,0,1,0,1,0,1):</b>	<b>9.0000+9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,1,0,1,0,1):</b>	<b>9.0000+11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,1,0,1,0,1):</b>	<b>9.0000+1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,1,0,1,0,1):</b>	<b>9.0000+3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,1,0,1,0,1):</b>	<b>9.0000+7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,1,0,1,0,1):</b>	<b>9.0000+5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,0,1,1,0,1):</b>	<b>11.0000-15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,0,1,1,0,1):</b>	<b>11.0000-13.0000j,</b>
<b>(0,1,0,0,1,1,0,1):</b>	<b>11.0000-9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,0,1,1,0,1):</b>	<b>11.0000-11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,0,1,1,0,1):</b>	<b>11.0000-1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,0,1,1,0,1):</b>	<b>11.0000-3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,0,1,1,0,1):</b>	<b>11.0000-7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,0,1,1,0,1):</b>	<b>11.0000-5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,1,1,1,0,1):</b>	<b>11.0000+15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,1,1,1,0,1):</b>	<b>11.0000+13.0000j,</b>
<b>(0,1,0,1,1,1,0,1):</b>	<b>11.0000+9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,1,1,1,0,1):</b>	<b>11.0000+11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,1,1,1,0,1):</b>	<b>11.0000+1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,1,1,1,0,1):</b>	<b>11.0000+3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,1,1,1,0,1):</b>	<b>11.0000+7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,1,1,1,0,1):</b>	<b>11.0000+5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,0,0,0,1,1):</b>	<b>1.0000-15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,0,0,0,1,1):</b>	<b>1.0000-13.0000j,</b>

Performances de la SIM-OFDM dans un canal AWGN : Implémentation d'une nouvelle technique de décision.

---

(0,1,0,0,0,1,1):	1.0000-9.0000j ,
(1,1,0,0,0,1,1):	1.0000-11.0000j,
(0,0,1,0,0,1,1):	1.0000-1.0000j ,
(1,0,1,0,0,1,1):	1.0000-3.0000j ,
(0,1,1,0,0,1,1):	1.0000-7.0000j ,
(1,1,1,0,0,1,1):	1.0000-5.0000j ,
(0,0,0,1,0,1,1):	1.0000+15.0000j,
(1,0,0,1,0,1,1):	1.0000+13.0000j,
(0,1,0,1,0,1,1):	1.0000+9.0000j,
(1,1,0,1,0,1,1):	1.0000+11.0000j,
(0,0,1,1,0,1,1):	1.0000+1.0000j,
(1,0,1,1,0,1,1):	1.0000+3.0000j,
(0,1,1,1,0,1,1):	1.0000+7.0000j,
(1,1,1,1,0,1,1):	1.0000+5.0000j,
(0,0,0,0,1,0,1,1):	3.0000-15.0000j,
(1,0,0,0,1,0,1,1):	3.0000-13.0000j,
(0,1,0,0,1,0,1,1):	3.0000-9.0000j ,
(1,1,0,0,1,0,1,1):	3.0000-11.0000j,
(0,0,1,0,1,0,1,1):	3.0000-1.0000j ,
(1,0,1,0,1,0,1,1):	3.0000-3.0000j ,
(0,1,1,0,1,0,1,1):	3.0000-7.0000j ,
(1,1,1,0,1,0,1,1):	3.0000-5.0000j ,
(0,0,0,1,1,0,1,1):	3.0000+15.0000j,
(1,0,0,1,1,0,1,1):	3.0000+13.0000j,

**Performances de la SIM-OFDM dans un canal AWGN : Implémentation d'une nouvelle technique de décision.**

---

<b>(0,1,0,1,1,0,1,1):</b>	<b>3.0000+9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,1,1,0,1,1):</b>	<b>3.0000+11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,1,1,0,1,1):</b>	<b>3.0000+1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,1,1,0,1,1):</b>	<b>3.0000+3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,1,1,0,1,1):</b>	<b>3.0000+7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,1,1,0,1,1):</b>	<b>3.0000+5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,0,0,1,1,1):</b>	<b>7.0000-15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,0,0,1,1,1):</b>	<b>7.0000-13.0000j,</b>
<b>(0,1,0,0,0,1,1,1):</b>	<b>7.0000-9.0000j ,</b>
<b>(1,1,0,0,0,1,1,1):</b>	<b>7.0000-11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,0,0,1,1,1):</b>	<b>7.0000-1.0000j ,</b>
<b>(1,0,1,0,0,1,1,1):</b>	<b>7.0000-3.0000j ,</b>
<b>(0,1,1,0,0,1,1,1):</b>	<b>7.0000-7.0000j ,</b>
<b>(1,1,1,0,0,1,1,1):</b>	<b>7.0000-5.0000j ,</b>
<b>(0,0,0,1,0,1,1,1):</b>	<b>7.0000+15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,1,0,1,1,1):</b>	<b>7.0000+13.0000j,</b>
<b>(0,1,0,1,0,1,1,1):</b>	<b>7.0000+9.0000j,</b>
<b>(1,1,0,1,0,1,1,1):</b>	<b>7.0000+11.0000j,</b>
<b>(0,0,1,1,0,1,1,1):</b>	<b>7.0000+1.0000j,</b>
<b>(1,0,1,1,0,1,1,1):</b>	<b>7.0000+3.0000j,</b>
<b>(0,1,1,1,0,1,1,1):</b>	<b>7.0000+7.0000j,</b>
<b>(1,1,1,1,0,1,1,1):</b>	<b>7.0000+5.0000j,</b>
<b>(0,0,0,0,1,1,1,1):</b>	<b>5.0000-15.0000j,</b>
<b>(1,0,0,0,1,1,1,1):</b>	<b>5.0000-13.0000j,</b>

(0,1,0,0,1,1,1,1): 5.0000-9.0000j ,

(1,1,0,0,1,1,1,1): 5.0000-11.0000j,

(0,0,1,0,1,1,1,1): 5.0000-1.0000j ,

(1,0,1,0,1,1,1,1): 5.0000-3.0000j ,

(0,1,1,0,1,1,1,1): 5.0000-7.0000j ,

(1,1,1,0,1,1,1,1): 5.0000-5.0000j ,

(0,0,0,1,1,1,1,1): 5.0000+15.0000j,

(1,0,0,1,1,1,1,1): 5.0000+13.0000j,

(0,1,0,1,1,1,1,1): 5.0000+9.0000j,

(1,1,0,1,1,1,1,1): 5.0000+11.0000j,

(0,0,1,1,1,1,1,1): 5.0000+1.0000j,

(1,0,1,1,1,1,1,1): 5.0000+3.0000j,

(0,1,1,1,1,1,1,1): 5.0000+7.0000j,

(1,1,1,1,1,1,1,1): 5.0000+5.0000j}

**return** mapping\_table256

**else:**

**return**('error')

**def** Table\_demapping(M):

**if** M==4:

mapping\_table\_4 = Table\_mapping(M)

demapping\_table4 = {v : k for k, v in mapping\_table\_4.items()}

**return** demapping\_table4

**elif** M==16:

```
mapping_table_16 = Table_mapping(M)
```

```
demapping_table16 = {v : k for k, v in mapping_table_16.items()}
```

```
return demapping_table16
```

```
elif M==64:
```

```
mapping_table_64=Table_mapping(M)
```

```
demapping_table64 = {v : k for k, v in mapping_table_64.items()}
```

```
return demapping_table64
```

```
elif M==256:
```

```
mapping_table_256=Table_mapping(M)
```

```
demapping_table256 = {v : k for k, v in mapping_table_256.items()}
```

```
return demapping_table256
```

```
else:
```

```
return('error')
```

```
def Mapping(bits,M):
```

```
if (M==4):
```

```
mapping_table_4QAM=Table_mapping(M)
```

```
return np.array([mapping_table_4QAM[tuple(b)] for b in bits])
```

```
elif (M==16):
```

```
mapping_table_16QAM=Table_mapping(M)
```

```
return np.array([mapping_table_16QAM[tuple(b)] for b in bits])
```

```
elif (M==64):
```

```
mapping_table_64QAM=Table_mapping(M)
```

```
return np.array([mapping_table_64QAM[tuple(b)] for b in bits])
```

```
elif (M==256):

    mapping_table_256QAM=Table_mapping(M)

    return np.array([mapping_table_256QAM[tuple(b)] for b in bits])

else:

    return('error')

def Demapping(Seq_recu,M):

    if (M==4):

        demapping_table4=Table_demapping(M)

        constellation = np.array([x for x in demapping_table4.keys()])           # array of
possible constellation points

        dists = abs(Seq_recu.reshape((-1,1)) - constellation.reshape((1,-1)))   # calculate
distance of each RX point to each possible point

        const_index = dists.argmin(axis=1)   # for each element in QAM, choose the index in
constellation that belongs to the nearest constellation point

        hardDecision = constellation[const_index]   # get back the real constellation point

        return np.vstack([demapping_table4[C] for C in hardDecision]), hardDecision   #
transform the constellation point into the bit groups

    elif (M==16):

        demapping_table16 = Table_demapping(M)

        constellation = np.array([x for x in demapping_table16.keys()])

        dists = abs(Seq_recu.reshape((-1,1)) - constellation.reshape((1,-1)))

        const_index = dists.argmin(axis=1)

        hardDecision = constellation[const_index]

        return np.vstack([demapping_table16[C] for C in hardDecision]), hardDecision
```

**elif** (M==64):

```
demapping_table64=Table_demapping(M)
```

```
constellation = np.array([x for x in demapping_table64.keys()])
```

```
dists = abs(Seq_recu.reshape((-1,1)) - constellation.reshape((1,-1)))
```

```
const_index = dists.argmin(axis=1)
```

```
hardDecision = constellation[const_index]
```

```
return np.vstack([demapping_table64[C] for C in hardDecision]), hardDecision
```

**elif** (M==256):

```
demapping_table256=Table_demapping(M)
```

```
constellation = np.array([x for x in demapping_table256.keys()])
```

```
dists = abs(Seq_recu.reshape((-1,1)) - constellation.reshape((1,-1)))
```

```
const_index = dists.argmin(axis=1)
```

```
hardDecision = constellation[const_index]
```

```
return np.vstack([demapping_table256[C] for C in hardDecision]), hardDecision
```

**else:**

```
return('error')
```