



Royaume du Maroc
Université Hassan 2 de Casablanca
Faculté des Sciences et Techniques de Mohammedia
Département de Génie électrique

Rapport de projet

Thème:

**Modélisation et étude des performances d'une transmission à base d'un
MODEM OFDM**

Filière : Ingénierie des Systèmes Embarqués, Réseaux et Télécommunications

Présenté par:

HAYAOUI Ayman

HABBAS Ayoub

EL ABBADI abderrahim

Encadré Par:

Pr. A. SAHEL

Année Universitaire 2023-2024

Table des matières

INTRODUCTION :	3
PARTIE 1 : ETUDE THEORIQUE DE LA MODULATION OFDM :	4
1.1 NÉCESSITÉ D'UTILISATION DE LA OFDM.	4
1.1.1 Efficacité spectrale :	4
1.1.2 Robustesse aux interférences	5
1.1.3 Gestion des trajets multiples	5
1.1.4 Compatibilité avec les standards existants	6
1.1.5 Adaptabilité aux conditions du canal	7
1.2 PRINCIPE DE L'OFDM	8
1.3 MODÈLE MATHÉMATIQUE DE L'OFDM	9
1.4 AVANTAGES ET LIMITATIONS	11
PARTIE 2 : Modélisation d'un MODEM OFDM	13
1.1 MODELISATION D'UN MODULATEUR OFDM	14
1.2 MODELISATION D'UN DEMODULATEUR OFDM	18
PARTIE 3 : ETUDE DES PERFORMANCES DU MODEM OFDM :	22
1.1 CONSTRUCTION D'UN MODEM OFDM (QPSK/16PSK)	22
1.2 COMPARAISON DES PERFORMANCES DES 2 MODEMS OFDM	22
conclusion	29

Liste des figures

Figure 1 : Représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM	8
Figure 2 : MODÉLISATION D'UN MODEM OFDM	13
Figure 3 : OFDM avec porteuses modulés par la 16-PSK.....	14
Figure 4 : OFDM avec porteuses modulés par la QPSK.....	14
Figure 5 : OFDM pour les porteuses modulées par la QPSK.....	18
Figure 6 : OFDM pour les porteuses modulées par la 16-PSK.....	18
Figure 7 : MODEM OFDM (QPSK/16PSK).....	22
Figure 8 : L'encombrement spectral Pour le Modem OFDM avec modulation QPSK :	23
Figure 9 : Constellation Pour le Modem OFDM avec modulation QPSK.....	23
Figure 10 : Diagramme de l'œil après modulation OFDM :.....	24
Figure 11 : L'encombrement spectral Pour le Modem OFDM avec modulation 16-PSK :..	24
Figure 12 : Constellation Pour le Modem OFDM avec modulation 16-PSK.....	25
Figure 13 : Diagramme de l'œil après modulation OFDM :.....	25

INTRODUCTION :

La modulation Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) est devenue une technologie clé dans les systèmes de communication numérique à haut débit sur des canaux sélectifs en fréquence. Avec l'avancement des communications numériques, la nécessité d'utiliser l'OFDM est devenue incontournable, offrant une solution efficace pour répondre aux exigences croissantes de capacité de données et d'efficacité spectrale. Les avantages de l'OFDM se manifestent dans divers domaines, allant des systèmes ADSL et de diffusion radio/télévision numérique aux futures normes telles que le VDSL et la téléphonie de quatrième génération.

Ce projet vise à étudier en détail les performances d'une transmission basée sur un modem OFDM, en se concentrant sur la modélisation et l'analyse des différents aspects de la technologie OFDM. L'objectif principal est d'explorer les avantages et les limitations de l'OFDM, ainsi que d'évaluer les performances du système dans des conditions réelles, en tenant compte des perturbations et des atténuations du canal à trajets multiples.

Dans ce rapport, nous commencerons par une étude théorique approfondie de la modulation OFDM, en examinant ses principes fondamentaux, son modèle mathématique, ses avantages et ses limitations. Ensuite, nous présenterons la modélisation d'un modulateur et d'un démodulateur OFDM, en mettant l'accent sur deux schémas de modulation couramment utilisés : QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) et 16-PSK (16-Phase Shift Keying). Enfin, nous étudierons les performances du modem OFDM à travers la construction de deux modems (QPSK/16PSK), en comparant leurs performances en termes d'encombrement spectral, de constellation, de qualité de transmission (diagramme d'œil), de taux d'erreur binaire (TEB) et de sensibilité au bruit (AWGN).

Cette étude vise à fournir des informations approfondies sur les performances de la technologie OFDM dans différents scénarios et à servir de base pour le développement et l'optimisation des systèmes de communication numérique à haut débit.

PARTIE 1 : ETUDE THEORIQUE DE LA MODULATION OFDM :

1.1 NÉCESSITÉ D'UTILISATION DE LA OFDM.

L'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est une technique de modulation numérique largement utilisée dans les systèmes de communication sans fil et filaires. Elle est nécessaire pour plusieurs raisons importantes :

1.1.1 Efficacité spectrale :

L'efficacité spectrale est un concept important en télécommunications qui mesure la capacité d'un système à transmettre des données de manière efficace dans une bande de fréquences donnée. En ce qui concerne l'OFDM, cette technique est particulièrement efficace pour plusieurs raisons :

- **Utilisation optimale de la bande passante :** L'OFDM divise la bande passante disponible en plusieurs sous-canaux, appelés sous-porteuses, qui sont espacés de manière à éviter tout chevauchement spectral. Chaque sous-porteuse transporte des données indépendamment, ce qui permet une transmission parallèle et une utilisation plus efficace de la bande passante.
- **Réduction du spectre de garde :** Contrairement à d'autres techniques de modulation qui nécessitent un spectre de garde pour éviter les interférences inter symboles, l'OFDM utilise des sous-porteuses orthogonales, ce qui réduit le besoin de spectre de garde et permet une utilisation plus efficace du spectre radioélectrique.
- **Adaptabilité de la largeur de bande :** L'OFDM peut être adaptée pour s'adapter à différents types de canaux en ajustant le nombre de sous-porteuses utilisées. Cela permet d'optimiser l'utilisation de la bande passante en fonction des conditions du canal et des exigences de transmission.
- **Capacité à gérer les canaux sélectifs en fréquence :** Les canaux sans fil peuvent présenter des caractéristiques de sélectivité en fréquence, où certaines fréquences sont atténuées ou amplifiées par rapport à d'autres.

1.1.2 Robustesse aux interférences

La robustesse aux interférences est un aspect crucial des systèmes de communication sans fil, et l'OFDM présente plusieurs caractéristiques qui en font une technique de modulation particulièrement robuste :

- **Isolation des sous-porteuses :** L'OFDM divise la bande passante en plusieurs sous-porteuses orthogonales. Chaque sous-porteuse transporte des données indépendamment des autres, ce qui signifie que si une sous-porteuse est affectée par des interférences, les autres sous-porteuses peuvent continuer à fonctionner normalement. Cela garantit une communication plus robuste dans des environnements perturbés.
- **Gestion des canaux sélectifs en fréquence :** Les canaux sans fil peuvent présenter des caractéristiques de sélectivité en fréquence, où certaines fréquences sont atténuées ou amplifiées par rapport à d'autres. L'OFDM est capable de gérer ces canaux sélectifs en fréquence en ajustant la puissance des sous-porteuses pour compenser les effets du canal, ce qui améliore la robustesse aux interférences.
- **Correction d'erreurs :** L'OFDM peut être combinée avec des techniques de correction d'erreurs, telles que le codage à redondance cyclique (CRC) ou le codage de convolution, pour améliorer la robustesse aux interférences et aux erreurs de transmission. Ces techniques permettent de détecter et de corriger les erreurs qui se produisent pendant la transmission, ce qui améliore la fiabilité de la communication.

1.1.3 Gestion des trajets multiples

La gestion des trajets multiples est un défi majeur dans les communications sans fil, notamment en raison des réflexions et des diffractions des signaux sur les obstacles, ce qui entraîne différents trajets que le signal peut suivre pour atteindre le récepteur. L'OFDM présente plusieurs caractéristiques qui en font une technique efficace pour gérer les effets des trajets multiples :

- **Utilisation d'intervalles de garde :** L'OFDM utilise des intervalles de garde entre les symboles pour minimiser les interférences inter symboles causées par les trajets multiples. Ces intervalles permettent de réduire les effets des trajets multiples en séparant temporellement les symboles, ce qui améliore la qualité de la transmission.

- **Sélectivité en fréquence :** Les effets des trajets multiples peuvent varier en fonction de la fréquence. L'OFDM divise la bande passante en plusieurs sous-porteuses, ce qui permet de gérer efficacement les canaux sélectifs en fréquence causés par les trajets multiples. En ajustant la puissance des sous-porteuses en fonction des caractéristiques du canal, l'OFDM peut compenser les effets des trajets multiples et améliorer la qualité de la transmission.
- **Correction d'erreurs :** L'OFDM peut être combinée avec des techniques de correction d'erreurs pour améliorer la robustesse aux erreurs causées par les trajets multiples. En détectant et en corrigeant les erreurs qui se produisent pendant la transmission, l'OFDM peut améliorer la fiabilité de la communication dans des environnements perturbés par les trajets multiples.

1.1.4 Compatibilité avec les standards existants

La compatibilité avec les standards existants est un aspect important de l'adoption de toute technologie de communication. L'OFDM est largement utilisée dans de nombreux standards de communication sans fil, ce qui en fait une technique de modulation très compatible. Voici comment l'OFDM répond à ce besoin :

- **Intégration dans les normes existantes :** L'OFDM est intégrée dans de nombreux standards de communication sans fil, tels que le Wi-Fi (IEEE 802.11), le LTE (Long Term Evolution), le DVB-T (Digital Video Broadcasting - Terrestrial) et le WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access). Cette intégration dans des normes bien établies permet à l'OFDM d'être largement adoptée et prise en charge par une variété d'appareils et de systèmes.
- **Facilité de mise en œuvre :** L'OFDM est relativement facile à mettre en œuvre dans les dispositifs électroniques en raison de sa structure modulaire. Les sous-porteuses orthogonales peuvent être générées et modulées indépendamment les unes des autres, ce qui simplifie la conception des circuits et permet une intégration efficace dans les systèmes existants.
- **Compatibilité avec les canaux existants :** L'OFDM est conçue pour fonctionner efficacement dans des environnements de communication sans fil complexes, y compris ceux avec des trajets multiples, des interférences et des variations de canal.

Cela permet à l'OFDM de s'adapter aux conditions réelles des canaux sans fil et de fournir des performances fiables et cohérentes dans une variété d'environnements.

- **Interopérabilité entre les dispositifs :** En étant intégrée dans des normes largement adoptées, l'OFDM permet l'interopérabilité entre les différents dispositifs et systèmes qui utilisent ces normes. Cela signifie que les dispositifs de différents fabricants peuvent communiquer entre eux de manière transparente, ce qui est essentiel pour assurer une connectivité efficace dans les réseaux sans fil.

1.1.5 Adaptabilité aux conditions du canal

L'adaptabilité aux conditions du canal est une caractéristique clé de l'OFDM qui lui permet de maintenir des performances élevées même dans des environnements de communication sans fil changeants. Voici comment l'OFDM atteint cette adaptabilité :

- **Modulation adaptative :** L'OFDM peut être associée à des techniques de modulation adaptative qui ajustent dynamiquement la modulation en fonction des conditions du canal. Par exemple, lorsque le canal est de bonne qualité, des modulations à haute densité de bits peuvent être utilisées pour augmenter le débit de transmission, tandis que des modulations plus robustes peuvent être utilisées dans des conditions de canal plus difficiles pour maintenir la fiabilité de la communication.
- **Gestion de la puissance :** L'OFDM peut ajuster la puissance des sous-porteuses en fonction des conditions du canal. Les sous-porteuses peuvent être allouées davantage de puissance dans les parties du canal où la qualité du signal est faible, ce qui permet de compenser les effets d'atténuation et de maintenir des performances de transmission élevées.
- **Correction d'erreurs :** L'OFDM peut être combinée avec des techniques de correction d'erreurs qui détectent et corrigent les erreurs qui se produisent pendant la transmission. En adaptant la correction d'erreurs en fonction de la qualité du canal, l'OFDM peut améliorer la fiabilité de la communication dans des environnements de canal variables.
- **Utilisation d'antennes adaptatives :** En combinant l'OFDM avec des systèmes d'antennes adaptatives, il est possible d'ajuster la direction des antennes en fonction des conditions du canal. Cela permet d'optimiser la réception du signal et d'améliorer

1.2 PRINCIPE DE L'OFDM

Le principe de l' OFDM est de transmettre les informations sur plusieurs porteuses orthogonales entre elles, ainsi le spectre du signal présente une occupation optimale de la bande allouée [1].

Comme le montre la Figure 1, L'OFDM divise le canal de communication en cellules dans les domaines du temps et de la fréquence. Chaque cellule fréquence/temps est associée à une porteuse dédiée, qui est une onde sinusoïdale à une fréquence spécifique. L'ensemble des porteuses est utilisé pour transporter l'information à transmettre.

Pour transmettre les données, chaque porteuse est modulée individuellement à un faible débit, généralement par des techniques de modulation telles que QPSK ou QAM. Ces modulations permettent de représenter les bits de données sous forme de variations de phase ou d'amplitude du signal porteur, ce qui permet d'encoder l'information à transmettre.

Un symbole OFDM représente l'ensemble des informations contenues dans toutes les porteuses à un instant donné. Chaque symbole contient donc une partie de l'information totale à transmettre, et l'ensemble des symboles forme le signal OFDM complet. Cette approche permet une utilisation efficace du spectre en divisant la bande passante disponible en plusieurs porteuses orthogonales, réduisant ainsi les interférences entre les signaux.

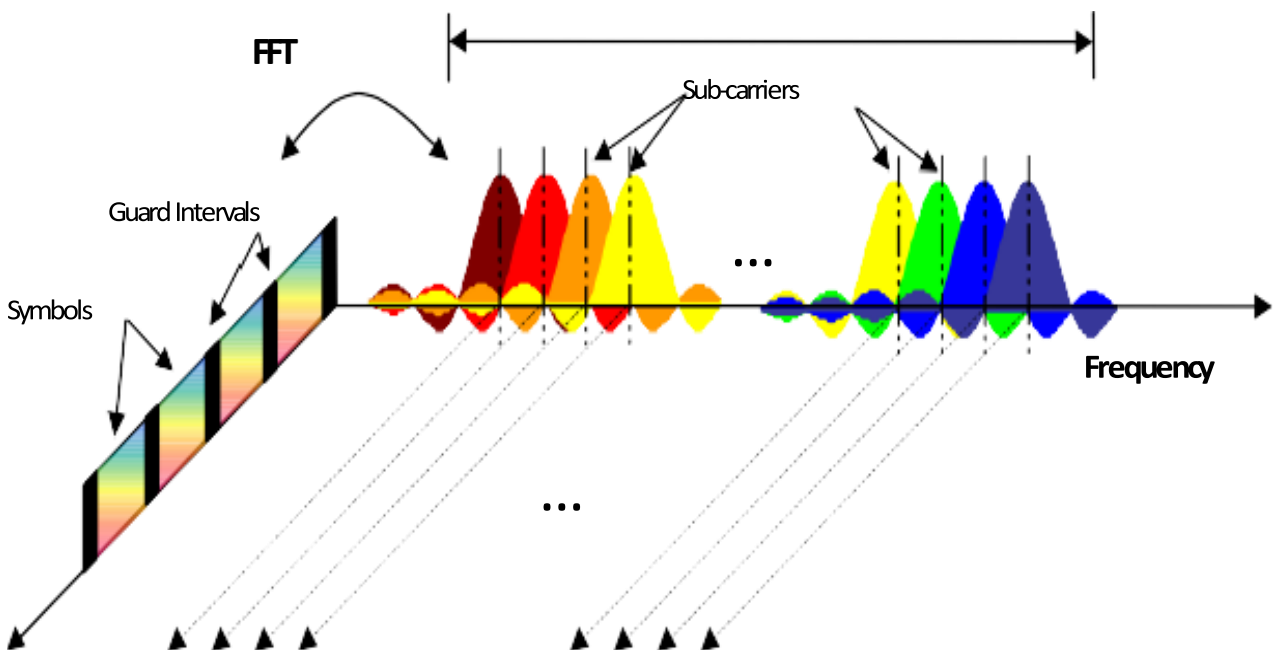


FIGURE 1 : REPRÉSENTATION FRÉQUENTIELLE ET TEMPORELLE D'UN SIGNAL OFDM

La technique de transmission OFDM repose sur l'émission simultanée sur plusieurs bandes de fréquences, généralement situées entre 2 et 30 MHz. Chaque bande de fréquence contient un ensemble de N porteuses. Ces porteuses sont des ondes sinusoïdales à des fréquences spécifiques, qui sont utilisées pour transporter l'information à transmettre. L'émission simultanée sur ces bandes de fréquences permet d'augmenter le débit de transmission en répartissant l'information sur un plus grand nombre de porteuses.

Pour l'UMTS, qui utilise une bande allouée de 5 MHz, le signal est réparti sur un ensemble de porteuses. Les fréquences de travail sont soigneusement choisies pour respecter les réglementations en vigueur, tandis que les autres porteuses restent inactives, "éteintes" de manière logicielle pour éviter les interférences.

Le signal OFDM est émis à un niveau relativement élevé pour permettre une transmission à haut débit. Il est injecté simultanément sur plusieurs porteuses à différentes fréquences. Cette redondance dans la transmission garantit une certaine robustesse du système : si l'une des porteuses est atténuée, le signal peut toujours être reçu grâce à l'émission simultanée sur les autres porteuses actives.

1.3 MODÈLE MATHÉMATIQUE DE L'OFDM

➤ Modulateur OFDM

Si on pose que le signal modulé en bande de base $s(t)$ est échantillonné par une période T_s/N . Appelons T_S la durée symbole c'est-à-dire le temps qui sépare 2 séquences de N données. Les échantillons S_n s'écrivent :

$$S_n = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi \frac{kn}{N}}$$

L'équation représente la Transformée de Fourier Inverse des symboles C_k déduits de la constellation du QPSK ou QAM, donc il suffit d'appliquer l'algorithme de la FFT (Fast Fourier Transform) sur ces symboles C_k pour réaliser la modulation OFDM. Le schéma de principe du modulateur OFDM en utilisant l'algorithme de la transformée de Fourier rapide inverse est présenté dans la figure au-dessous

➤ Démodulateur OFDM

Pour démoduler, on va d'abord transposer le signal en bande de base, donc effectuer une translation de $f_0 + B/2$, fréquence médiane de la bande passante. Le spectre occupera la bande $[-B/2, B/2]$, comme on le voit sur le schéma de la Figure 3 (b). La bande passante du signal étant $B/2 = N/2T_s$, la fréquence d'échantillonnage doit être supérieure ou égale à $2B/2$ soit N/T_s . L'échantillonnage se fera aux temps $t_n = nT_s/N$.

Où le signal émis est :

$$s(t) = e^{2j\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi \frac{k}{T_s} t}$$

Le signal reçu est :

$$y(t) = \sum C_k H_k(t) e^{2j\pi \left(f_0 + \frac{k}{T_s}\right) t} = e^{2j\pi f_0 t} \sum C_k H_k(t) e^{2j\pi \frac{k}{T_s} t}$$

Le signal reçu en bande de base après le décalage en fréquence de $f_0 + B/2$ est donné par :

$$z(t_n) = y(t) e^{-2j\pi \left(f_0 + \frac{N}{2T_s}\right) t} = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k e^{2j\pi \frac{(k-N)t}{T_s}}$$

L'échantillonnage se fait à une période T_s/N , le signal reçu après échantillonnage sera :

$$z(t_n) = z\left(\frac{nT_s}{N}\right) = (-1)^n \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k e^{2j\pi \frac{kn}{N}}$$

On voit que $z(t_n)$ est la Transformée de Fourier discrète inverse de $C_k H_k$. La démodulation consiste donc à effectuer une Transformée de Fourier rapide. La Figure 4 présente le schéma de principe du démodulateur OFDM.

1.4 AVANTAGES ET LIMITATIONS

Avantages de la modulation OFDM

Les avantages de la modulation de données OFDM :

- Le spectre OFDM est composé de sous-porteuses. Cela permet une utilisation efficace du spectre de fréquences par rapport à méthode FDM traditionnelle.
- Dans l'OFDM, le canal à large bande est divisé en sous-canaux à bande étroite plus petits. Cela rend l'OFDM résistant à l'évanouissement sélectif en fréquence. De plus, la chaîne d'émission/réception OFDM utilise un encodeur/décodeur de canal et un entrelaceur/désinterlaver, qui aide à récupérer les symboles OFDM perdus en raison de la décoloration.
- OFDM utilise le préfixe cyclique pour éliminer ISI (Inter Symbol Interference) trouvé dans l'environnement du canal à trajets multiples. Par conséquent, il est robuste à l'évanouissement par trajets multiples.
- L'estimation et l'égalisation du canal ont été effectuées à l'aide d'un modèle connu (c'est-à-dire un préambule) et des porte-pilotes intégrés dans un symbole. C'est plus simple et plus efficace que l'égalisation des canaux utilisée dans le système SC (Single Carrier).
- Les algorithmes d'estimation et de correction du décalage temporel sont très faciles grâce à la technique de corrélation.
- Il est possible d'allouer de la bande passante en fonction des besoins en ressources. Par conséquent, l'OFDM est la bande passante technique évolutive.
- OFDM est utilisé pour mettre en œuvre la modulation et la démodulation des données par à l'aide de techniques FFT efficaces sur le plan informatique.
- OFDM est moins sensible aux dégradations du décalage du temps d'échantillonnage que le système SC.
- OFDM est robuste contre les interférences co-canal à bande étroite.
- Le récepteur OFDM ne nécessite pas de filtres de sous-canal accordés, contrairement au FDM.

Inconvénients de la modulation OFDM

Les inconvénients de la modulation de données OFDM :

- Le signal OFDM a un PAPR (rapport de puissance crête/moyenne) élevé en raison de son amplitude de bruit ayant une grande plage dynamique. Pour cette raison, le système de transmission basé sur OFDM nécessite RF PA (amplificateur de puissance) avec PAPR plus élevé.
- OFDM est plus sensible au CFO (décalage de fréquence porteuse) que le système SC. Il a un CFO plus élevé en raison de différents LO (oscillateurs locaux) et de fuites DFT. Cela nécessite des algorithmes complexes de correction du décalage de fréquence au niveau du récepteur OFDM.
- Il est sujet à l'ISI (Inter Symbol Interference) et à l'ICI (Inter Carrier Interference). Cela nécessite des algorithmes de correction du décalage temporel et du décalage de fréquence.
- Comme le spectre OFDM se déplace à travers plusieurs chemins qui nécessitent une bande de garde pour éviter les erreurs ISI dues à décalages temporels. L'utilisation d'un préfixe cyclique entraîne une perte d'efficacité.
- OFDM est sensible au décalage Doppler.
- OFDM nécessite un circuit d'émetteur linéaire, qui souffre de Faible efficacité énergétique.

PARTIE 2 : MODÉLISATION D'UN MODEM OFDM

L'Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) représente une avancée majeure dans les communications numériques, permettant une transmission efficace de données haut débit sur des canaux sujets à des distorsions en fréquence. En divisant la bande passante en sous-porteuses orthogonales, l'OFDM optimise l'utilisation du spectre et offre une robustesse accrue face aux interférences. Fondamental dans les systèmes modernes de communication, l'OFDM intègre à la fois un modulateur et un démodulateur. Le modulateur OFDM prépare les données pour la transmission en les adaptant au format spécifique de l'OFDM, tandis que le démodulateur OFDM assure la récupération précise des données à partir du signal reçu. Ensemble, ces deux composants forment un système complet, garantissant une transmission fiable et efficace des données à travers des canaux de communication complexes. La conception et le fonctionnement de ces composants sont essentiels pour assurer des communications sans fil de haute qualité, tant pour les applications grand public que professionnelles.

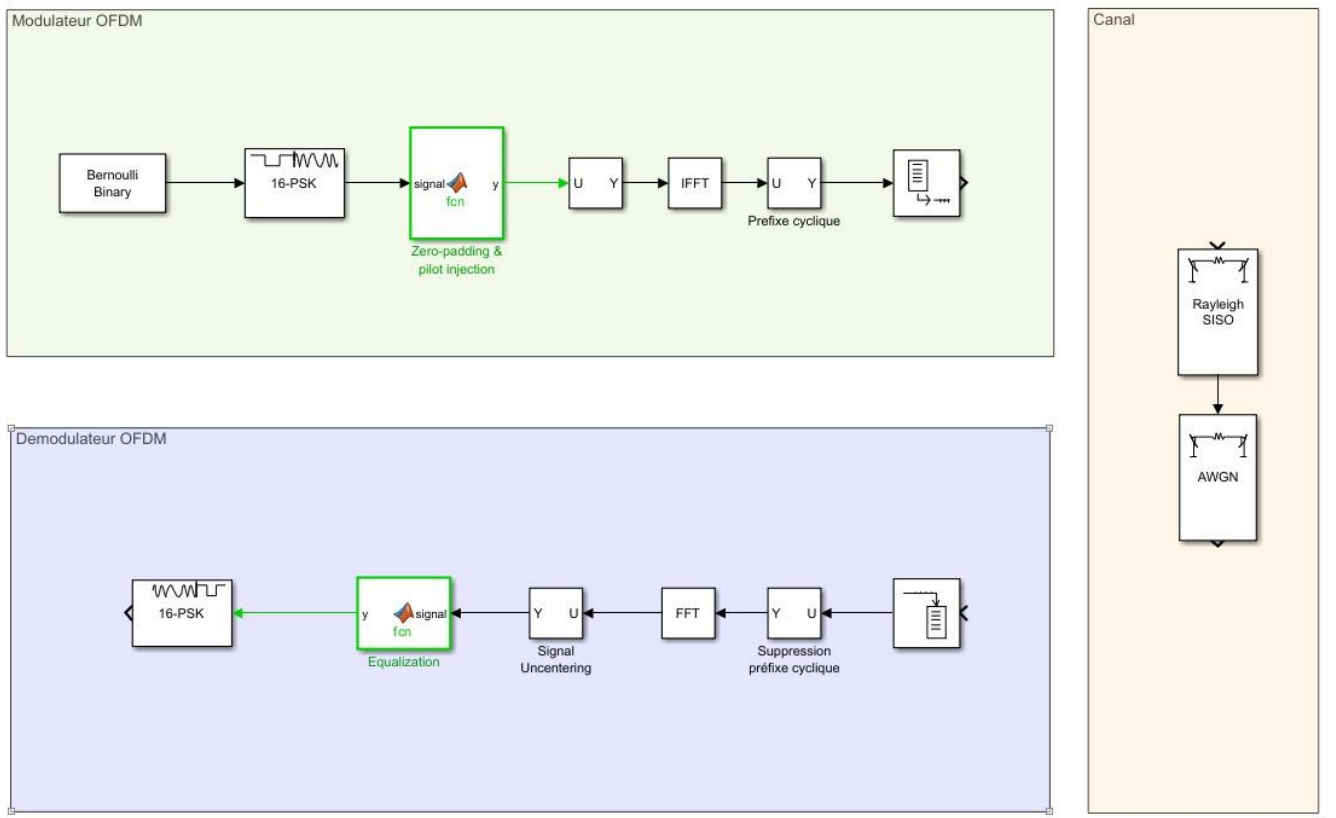


FIGURE 2 : MODÉLISATION D'UN MODEM OFDM

1.1 MODELISATION D'UN MODULATEUR OFDM

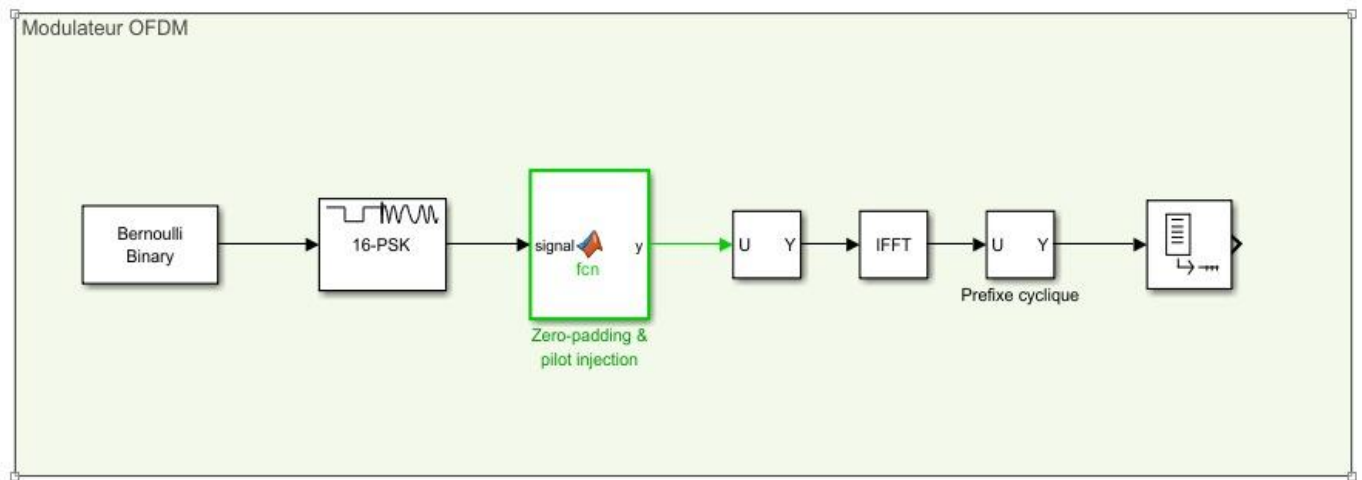


FIGURE 3 : OFDM AVEC PORTEUSES MODULÉS PAR LA 16-PSK

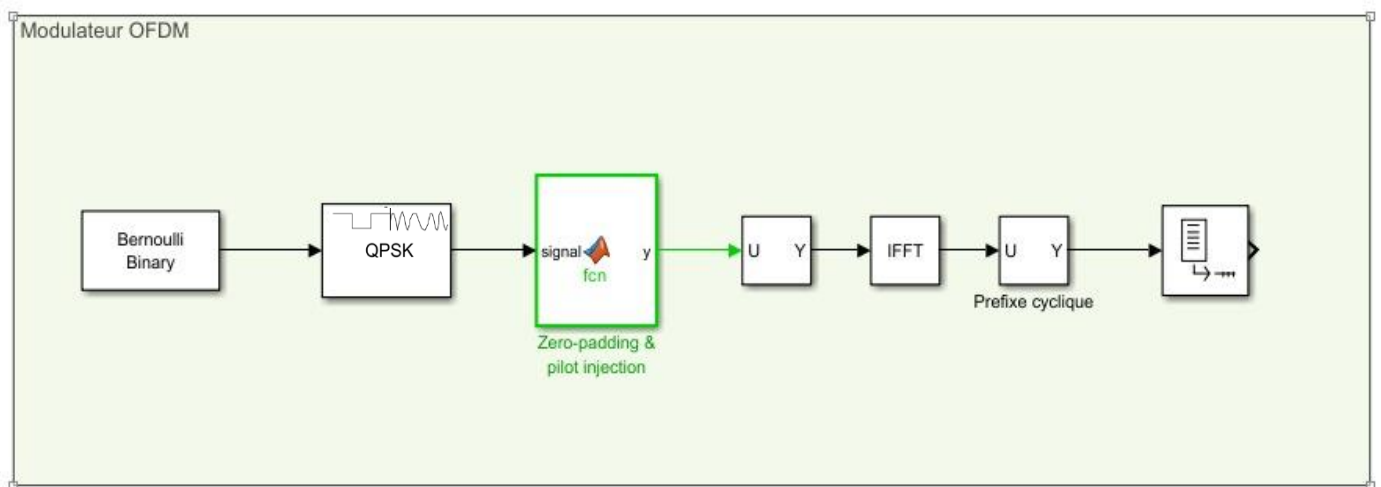


FIGURE 4 : OFDM AVEC PORTEUSES MODULÉS PAR LA QPSK

Le modulateur OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) constitue une composante essentielle dans les systèmes de communication à haut débit. Il permet la transmission efficace de données numériques sur des canaux sans fil en divisant la bande passante en sous-porteuses orthogonales. Chaque sous-porteuse transporte une partie des

données, ce qui permet d'optimiser l'utilisation du spectre et de minimiser les interférences. Le modulateur OFDM comprend plusieurs blocs fonctionnels qui coopèrent pour préparer les données à la transmission. Chaque bloc joue un rôle spécifique dans le processus global de modulation OFDM, contribuant à garantir une communication fiable et efficace. Explorons maintenant en détail le fonctionnement de chaque bloc du modulateur OFDM.

Bernoulli Binary : son rôle serait de créer une séquence de données binaires qui serviraient ensuite de base pour la modulation OFDM. Cette séquence binaire pourrait représenter les bits à transmettre sur les sous-porteuses OFDM. Ainsi, le bloc "Bernoulli Binary" serait responsable de la génération des données de base pour le processus de modulation OFDM.

Modulation (16-PSK ou QPSK) : joue un rôle central en assignant les données binaires aux symboles de phase appropriés, prêts à être transmis sur les sous-porteuses. Ce processus permet de convertir les données numériques en une forme adaptée à la modulation OFDM, facilitant ainsi la transmission efficace à travers le canal de communication. En choisissant entre des schémas de modulation comme le 16-PSK ou le QPSK, le modulateur OFDM peut optimiser la capacité de transmission et la robustesse du système, en tenant compte des exigences spécifiques de bande passante et de qualité de transmission. Ainsi, la modulation constitue une étape essentielle dans le processus de modélisation OFDM, contribuant à garantir des communications fiables et efficaces.

Zero-padding & pilot injection : Ce bloc de fonction est responsable de l'insertion des symboles pilotes dans le signal OFDM. Les symboles pilotes sont des symboles de référence insérés à intervalles réguliers dans le signal OFDM afin de faciliter l'estimation du canal et la compensation des distorsions. La fonction prend en compte les paramètres tels que le nombre de zéros (nbZeros), le nombre de pilotes (nbPilots), le signal OFDM (signal), et la longueur Signal Centering : est utilisé pour centrer le signal autour de zéro, ce qui est souvent une étape préliminaire dans le traitement du signal pour diverses applications de communication et de traitement du signal. Son rôle principal est d'éliminer la composante continue du signal et de le recentrer autour de zéro, ce qui peut faciliter la détection des symboles et améliorer les performances du système dans certaines situations. Cette opération peut être réalisée en soustrayant la moyenne du signal ou en utilisant d'autres techniques de recentrage du signal pour garantir une représentation optimale des données.


```

function y = fcn(nbZeros, nbPilots, signal, nUtile)

    index = 1;

    intervalle = floor(nUtile/nbPilots)+1;
    output = zeros(nbZeros+nbPilots+nUtile,1)+1j *
zeros(nbZeros+nbPilots+nUtile,1);

    for i=nbZeros/2+1:nUtile+nbZeros/2+nbPilots
        if mod(i-nbZeros/2+floor(intervalle/2),intervalle) ==
0
            output(i)= sqrt(2)+sqrt(2)*1j;
        else
            output(i)=signal(index);
            index = index+1;
        end
    end
y = output;

```

IFFT : L'acronyme IFFT signifie "Inverse Fast Fourier Transform" (Transformée de Fourier Rapide Inverse en français). L'IFFT est l'opération inverse de la transformée de Fourier rapide (FFT). Son rôle dans le contexte de la modulation OFDM est de convertir le domaine fréquentiel des symboles OFDM en domaine temporel. Cela signifie qu'il prend les symboles modulés sur les sous-porteuses orthogonales dans le domaine fréquentiel et les transforme en signaux dans le domaine temporel. Cette opération est cruciale dans le processus de modulation OFDM car elle prépare les symboles modulés pour la transmission à travers le canal de communication, où ils seront affectés par des distorsions telles que l'atténuation, le délai et l'interférence. L'IFFT permet également de maintenir l'orthogonalité des sous-porteuses, ce qui est essentiel pour éviter l'interférence entre les symboles lors de la transmission. En résumé, l'IFFT est une étape clé dans le modulateur OFDM qui permet de convertir les symboles modulés dans le domaine fréquentiel en signaux temporels prêts pour la transmission.

Préfixe cyclique : est une technique utilisée dans les systèmes de communication OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) pour atténuer les effets de l'interférence inter-symbole (ISI) causée par le canal de communication. Son rôle principal est d'ajouter une copie des derniers échantillons de la séquence OFDM à la fin de celle-ci, formant ainsi un préfixe cyclique. Lors de la réception du signal, le récepteur utilise ce préfixe pour corriger les interférences et récupérer les données sans erreur. Le CP améliore la robustesse

du système OFDM en compensant les distorsions temporelles introduites par le canal de transmission, ce qui permet d'atteindre de meilleures performances en termes de taux d'erreur binaire (TEB) et de qualité de transmission.

Unbuffer : est utilisée pour restaurer les données de leur format tampon (buffer) d'origine après qu'elles aient été préalablement mises en tampon pour un traitement ou une manipulation spécifique. Elle permet de défaire l'opération de mise en tampon en extrayant les données du tampon et en les remettant dans leur format d'origine. En d'autres termes, "Unbuffer" annule l'effet de "Buffer", qui consiste à mettre les données en tampon pour une manipulation ultérieure. Cette fonction est couramment utilisée dans le traitement du signal, la programmation et d'autres domaines où les données sont temporaires stockées pour un traitement ultérieur.

Multipath Rayleigh Fading Channel : simule les effets de propagation des ondes radio dans un environnement réel où elles peuvent subir des réflexions, des diffractions et des déphasages dus à la présence de multiples chemins de propagation. Ce phénomène, connu sous le nom de fading, est particulièrement prévalent dans les environnements urbains et intérieurs, ainsi que dans les communications sans fil à longue distance. En introduisant ce bloc dans la simulation, on peut modéliser de manière réaliste les variations du canal de communication, ce qui permet d'évaluer les performances des systèmes de communication et de concevoir des techniques de traitement du signal pour compenser les effets du fading.

AWGN (Additive White Gaussian Noise) Channel : simule l'ajout de bruit gaussien blanc à un signal de communication. Ce bruit est commun dans de nombreux canaux de communication, résultant de diverses sources telles que les interférences électromagnétiques, les fluctuations thermiques et les erreurs de quantification dans les équipements électroniques. En ajoutant ce bruit au signal de communication, ce bloc permet de modéliser les conditions réelles du canal et d'évaluer les performances du système de communication sous l'effet du bruit, ce qui est essentiel pour concevoir des systèmes robustes et efficaces.

1.2 MODELISATION D'UN DEMODULATEUR OFDM

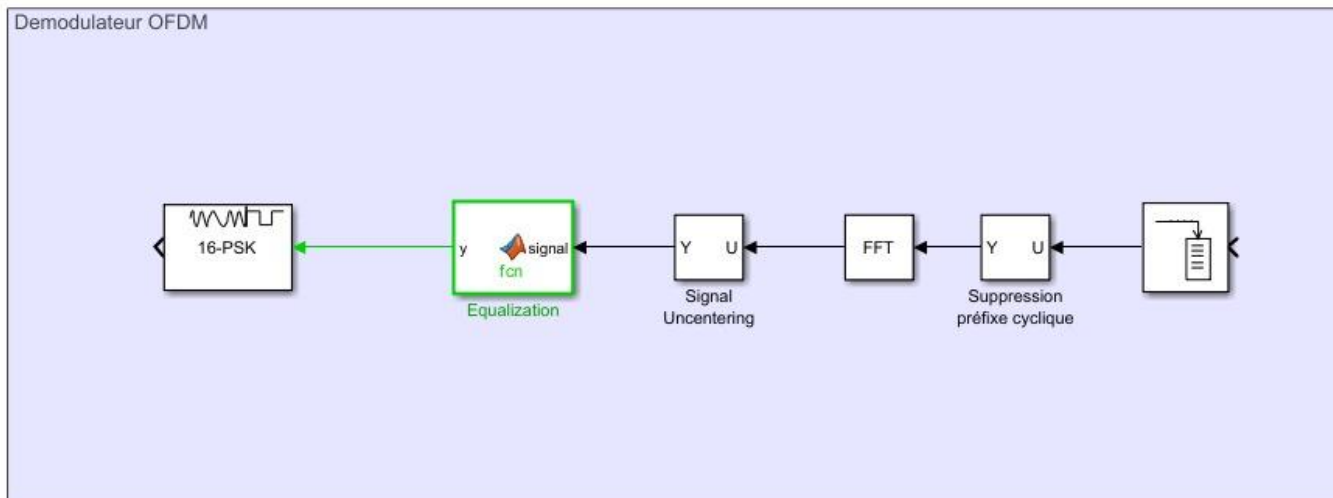


FIGURE 5 : OFDM POUR LES PORTEUSES MODULÉES PAR LA QPSK

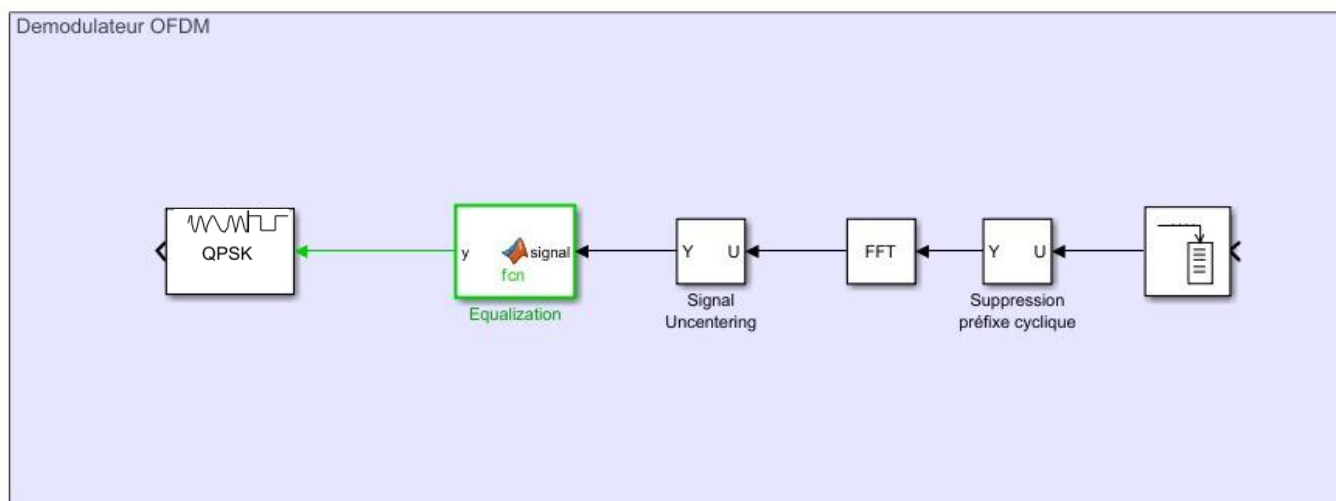


FIGURE 6 : OFDM POUR LES PORTEUSES MODULÉES PAR LA 16-PSK

Le bloc "Buffer" est utilisé dans le traitement du signal pour temporiser ou stocker temporairement des données en entrée avant de les transmettre à un autre processus ou bloc fonctionnel. Il est souvent utilisé pour lisser le flux de données, synchroniser des signaux asynchrones ou compenser des retards dans un système. En d'autres termes, ce bloc permet de réguler et de gérer le flux de données à travers différentes parties d'un système de traitement du signal.

Le bloc "Suppression de préfixe cyclique" est utilisé dans les systèmes de communication OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) pour éliminer le préfixe cyclique

ajouté lors de la modulation. Ce préfixe est ajouté à chaque symbole OFDM pour compenser les effets de l'interférence intersymbole (ISI) introduits par le canal de communication. Une fois que le signal OFDM est reçu, ce bloc supprime le préfixe cyclique pour récupérer les données originales, permettant ainsi au démodulateur de traiter correctement le signal et de récupérer les informations transmises. En résumé, ce bloc est essentiel pour restaurer les données à leur format d'origine avant de les traiter davantage.

La FFT (Fast Fourier Transform) : est un algorithme utilisé pour calculer efficacement la transformée de Fourier discrète (TFD) d'un signal numérique. Elle est largement utilisée dans de nombreux domaines, y compris le traitement du signal, la communication numérique, l'analyse spectrale et l'imagerie médicale. La FFT permet de transformer un signal du domaine temporel au domaine fréquentiel, ce qui permet d'analyser les composantes fréquentielles du signal et de détecter les différentes fréquences présentes. Dans le contexte de l'OFDM, la FFT est utilisée pour convertir les signaux OFDM du domaine temporel au domaine fréquentiel afin de séparer les différentes sous-porteuses et de récupérer les données transmises. Elle est donc essentielle pour le processus de démodulation et de traitement des signaux OFDM.

Le bloc "Signal Uncentering" est utilisé pour inverser l'opération de recentrage effectuée sur un signal lors du processus de modulation OFDM. Lors de la modulation OFDM, le signal est souvent centré autour de zéro pour faciliter le traitement et la transmission. Cependant, une fois que le signal est reçu, il est nécessaire de le ramener à sa position d'origine avant de poursuivre le traitement. Le bloc "Signal Uncentering" effectue cette opération en déplaçant le signal de manière à ce qu'il retrouve sa position initiale avant le recentrage. Cela permet de préparer le signal pour les étapes ultérieures du processus de démodulation et de traitement des données.

Equalization : Cette fonction joue un rôle crucial dans le processus de démodulation OFDM en permettant d'estimer les coefficients de canal à partir des symboles pilotes insérés dans le signal transmis. Tout d'abord, elle extrait le signal OFDM, en éliminant les zéros de préfixe cyclique et les symboles pilotes. Ensuite, elle calcule l'intervalle entre les symboles pilotes et initialise les variables nécessaires pour stocker les coefficients de canal, leurs indices et les symboles de sortie. À partir des symboles pilotes reçus, la fonction détermine les coefficients de canal à chaque emplacement de symbole pilote en les comparant avec les symboles

pilotes transmis. Ces coefficients sont ensuite interpolés sur l'ensemble du signal pour obtenir des valeurs pour tous les symboles OFDM. Les bords de l'interpolation sont remplis avec les valeurs des coefficients de canal aux extrémités pour garantir une interpolation correcte sur l'ensemble du signal. Enfin, les symboles du signal sont multipliés par les coefficients de canal interpolés pour compenser les distorsions introduites par le canal.

```
function y = fcn(signal, nbPilots, nUtile, nbZeros)

    signalSansZeros =
    signal(nbZeros/2+1:nbZeros/2+nUtile+nbPilots);

    intervalle = floor(nUtile/nbPilots)+1;
    output = zeros(nUtile,1) + 1j * zeros(nUtile,1);
    indexOutput = 1;

    coeffs = zeros(nbPilots,1)+ 1j*zeros(nbPilots,1);
    indexCoeffs = 1;
    indexes = zeros(nbPilots,1);
    indexIndexes = 1;

    for i = 1:nUtile+nbPilots
        if mod(i+floor(intervalle/2),intervalle) == 0
            if (indexCoeffs <= nbPilots)
                coeffs(indexCoeffs) =
                (sqrt(2)+sqrt(2)*1j)/signalSansZeros(i);
                indexes(indexIndexes) = i;
                indexCoeffs = indexCoeffs + 1;
                indexIndexes = indexIndexes + 1;
            end
        end
    end

    coeffsInterp =
    interp1(indexes,coeffs,1:nUtile+nbPilots,'spline');

    coeffsInterp(1:intervalle) = coeffs(1);
    coeffsInterp(nUtile+nbPilots-intervalle:end) =
    coeffs(nbPilots);

    for i = 1:nUtile+nbPilots
        if mod(i+floor(intervalle/2),intervalle) ~= 0
            output(indexOutput) =
            signalSansZeros(i)*coeffsInterp(i);
            indexOutput = indexOutput + 1;
        end
    end

    y = output;
```

Le démodulateur QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) baseband : est un composant essentiel dans les systèmes de communication numérique utilisant la modulation QPSK. Son rôle principal est de récupérer les données binaires transmises en modulant la phase du signal reçu. Dans un système QPSK, chaque symbole transporte deux bits d'information, représentés par les quatre phases possibles (0° , 90° , 180° , 270°). Le démodulateur QPSK baseband opère en synchronisation avec le signal reçu, en démodulant les symboles QPSK pour extraire les données binaires associées. Il utilise des techniques de détection de phase pour déterminer la phase de chaque symbole et convertir ces informations en données binaires. En résumé, le démodulateur QPSK baseband joue un rôle crucial dans la démodulation précise des signaux QPSK, ce qui permet de récupérer les données transmises avec fiabilité dans les systèmes de communication numérique.

PARTIE 3 : ETUDE DES PERFORMANCES DU MODEM OFDM

OFDM :

1.1 CONSTRUCTION D'UN MODEM OFDM (QPSK/16PSK)

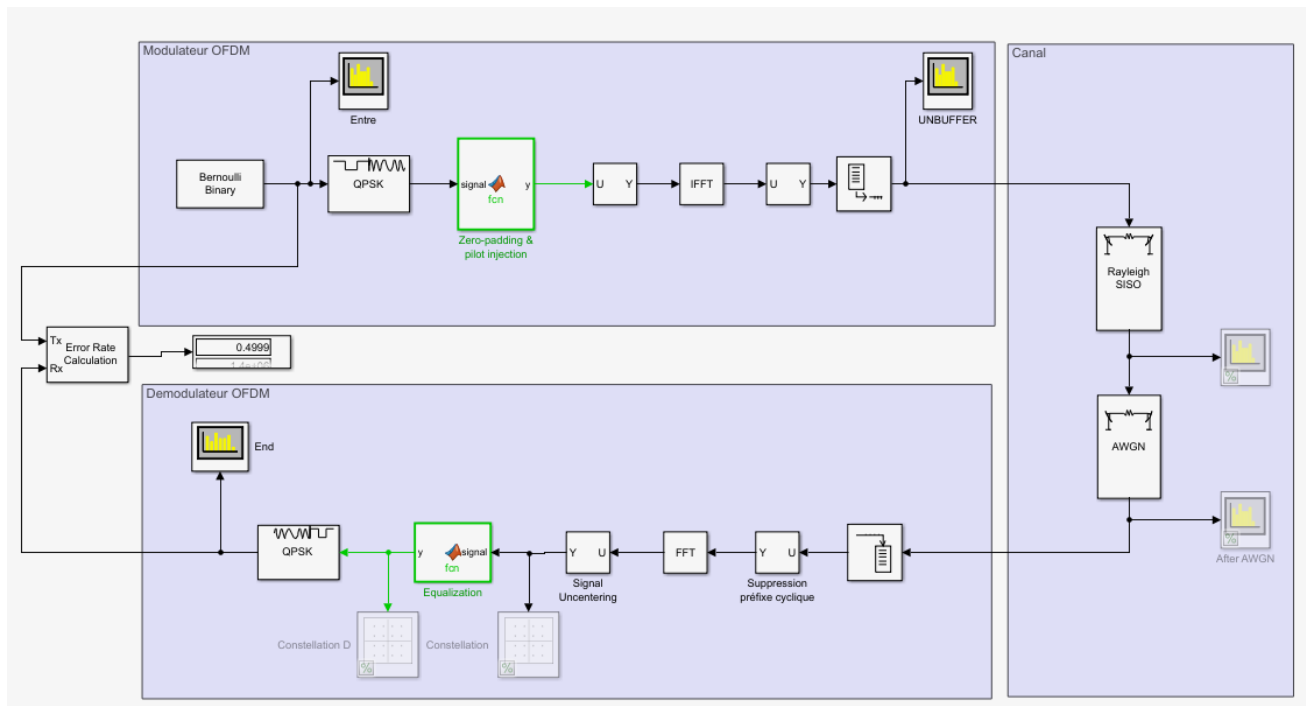


FIGURE 7 : MODEM OFDM (QPSK/16PSK)

1.2 COMPARAISON DES PERFORMANCES DES 2 MODEMS OFDM :

Pour le Modem OFDM avec modulation QPSK :

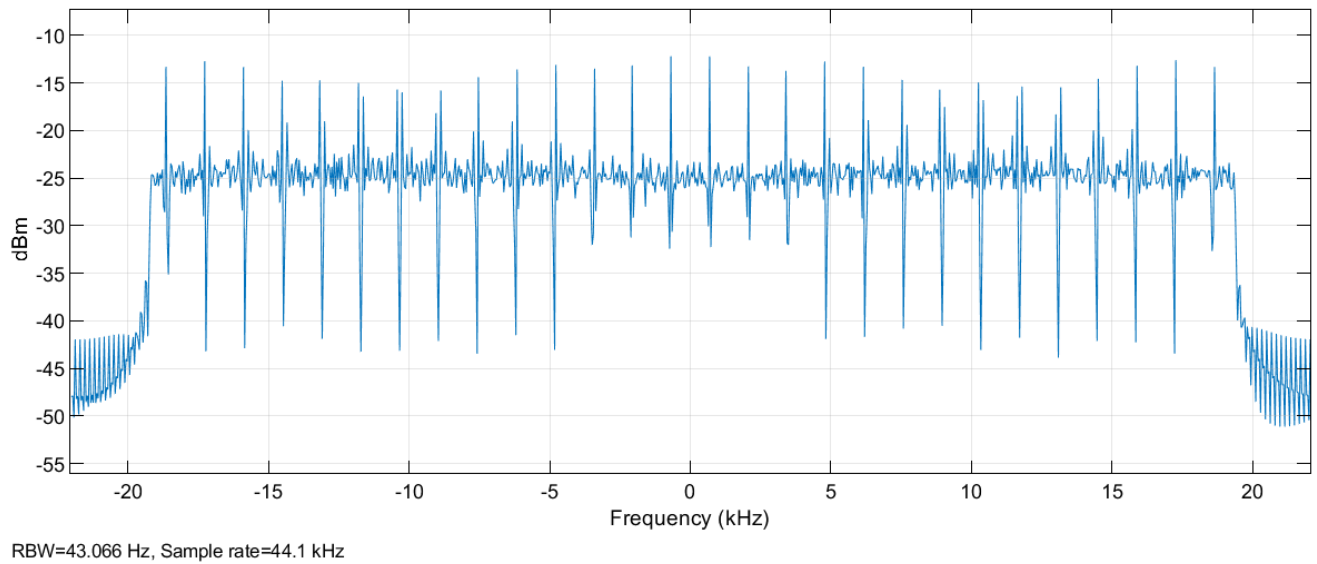


Figure 8 : L'encombrement spectrale Pour le Modem OFDM avec modulation QPSK :

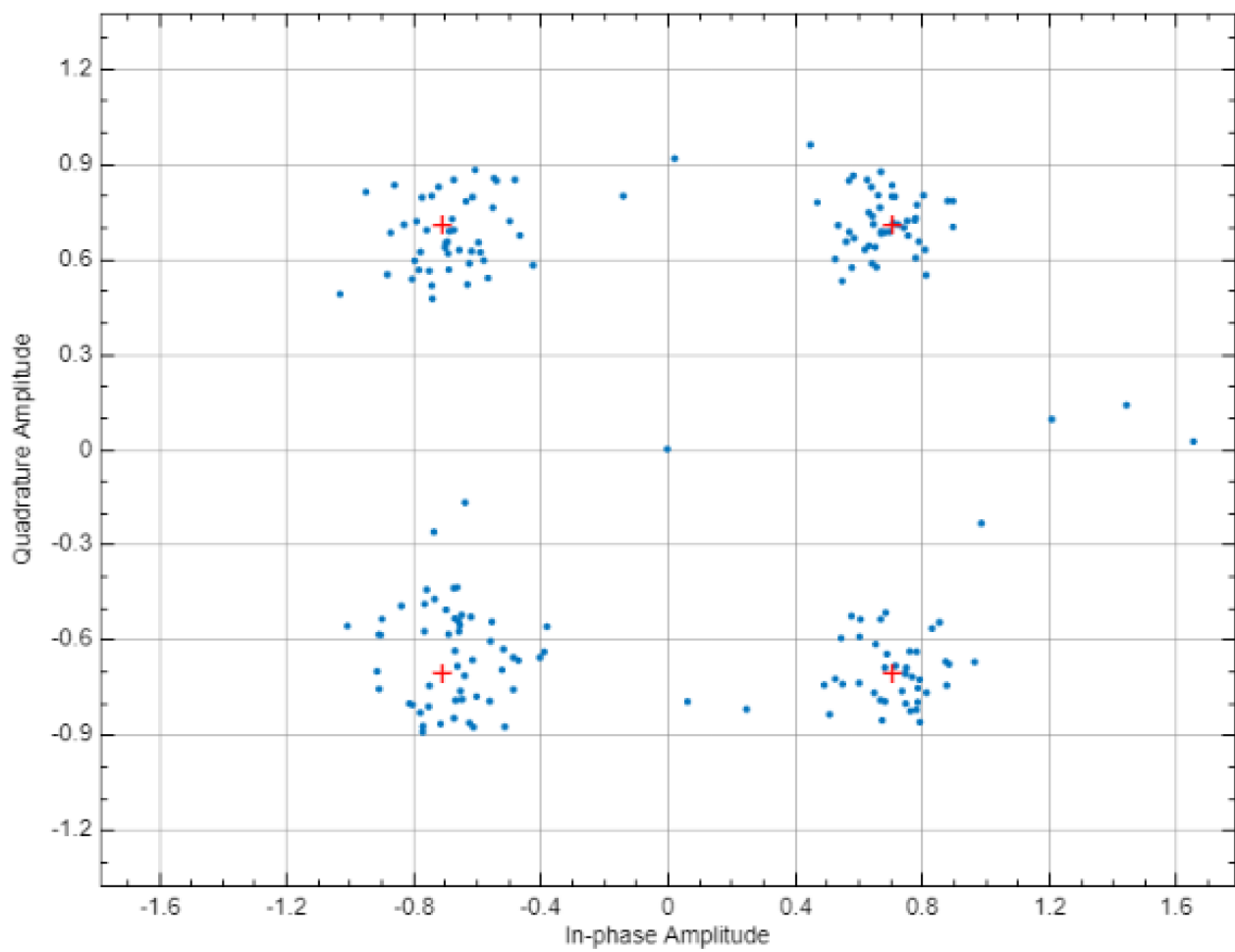


FIGURE 9 : CONSTELLATION POUR LE MODEM OFDM AVEC MODULATION QPSK

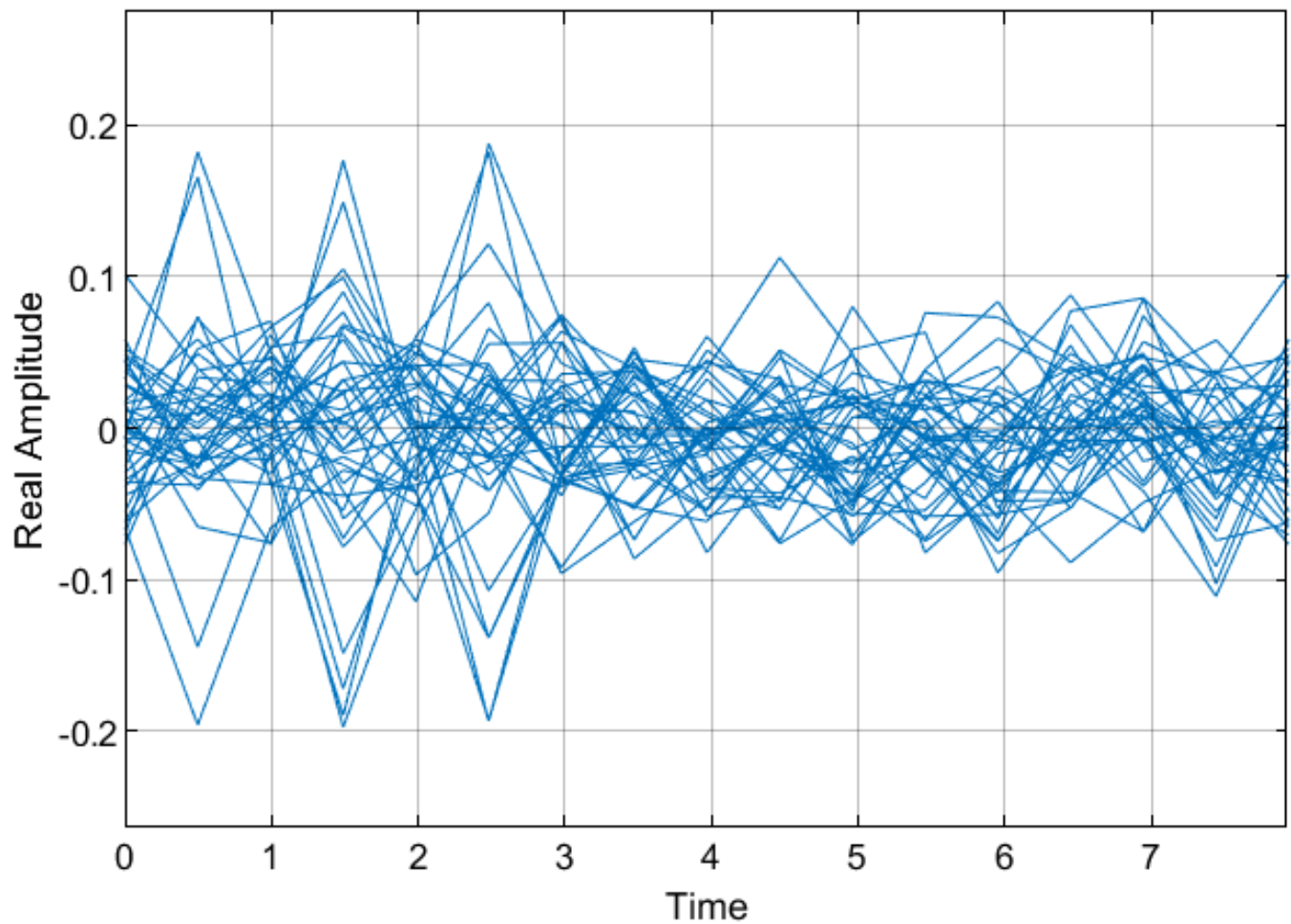


FIGURE 10 : DIAGRAMME DE L'ŒIL APRÈS MODULATION OFDM :

Pour le Modem OFDM avec modulation 16-PSK :

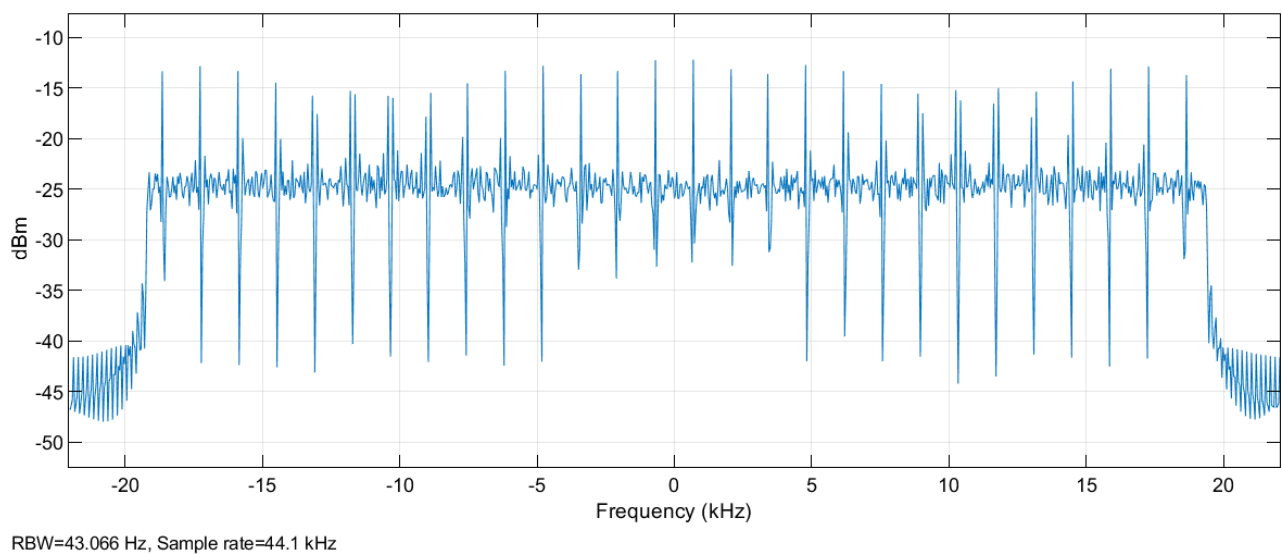


Figure 11 : L'encombrement spectrale Pour le Modem OFDM avec modulation 16-PSK :

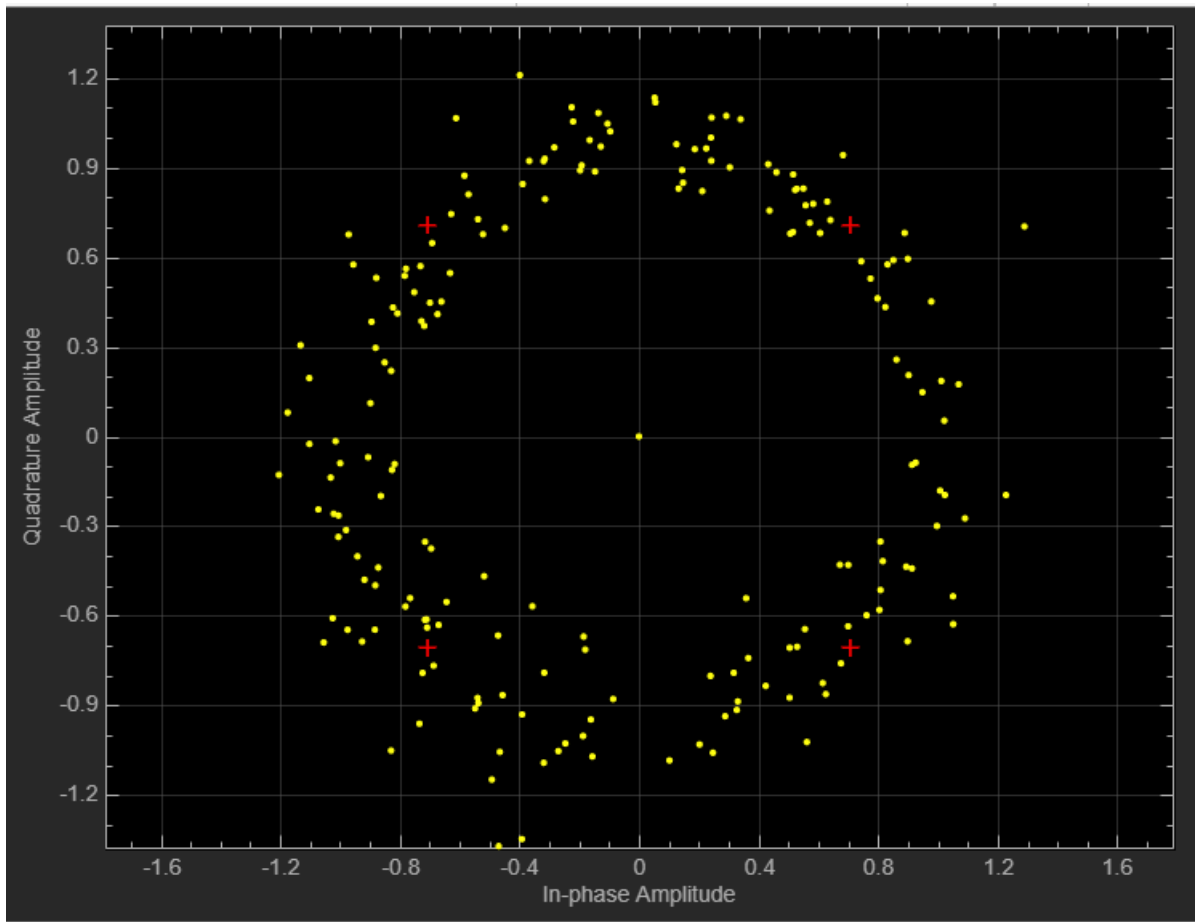


FIGURE 12 : CONSTELLATION POUR LE MODEM OFDM AVEC MODULATION 16-PSK

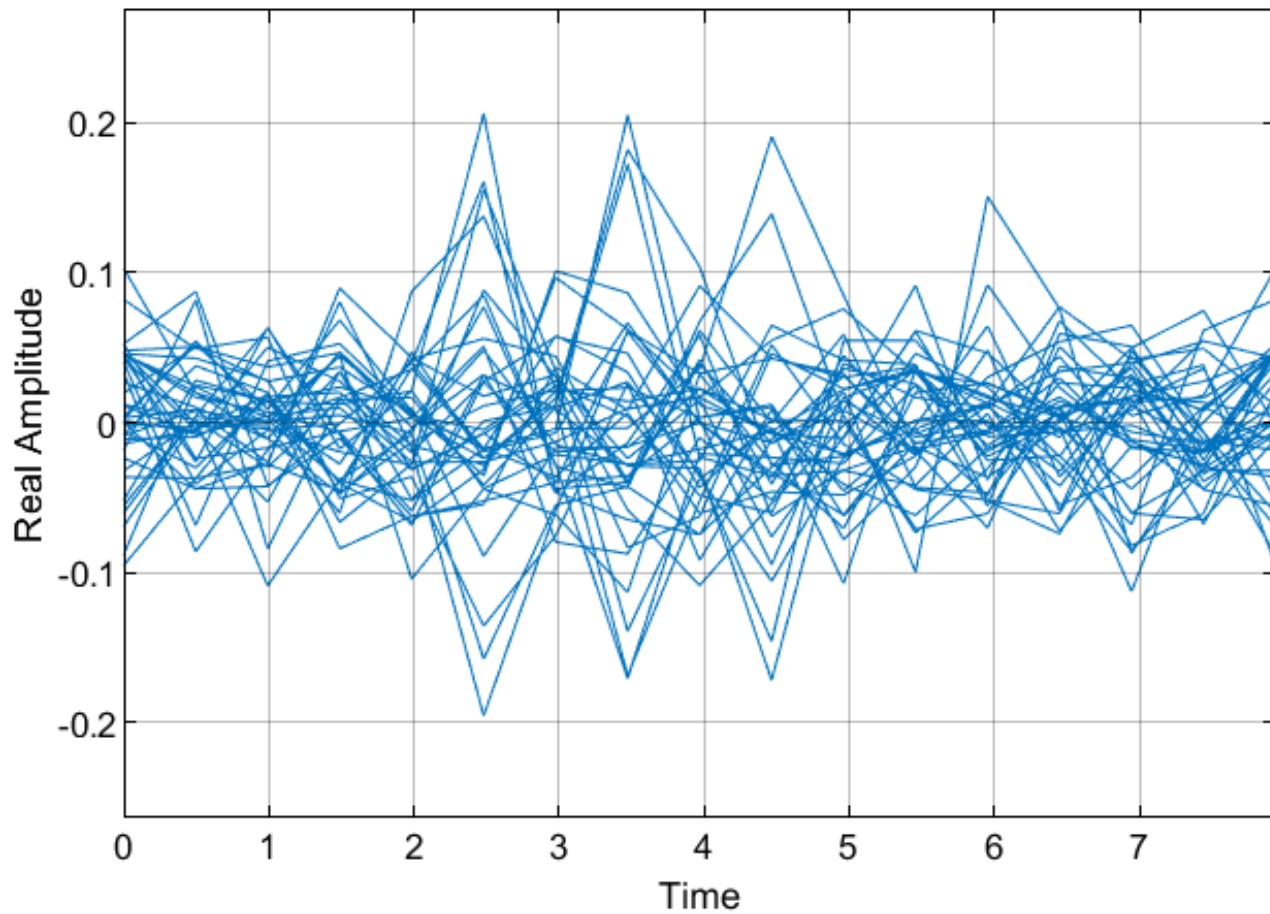


FIGURE 13 : DIAGRAMME DE L'ŒIL APRÈS MODULATION OFDM :

Pour la constellation :

Densité des Points : La modulation QPSK a 4 points de constellation, ce qui signifie moins de densité et donc une plus grande résistance aux erreurs. La 16-PSK, avec 16 points, est plus dense, ce qui peut augmenter le taux d'erreur si le signal est perturbé.

Distance Euclidienne : Dans la QPSK, les points sont plus éloignés les uns des autres par rapport à la 16-PSK, ce qui offre une meilleure performance en présence de bruit.

Répartition des Points : La constellation 16-PSK a des points répartis en cercle, ce qui est différent de la disposition en carré de la QPSK.

Sensibilité au Bruit : Avec plus de points de constellation rapprochés, la 16-PSK est plus sensible au bruit et aux interférences que la QPSK.

Efficacité Spectrale : La 16-PSK a une efficacité spectrale plus élevée car elle transmet plus de bits par symbole, mais cela se fait au détriment de la robustesse du signal.

Pour le diagramme de l'œil :

Ouverture de l'Œil : Dans les deux cas, l'ouverture de l'œil indique la marge de bruit tolérée. Cependant, l'œil est généralement plus ouvert dans le cas de la QPSK que dans le cas de la 16-PSK, ce qui signifie que la QPSK peut tolérer plus de bruit.

Complexité : La 16-PSK est plus complexe que la QPSK en raison du nombre plus élevé de points de constellation. Cela signifie que le récepteur doit être capable de distinguer plus de points, ce qui nécessite une plus grande précision et peut augmenter la probabilité d'erreur.

Efficacité Spectrale : La 16-PSK a une efficacité spectrale plus élevée que la QPSK car elle transmet plus de bits par symbole. Cependant, cela se fait au détriment de la robustesse du signal.

Tolérance au Bruit : La QPSK est généralement plus tolérante au bruit que la 16-PSK. Cela est dû à la plus grande distance entre les points de constellation dans la QPSK, ce qui rend le signal plus robuste face aux interférences.

Sensibilité au bruit (AWGN) :

Code Matlab utiliser pour l'étude de la variation du TEB en fonction du SNR pour les 2 modulations (QPSK et 16-PSK)

```

1  B = 20e3;
2  N = 256;
3  nbPilots = 16;
4  nbZeros = N/8;
5  delayMax = 1e-4;
6  Ts = N/B;
7  nUtile = N - ( nbZeros + nbPilots );
8  nCycle = delayMax * N / Ts;
9  nTotal = N + nCycle;
10
11  W = ( nUtile + nbPilots ) / nTotal^2;
12
13
14  SNR=-5:5:20;
15  Mv=[2 4];
16  for j=1:length(Mv)
17      M=Mv(j)
18      debit = M*nUtile/Ts;
19      TEBPSK=zeros(1,length(SNR));
20      for i=1:length(SNR)
21          SNR_=SNR(i);
22          sim('untitled');
23          TEBPSK(i)=berPSK(1);
24      end
25      TEBPSK
26      figure(1); semilogy(SNR,TEBPSK,'-*');hold on;
27  end
28  figure(1);legend('QPSK','16-PSK');grid on; xlabel('SNR(dB)'); ylabel('TEB');title('Variation du TEB e fonction du bruit du canal');

```

QPSK :

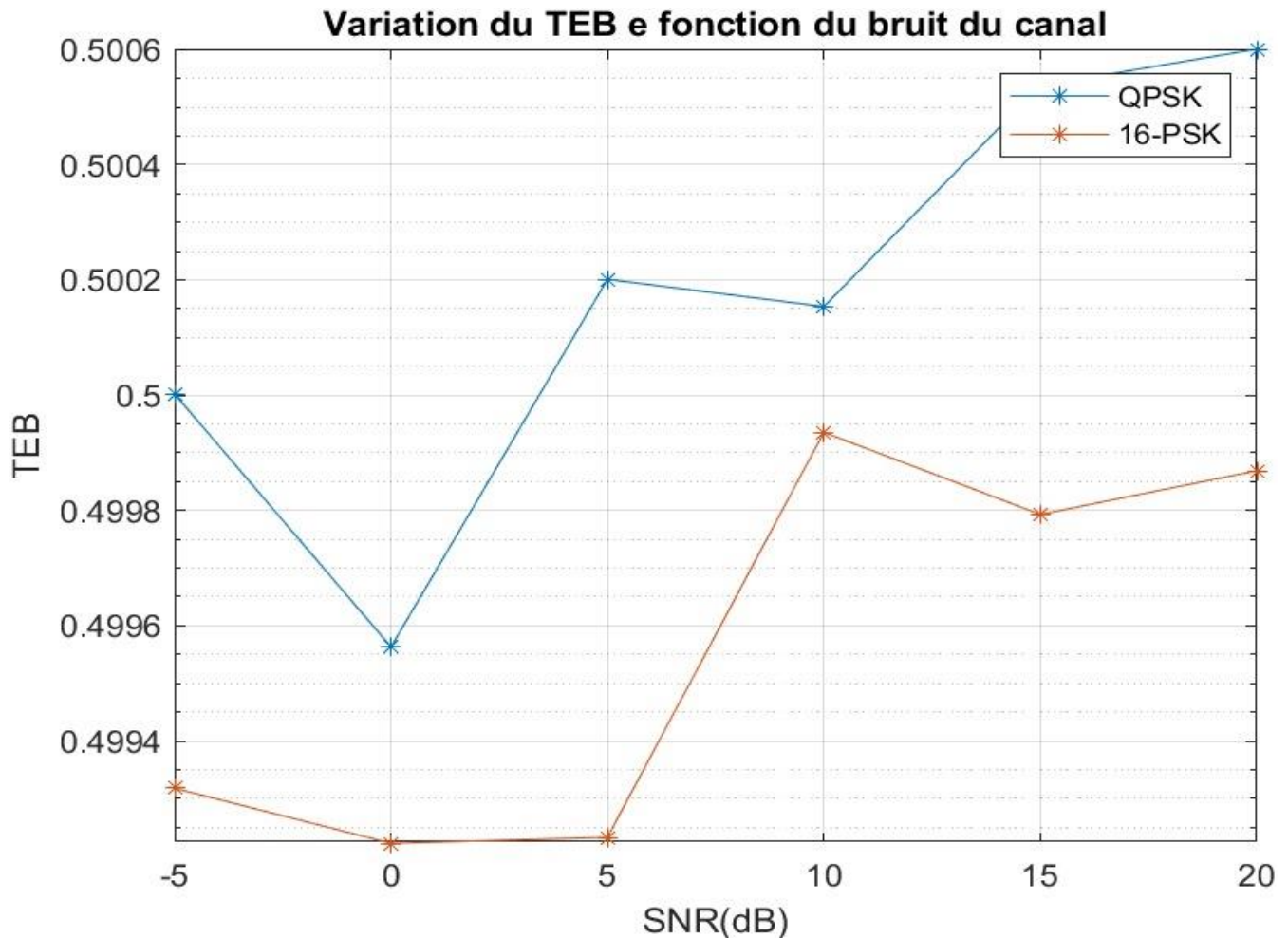
TEBPSK =

0.5000 0.4996 0.5002 0.5002 0.5005 0.5006

16-PSK :

TEBPSK =

0.4993 0.4992 0.4992 0.4999 0.4998 0.4999



D'après le graphique, on peut faire les observations suivantes sur les performances de QPSK et 16-PSK en fonction du rapport signal sur bruit (SNR) :

QPSK : La courbe QPSK a une forme en V, ce qui indique que le Taux d' Erreur Binaire (TEB) est minimal autour d' une SNR de 5 dB. Cela signifie que la modulation QPSK est plus résistante au bruit à des niveaux de SNR plus bas. Cependant, à mesure que le SNR augmente, le TEB augmente également, ce qui indique une diminution de la performance.

16-PSK : La courbe 16-PSK est relativement plate jusqu' à environ 10 dB, ce qui signifie que le TEB reste stable et faible même si le SNR augmente. Cependant, après 10 dB, le TEB commence à augmenter régulièrement, ce qui indique une diminution de la performance à des niveaux de SNR plus élevés.

En conclusion, la modulation QPSK semble offrir de meilleures performances à des niveaux de SNR plus bas, tandis que la 16-PSK maintient une performance stable sur une plus grande plage de SNR. Cependant, à des niveaux de SNR plus élevés.

CONCLUSION

Dans ce projet de modélisation et d'étude des performances d'une transmission utilisant un modem OFDM (QPSK, 16-PSK), nous avons réalisé plusieurs tâches clés. Tout d'abord, nous avons examiné la nécessité de la technique OFDM dans les systèmes de communication modernes. Nous avons constaté que l'OFDM offre une efficacité spectrale élevée grâce à la division du canal en sous-porteuses orthogonales, permettant ainsi la transmission simultanée de plusieurs signaux. De plus, l'OFDM s'est révélé robuste face aux interférences et aux effets de propagation sélective en fréquence, ce qui en fait une solution adaptée aux environnements où les canaux présentent des distorsions sélectives en fréquence et des trajets multiples.

Ensuite, nous avons procédé à la modélisation d'un modem OFDM et à la simulation de ce modem. Grâce à cette modélisation, nous avons pu évaluer les performances du modem OFDM dans différents scénarios et conditions de canal. Nous avons également considéré les techniques de modulation adaptative pour optimiser les performances en adaptant la modulation sur chaque sous-porteuse en fonction des variations du canal.

En résumé, ce projet a démontré que l'utilisation d'un modem OFDM (QPSK, 16-PSK) présente de nombreux avantages pour les systèmes de communication. L'OFDM offre une efficacité spectrale élevée, une robustesse face aux interférences et une gestion efficace des canaux à trajets multiples. Ces résultats soulignent l'importance de l'OFDM dans les systèmes de communication modernes, en offrant une solution fiable et performante pour les transmissions de données.