



Rapport Egalisation

Auteurs :
EL MARZOUGUI Omar
BASSBASSE Hakim

Département Sciences du Numérique - Parcours T - Deuxième année
2022-2023

Table des matières

1	Introduction	3
2	Egalisation Temporelle	4
2.1	Canal de transmission	4
2.2	Egaliseurs temporels à structure non contrainte	6
2.2.1	Egaliseur ZF	6
2.2.2	Egaliseur MMSE	6
2.2.3	Comparaison des égaliseurs	7
2.3	Egaliseurs temporels à structure contrainte	7
2.3.1	Egaliseur ZF	8
2.3.2	Egaliseur MMSE	9
2.4	Egaliseur Maximum de vraisemblance	10
2.5	Limites des égaliseurs temporels	12
3	Egalisation Fréquentielle	13
3.1	Canal de transmission	13
3.2	Préparation à l'égalisation fréquentielle	13
3.3	Egaliseur ZF	13
3.4	Egaliseur MMSE	13
3.5	Transmission multi-utilisateurs	15
3.5.1	chaîne de transmission	15
3.5.2	SC-FDMA vs OFDM	16
4	Conclusion	16

Table des figures

1	Constellation des symboles reçus	4
2	Constellation des symboles avec bruit	5
3	DSP	5
4	Egaliseur ZF	6
5	Egaliseur MMSE	6
6	Comparaison ZF/MMSE	7
7	Egaliseur ZF à Structure Contrainte	8
8	ZF : Contraint vs Non contraint	8
9	Egaliseur MMSE à Structure Contrainte	9
10	MMSE : Contraint vs Non contraint	9
11	MMSE : Contraint vs Non contraint	10
12	ML canal 1	11
13	ML canal 3	12
14	ZF vs MMSE dans l'égalisation fréquentielle	14
15	Performances transmission multi-utilisateurs	15
16	Signaux SC-FDMA	16

1 Introduction

L'égalisation de canal est une phase de traitement du signal très importante dans la chaîne de télécommunication. Elle a pour but de corriger la distorsion subie par un signal transmis via un canal. Pour se faire, les récepteurs contiennent des *égaliseurs* qui sont utilisés pour rendre la réponse en fréquence du canal plate ce qui revient à annuler son effet sur le signal.

Ce rapport a pour objet de présenter, analyser et comparer les types d'égalisation (linéaire/non linéaire, temporelle/fréquentielle) ainsi que les différents égaliseurs (ZF , $MMSE$, ML) implantés lors de la réalisation du TP d'égalisation de canal.

On commencera par présenter les canaux sélectifs en fréquences utilisés pour modéliser la transmission ainsi que les propriétés de chacune de ses canaux. Ensuite, On traitera l'égalisation temporelle linéaire et non linéaire. Dans l'égalisation temporelle linéaire on distinguera les égaliseurs à structure non contraintes et les égaliseurs à structure contrainte. Enfin, on attaquera l'égalisation fréquentielle linéaire.

2 Egalisation Temporelle

2.1 Canal de transmission

On considère la transmission sur un canal sélectif en fréquence. On considérera le modèle de transmission bande de base. On utilisera à l'émetteur une modulation de type QAM à M états avec mapping de type Gray. On prend $M = 4$ (équivalent d'un QPSK).

Le fichier *TP1_eleves* contient les canaux à utiliser pour la simulation. Ainsi que l'implantation de tous les égaliseurs temporels.

Les différents types des canaux utilisés sont :

- Premier canal : $h_c = [1 \ 0.8e^{i\pi/3} \ 0.3e^{i\pi/6}]$: c'est un canal qui introduit deux autres trajets atténués et déphasés.
- Deuxième canal : $h_c = [0.04, -0.05, 0.07, -0.21, -0.5, 0.72, 0.36, 0, 0.21, 0.03, 0.07]$: c'est un canal qui introduit un nombre important de multitrajets atténués et déphasés, on peut le considérer comme un canal dont la sélectivité en fréquence est importante par rapport aux autres canaux.
- Troisième canal : $h_c = [1 \ a]$: c'est un canal simple avec un seul trajet supplémentaire atténué par un facteur a .

La figure suivante montre la constellation des symboles reçus pour le troisième canal. En effet, chaque symbole (sauf le premier symbole envoyé) de la constellation QPSK est modifiée par le symbole du deuxième trajet. La constellation étant une QPSK, pour chaque symbole dans la constellation non affectée par le canal, il y a 4 possibilités sur la valeur du symbole du deuxième trajet. Ce qui donne 16 symboles où chaque 4 symboles forment un carré dont le centre est le point où il y avait les symboles de la constellation initiale. On remarque que, pour un seul trajet, la constellation est considérablement modifiée. Avec le premier canal où il y a deux trajets indirects déphasés, on visualise que la constellation est totalement détruite.

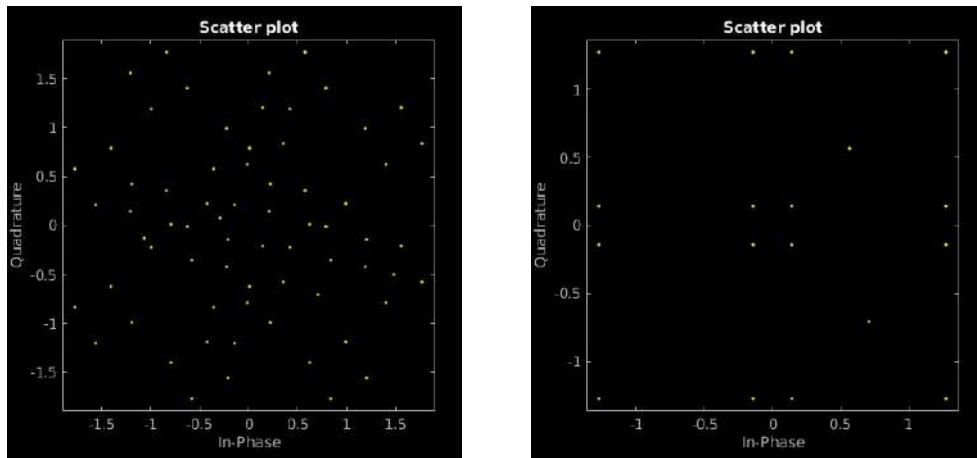


FIGURE 1 – Constellation des symboles reçus

La figure suivante montre la constellation après l'ajout du bruit au signal filtré par le troisième canal. Ce dernier étant aléatoire et gaussien, chaque point de la constellation est entouré d'une tâche ronde.

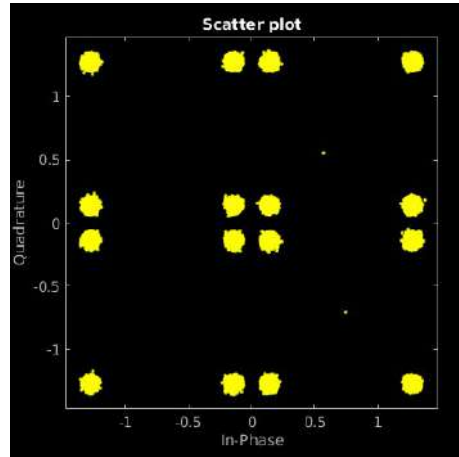


FIGURE 2 – Constellation des symboles avec bruit

La figure suivante montre la DSP du signal avant la traversée du canal, avec canal et sans bruit, avec canal et avec bruit. Le signal est bien affecté par le canal. Dans le cas du bruit, l'amplitude du signal varie de façon aléatoire à cause de la loi gaussienne.

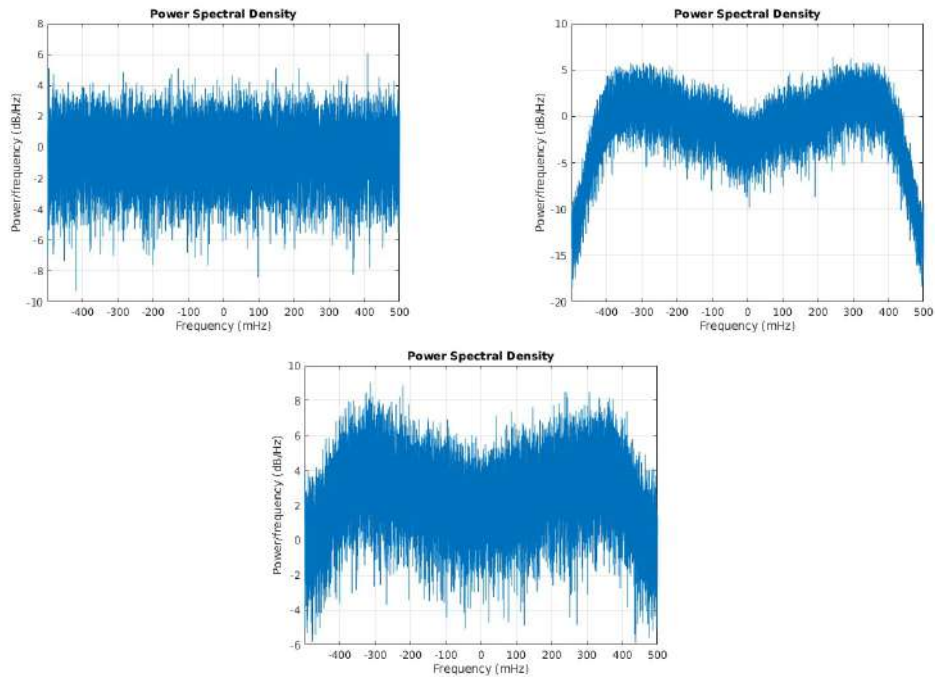


FIGURE 3 – DSP

2.2 Égaliseurs temporels à structure non contrainte

La contrainte des égaliseurs porte sur les filtres, un filtre sans contrainte est un filtre dont le nombre d'échantillons est infini, ce qui est équivalent à un filtre RII. Cette partie traite les égaliseurs temporels à structure non contrainte.

2.2.1 Égaliseur ZF

L'approche de l'égaliseur ZF (Zéro Forcing) consiste à forcer les interférences à zéro. L'avantage est évident, ce que les interférences sont bien annulées. Cependant, cette approche ne prend pas en compte le bruit ajouté. La réponse impulsionnelle du filtre égaliseur pour le troisième canal est décrite par le tracé suivant.

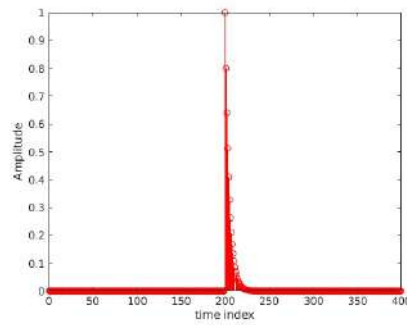


FIGURE 4 – Égaliseur ZF

2.2.2 Égaliseur MMSE

L'approche $MMSE$ consiste à minimiser l'erreur entre le signal perturbé (soit par le canal soit par le bruit) et le signal émis. Ce qui revient à minimiser une fonction coût. L'apport par rapport à l'approche ZF c'est que cet égaliseur prend en compte le bruit. Théoriquement, les performances de cet égaliseur sont sensées d'être meilleur que le cas ZF dans les faibles SNR .

La réponse impulsionnelle du filtre égaliseur pour le troisième canal est décrite par le tracé suivant.

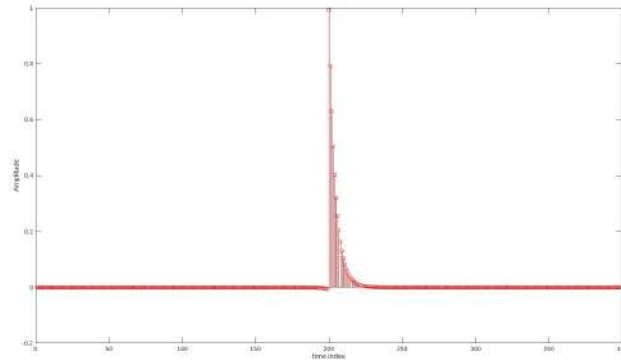


FIGURE 5 – Égaliseur MMSE

2.2.3 Comparaison des égaliseurs

La figure suivante présente les performances (Taux d'erreur binaire en fonction du SNR binaire) des égaliseurs ZF et $MMSE$ avec structure non contrainte.

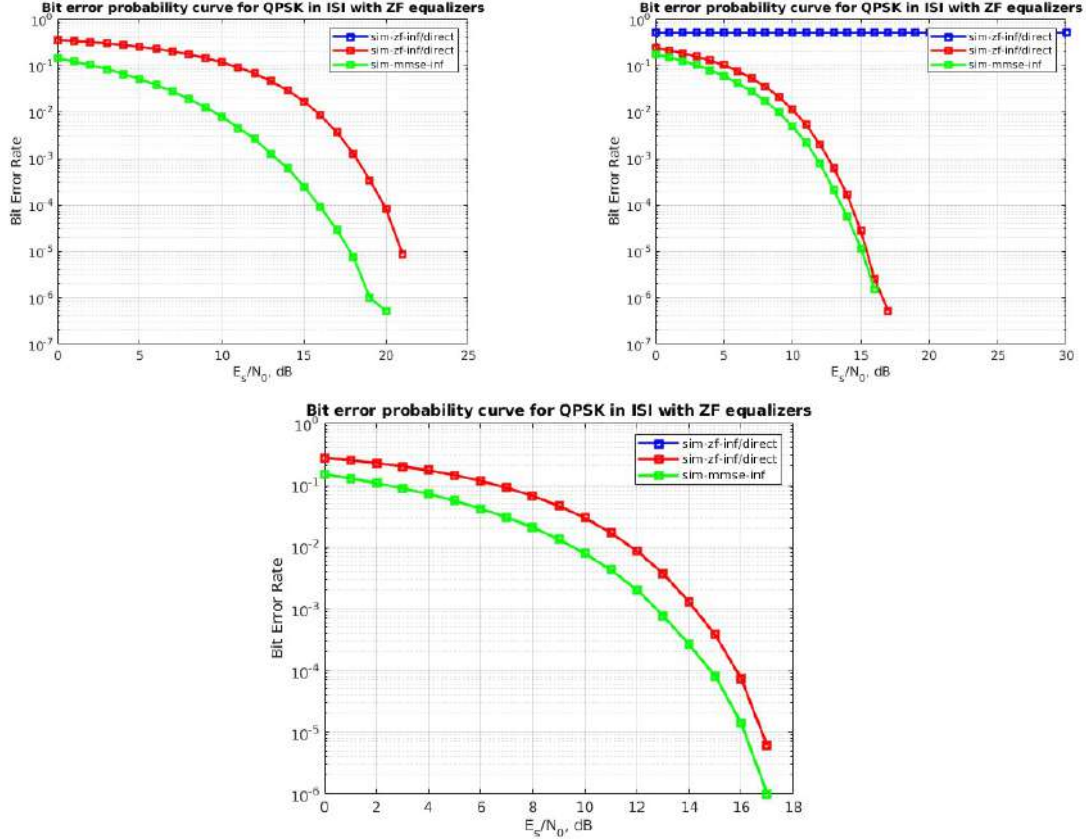


FIGURE 6 – Comparaison ZF/MMSE

Pour le premier canal, on remarque que le filtre stable et causal existe. Donc les performances des égaliseurs causal et non causal sont identiques (courbes collées). Cependant, pour le deuxième canal où le traitement non causal n'existe pas, les performances du filtre causal dégradent. C'est le traitement non causal qui résout le problème. Les mêmes interprétations sur le premier canal s'appliquent sur le troisième canal.

Pour tous les canaux, le MMSE est toujours meilleur que le ZF et ça ce qui est montré théoriquement. Or, pour un fort rapport signal sur bruit, on remarque que les courbes se rapprochent, c'est-à-dire que l'égaliseur MMSE converge vers l'égaliseur ZF ce qui est conforme avec la théorie.

2.3 Egaliseurs temporels à structure contrainte

Les égaliseurs à structure contrainte sont des égaliseurs où on définit arbitrairement une valeur N de la taille de l'égaliseur utilisé. A priori, ajouter cette contrainte diminue les performances des égaliseurs par rapport aux égaliseur à structure non contrainte. Toutefois, l'optimisation de ce nombre N permet d'avoir une valeur permettant de s'en sortir avec des performances similaires avec les égaliseurs non contraintes.

2.3.1 Egaliseur ZF

L'approche étant la même, la définition d'une contrainte permet d'introduire une écriture et des opérations matricielles.

Le tracé suivant représente la réponse impulsionnelle du filtre égaliseur contraint, on a bien un nombre limité de valeurs.

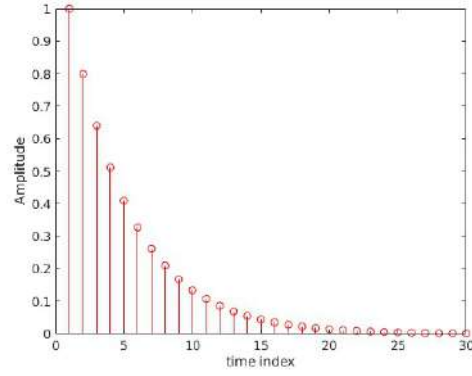


FIGURE 7 – Egaliseur ZF à Structure Contrainte

La figure suivante compare entre le ZF contraint et non contraint, on visualise bien que le ZF non contraint est plus performant pour une taille de l'égaliseur $N = 5$. Cependant, à partir de la valeur $N = 35$, les performances des égaliseurs sont presque identiques. On réussit à obtenir des performances similaires avec une taille plus faible (et donc une complexité plus faible). Ce qui montre bien l'importance d'optimiser la taille de l'égaliseur.

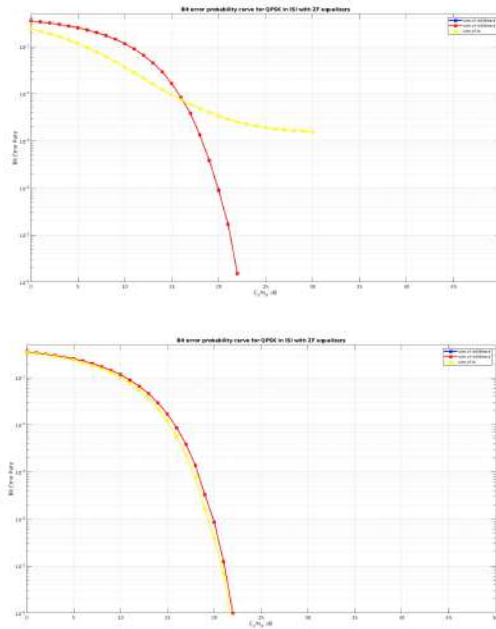


FIGURE 8 – ZF : Contraint vs Non contraint

2.3.2 Egaliseur MMSE

Le tracé suivant représente la réponse impulsionnelle du filtre égaliseur contraint. on a bien un nombre limité de valeurs.

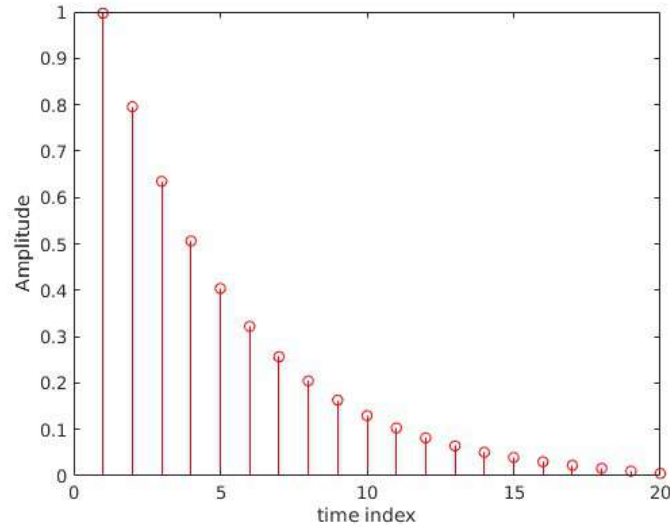


FIGURE 9 – Egaliseur MMSE à Structure Contrainte

De même, les mêmes interprétation s'appliquent sur le cas *MMSE* ; L'égaliseur non contraint est à priori meilleur que le contraint mais on arrive à les approcher à partir d'une certaine taille de l'égaliseur contraint. Ce qui ne change pas c'est que le *MMSE* est plus performant que le *ZF* soit avec soit sans contrainte.

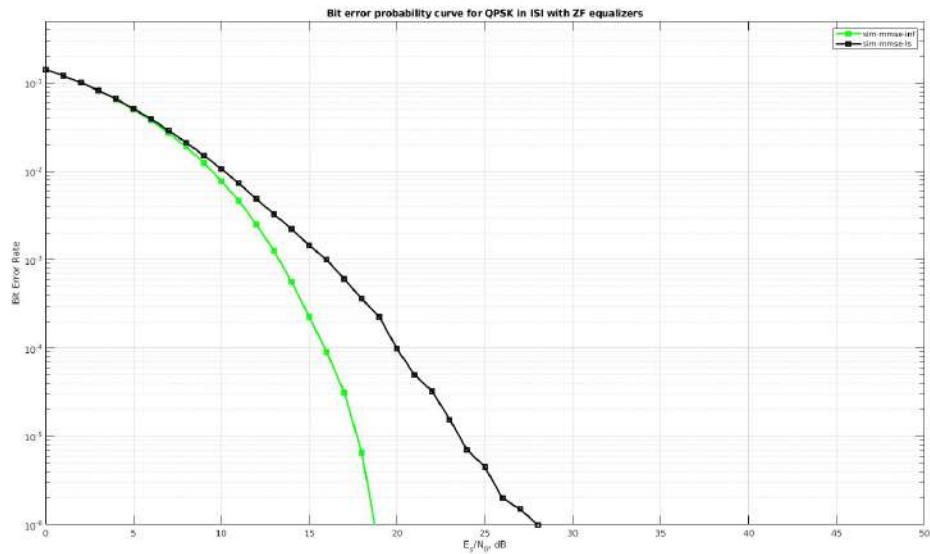


FIGURE 10 – MMSE : Contraint vs Non contraint

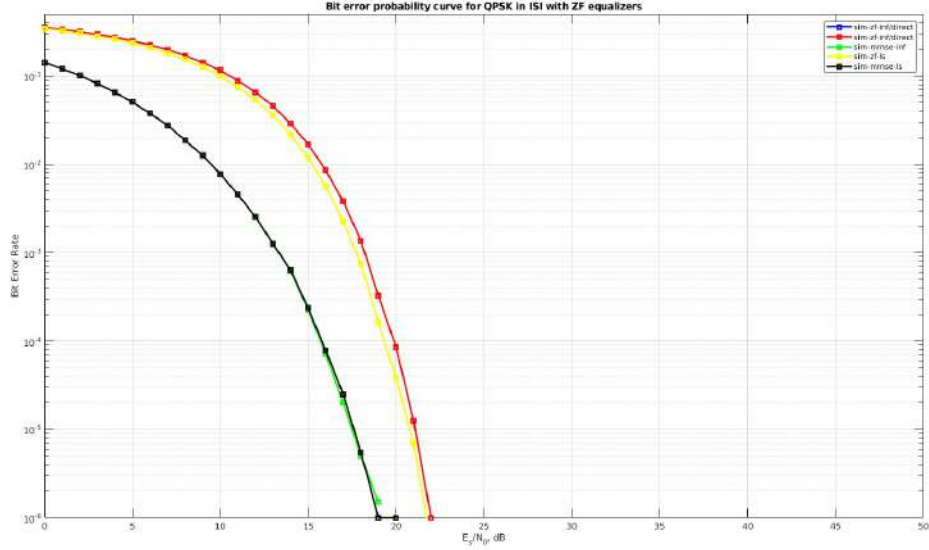


FIGURE 11 – MMSE : Contraint vs Non contraint

2.4 Égaliseur Maximum de vraisemblance

On a vu les égaliseurs ZF et $MMSE$. Ces égaliseurs sont des égaliseurs linéaires car l'égalisation se réalise par une opération de filtrage linéaire. Il y a des différences de performances ainsi que de complexité entre les deux. Cependant, cette famille d'égaliseurs linéaires reste inefficace contre les canaux très sélectifs en fréquences.

La solution face à ce type de canaux est d'introduire un autre type d'égalisation à savoir l'égalisation non linéaire. En particulier on utilisera un égaliseur par maximum de vraisemblance ML . L'avantage majeur de cet égaliseur c'est qu'il fournit des performances très puissantes. Cependant, il reste un égaliseur très complexe car il se base sur un treillis et un décodage par l'utilisation de l'algorithme de *Viterbi*.

Le principe de cet égaliseur est de considérer les trajets indirects retardés du canal comme une mémoire dans un codeur convolutif. Donc on considère que le signal émis était codé par le canal. Évidemment, pour ré-obtenir le signal émis, il faut faire un décodage. Le décodage de *Viterbi* consiste à trouver la séquence (donc le chemin) la plus vraisemblable au signal émis par un parcours d'un treillis à états. Naturellement, la complexité de ce parcours augmente rapidement avec l'augmentation du nombre d'états dans le treillis.

Les figures suivantes montrent les performances de l'égaliseur *ML* par rapport à tout les égaliseurs implantés précédemment pour le premier et le troisième canal.

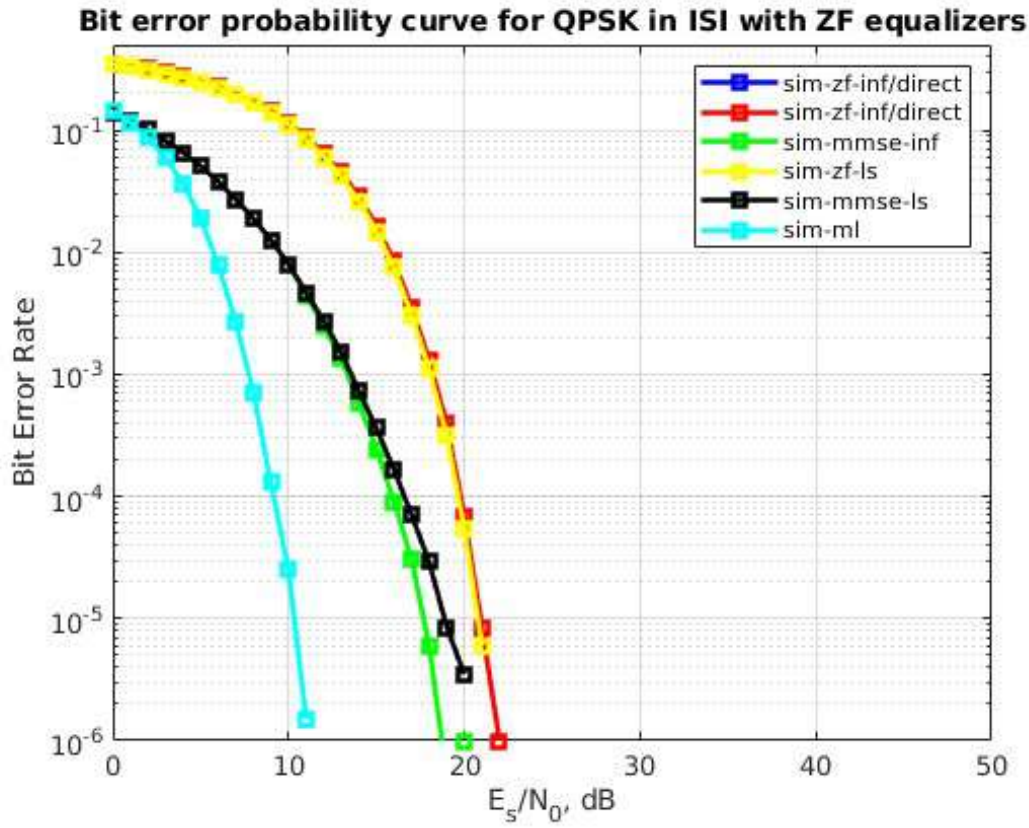


FIGURE 12 – ML canal 1

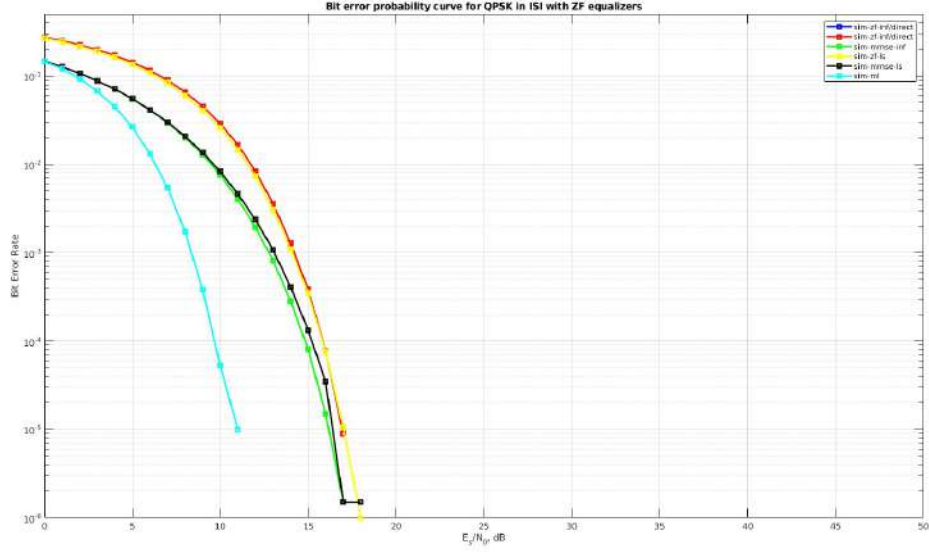


FIGURE 13 – ML canal 3

On voit bien que les performances sont très bonne et que l'égaliseur *ML* est beaucoup plus robuste que tous les égaliseurs déjà implantés, mais le coût est plus cher aussi. En effet, l'égaliseur ne marche plus si on fait une simulation avec le deuxième canal car il génère un nombre gigantesque d'états tel que la mémoire ne peut pas supporter un tel décodage.

2.5 Limites des égaliseurs temporels

Les égaliseurs temporels donnent des performances acceptables en terme de taux d'erreur binaire qui seront plus améliorés si on ajoute du codage canal. Cependant, comme le montre le fichier *TP1_eleves.m*, l'implantation des égaliseurs temporels est relativement difficile et nécessite beaucoup d'opérations matricielles qui augmentent la complexité de l'égaliseur. Il faudra penser à une implantation qui donne les performances souhaitées tout en assurant une complexité raisonnable.

3 Egalisation Fréquentielle

3.1 Canal de transmission

Dans le cadre de l'étude de la chaîne de transmission avec égalisation fréquentielle, on utilisera un canal de type : $h_c = [1 -a]$, avec introduction de deux trajets, trajets direct et trajet retardé, déphasé de π et atténué par un facteur $a < 1$.

3.2 Préparation à l'égalisation fréquentielle

L'égalisation fréquentielle consiste à faire le traitement de l'égalisation dans le domaine fréquentielle, donc l'égaliseur et le signal doivent les deux être dans le domaine fréquentielle pour faire ce traitement.

Afin de réussir l'égalisation fréquentielle, il faut mettre des traitements qui préparent le signal pour entrer en bloc égaliseur.

Le premier traitement est la suppression du préfixe cyclique ajouté dans l'émetteur. Les utilités diverses du préfixe cyclique ne sont pas le sujet de ce rapport (ni du TP), mais l'utilité la plus importante est de diminuer l'effet des interférences entre symboles. Le deuxième traitement est de transformer le signal à égaliser en domaine fréquentielle. En effet, le signal reçu par le récepteur est dans le domaine temporel, alors il faut insérer le signal temporel en un bloc de transformer de Fourier direct. Après égalisation fréquentielle, on effectue une transformée de Fourier inverse pour que le signal revienne au domaine temporel. On continue la chaîne par la règle de décision et évaluation du taux d'erreur binaire.

3.3 Egaliseur ZF

Tous les approches théoriques introduites dans l'égalisation *ZF* (et *MMSE* par la suite), s'appliquent aussi dans le domaine fréquentiel. En domaine fréquentiel, l'approche *ZF* consiste à inverser le canal.

Le signal égalisé obtenu est le résultat de la multiplication du signal non égalisé par l'égaliseur. C'est l'avantage majeur entre l'égalisation linéaire temporelle et fréquentielle. Ce qui rend l'égalisation linéaire fréquentielle plus utilisée c'est la simple implantation et la faible complexité par rapport à l'égalisation linéaire. Il s'agit de deux transformées de Fourier (*fft* et *ifft*) et une multiplication par l'égaliseur. On trouve la réponse du problème posé dans la partie 2.5.

3.4 Egaliseur MMSE

L'approche *ZF* ne prend pas en compte le bruit comme déjà remarqué, ça se voit aussi dans la formule de l'égaliseur *ZF* dans le domaine fréquentiel. L'approche *MMSE* prend en compte l'ISI et le bruit.

Comme dans le domaine temporel, en grandes valeurs de rapport signal sur bruit SNR, l'égaliseur *MMSE* converge vers l'égaliseur *ZF*.

Le fait que l'égaliseur *MMSE* est plus performant en terme de taux d'erreur binaire que l'égaliseur *ZF* ne change pas dans le domaine fréquentiel comme montré dans la figure suivante obtenue par exécution du fichier MATLAB *tp2.m* :

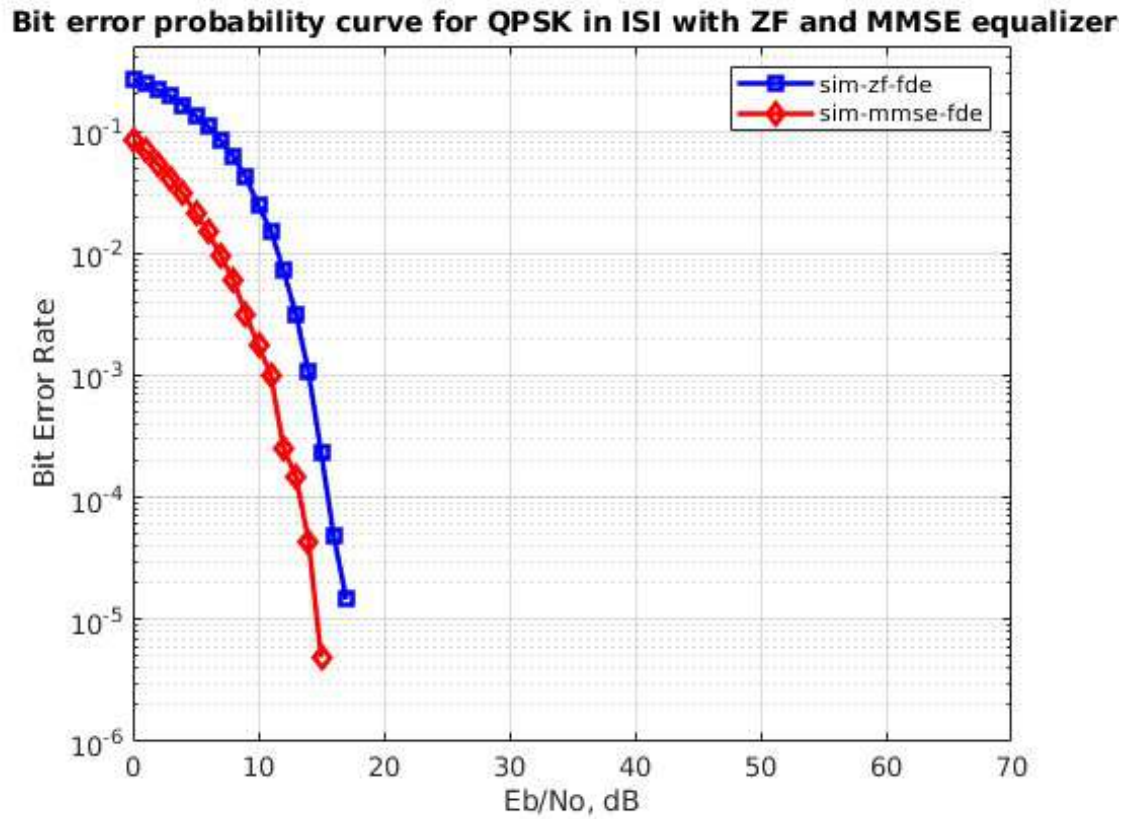


FIGURE 14 – ZF vs MMSE dans l'égalisation fréquentielle

3.5 Transmission multi-utilisateurs

3.5.1 chaîne de transmission

Le fichier MATLAB *multi-user.m* donne une implantation de la chaîne de communication multi-utilisateurs en utilisant le schéma adopté en SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access).

Le scénario décrit dans cette chaîne de communication est le suivant : On a deux utilisateurs dont on a attribué un nombre $M = 256$ sous-porteuses, ces deux utilisateurs entre dans un système OFDM ayant $N = 1024$ sous-porteuses. L'utilisateur 1 prend les sous-porteuses de 30 jusqu'à 285 et l'utilisateur 2 prend les sous-porteuses de 300 jusqu'à 555. Par conséquent, le mapping des sous-porteuses utilisé est le mapping localisé. La génération des deux signaux se fait de manière indépendante pour bien modéliser le fait qu'on a deux émetteurs indépendants qui envoient les signaux de leurs utilisateurs correspondants. Bien évidemment, les deux utilisateurs passent par des canaux différents. On a utilisé les canaux 1 et 3 décrits dans les parties précédentes. On ajoutera aussi un bruit gaussien. A la réception, le récepteur reçoit la somme des deux signaux. Chaque signal a subi une distortion différente. Le récepteur doit bien séparer les deux signaux. En adoptant les opérations inverse faites dans la génération des deux signaux, on arrive bien à séparer les deux signaux. On utilise deux égaliseurs *MMSE* pour annuler les distortions des canaux. Les performances de la chaîne de transmission ainsi implantée sont décrites dans le tracé au-dessous. On a des courbes séparées pour les deux utilisateurs car chaque signal a traversé un canal différent.

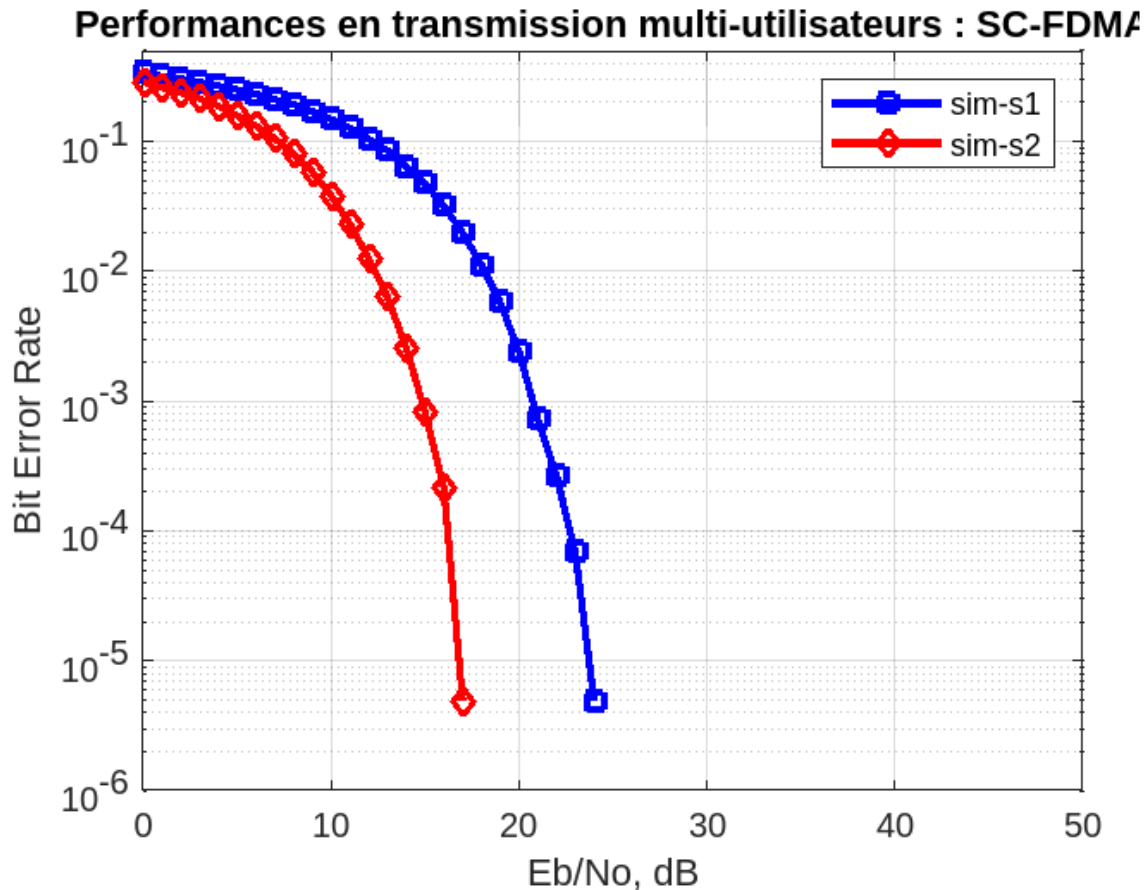


FIGURE 15 – Performances transmission multi-utilisateurs

3.5.2 SC-FDMA vs OFDM

En regardant les évolutions de l'amplitude des signaux (en module) au cours du temps, on constate que la l'amplitude est quasi stationnaire, on ne voit pas des instants où la valeur de l'amplitude signal est très grande par rapport à la valuer moyenne des amplitude du signal. Autrement dit, les signaux envoyé en SC-FDMA ont une faible valeur de *PAPR* (Peak-to-Average Power Ratio ou Facteur de crête).

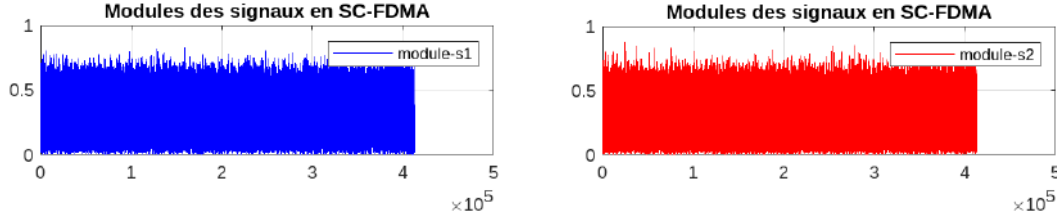


FIGURE 16 – Signaux SC-FDMA

Cela fait penser à l'OFDM et son inconvénient majeur, la valeur très élevée du *PAPR* des signaux OFDM à envoyer. Un signal à *PAPR* élevée exige qu'on a besoin de plus d'énergie pour la transmettre. Donc on tombe dans un problème de consommation de la batterie dans les systèmes qui envoient des signaux OFDM. On peut déduire que les signaux OFDM sont déconseillé pour les téléphones par exemples car l'émission de ces signaux va consommer rapidement la batterie du téléphone qui est très limitée (Par rapport à la batterie d'une station réceptrice par exemple).

Heureusement, la solution est proposé par le SC-FDMA. Avec cette technique, on arrive à se bénéficier des avantages de l'OFDM (puisque la chaîne de transmission du SC-FDMA inclut une sous-chaîne OFDM) tout en gardant un *PAPR* faible des signaux envoyés par les utilisateurs. Ce qui va optimiser la consommation de la batterie des téléphones par exemples.

Toutes la analyses faites dans cette partie amènent à la conclusion suivante : Il est judicieux d'utiliser des chaîne de transmission SC-FDMA dans la liaison montante (Utilisateur vers Station de Base) pour économiser de l'énergie et aussi permettre à plusieurs utilisateurs à partager une bande de fréquences OFDM. En liaison descendante (Station de Base vers Utilisateur), il n'y a pas un grand problème dans l'utilisation de l'OFDM même si le *PAPR* est élevé car les stations de base ont un excès de batterie par rapport aux utilisateurs.

4 Conclusion

En guise de conclusion, on a vu les différents types de l'égalisation : temporelle/fréquentielle, linéaire/non linéaire. Et différents types d'égaliseurs : ZF, MMSE, ML. La diversité des égaliseurs qui existent dans la littérature prouve qu'il n'y a pas toujours un seul égaliseur qui marchera tout le temps dans tous les canaux de transmissions. Il est obligatoire d'analyser les égaliseurs et savoir les points forst et faibles de chacun et utiliser chaque égaliseur selon les ressources (complexité) et les contraintes posés sur les chaînes de communication (canaux sélectifs).