



Deuxième année Département Sciences du Numérique Options  
Télécommunications et Réseaux

---

# TP EGALISATION DE CANAL

---

*Auteur :*  
M. Ramy BTEICH

*Encadrant :*  
Dr. Charly POULLIAT

12 janvier 2024

# Introduction

La gestion de l'interférence entre symboles dans les systèmes de communication sans fil peut être optimisée en recourant à des filtres d'émission et de réception, particulièrement lorsque les caractéristiques du canal sont complètement maîtrisées.

Cependant, la réalité pratique impose souvent des limitations, car la connaissance du canal se restreint généralement à ses valeurs moyennes, engendrant des erreurs dans la correction de l'interférence en raison des imperfections des filtres. De plus, la variabilité du canal et ses évolutions au fil du temps peuvent conduire à des situations d'interférence entre symboles, nécessitant une compensation par le biais de techniques d'égalisation.

Ce rapport examinera deux approches distinctes d'égalisation, se concentrant sur les domaines temporel et fréquentiel.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Transmission sur canal selectif en frequence : egalisation temporelle</b>	<b>2</b>
1.1	Canal de transmission . . . . .	2
1.2	Egaliseurs temporels a structure non contrainte . . . . .	4
1.3	Egaliseurs temporels a structure RIF. . . . .	8
1.4	Egaliseur Maximum de vraisemblance . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Transmission sur canal selectif en frequence : egalisation frequentielle</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Transmission multi-utilisateurs</b>	<b>12</b>
	<b>Conclusion</b>	<b>14</b>

# Table des figures

1.1	DSP a l'emission . . . . .	3
1.2	DSP sans/avec bruit . . . . .	3
1.3	Constellation sans bruit . . . . .	4
1.4	Constellation avec bruit . . . . .	4
1.5	ZF . . . . .	5
1.6	MMSE . . . . .	6
1.7	Comparaison entre ZF et MMSE . . . . .	7
1.8	Structure RIF . . . . .	8
1.9	Maximum Likelihood Equalizer . . . . .	9
2.1	PEB QPSK avec ZF et MMSE . . . . .	11
3.1	SC-FDMA VS OFDMA . . . . .	12
3.2	Mappings frequentiels possibles . . . . .	13
3.3	Module et Phase user1 . . . . .	13
3.4	fModule et Phase user2 . . . . .	13

# Liste des acronymes

<b>BPSK</b>	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
<b>DSP</b>	<i>Densité Spectrale de Puissance</i>
<b>SC-FDMA</b>	Single-Carrier Frequency Division Multiple Access
<b>ISI</b>	<i>Intersymbol Interference</i>
<b>ML</b>	<i>Maximum Likelihood</i>
<b>MMSE</b>	<i>Minimum Mean-Square Error</i>
<b>SC-OFDMA</b>	<i>Single-Carrier Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
<b>PC</b>	<i>Préfixe Cyclique</i>
<b>PEB</b>	<i>Probabilité d'Erreur</i>
<b>QPSK</b>	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
<b>SNR</b>	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
<b>TEB</b>	<i>Taux d'Erreur Binaire</i>
<b>ZF</b>	<i>Zero Forcing Equalizer</i>

## Table des figures

---

# Partie 1

## Transmission sur canal selectif en frequence : egalisation temporelle

*On considère dans un premier la transmission sur un canal sélectif en fréquence. Considéré comme modèle de transmission bande de base. On utilisera à l'émetteur une modulation de type MAQ à  $M$  états avec mapping de type Gray. Le nombre d'états considérés pourra être variable de  $M = 4$  à  $M = 64$  états.*

### 1.1 Canal de transmission

*Le signal émis est transmis dans un canal sélectif en fréquence dont on pourra prendre la réponse impulsionnelle du canal équivalent comme suit (canaux "test" de Proakis) :*

- $h_A = [0.04, 0.05, 0.07, 0.21, 0.5, 0.72, 0.36, 0, 0.21, 0.03, 0.07]$ ,
- $h_B = [0.407, 0.815, 0.407]$ ,
- $h_C = [0.227, 0.46, 0.688, 0.460, 0.227]$

$$\tilde{h}(z) = 1 - az^{-1}, \text{ ou } |a| < 1$$

*On ajoutera ensuite un bruit Gaussien à la chaîne de transmission précédente. On pourra utiliser plusieurs puissances de bruit que l'on calculera en fonction de  $E_s/N_0$  (rapport signal sur bruit par symbole code). On rappelle que la variance du bruit à appliquer sur les voies en phase et quadrature du bruit complexe  $n(t)$  s'écrit en fonction du  $E_s/N_0$  souhaité de la manière suivante :*

$$\sigma_{n_I}^2 = \sigma_{n_Q}^2 = \frac{\sum_n |h(n)|^2 \sigma_s^2}{2E_s/N_0},$$

## 1.1. Canal de transmission

---

ou  $\sigma^2 n$  represente la variance des symboles  $s_n$ ,  $h(n)$  la reponse impulsionnelle du canal discret equivalent et  $E_s/N_0$  le rapport signal a bruit par symbole a l'entree du recepteur. Le modele de reception est alors donne par :

$$y[n] = h * x[n] + b[n]$$

Nous travaillons avec un faible rapport signal-sur-bruit (SNR) afin de mettre en évidence le chevauchement des points reçus. Le SNR est varié dans la plage de 0 à 5 dB. Les symboles reçus sans bruit représentent une transmission sans perturbations externes, offrant ainsi une représentation fidèle des symboles émis. En revanche, les symboles reçus avec bruit ont été altérés par des perturbations externes telles que des interférences et des retards, pouvant compromettre la qualité des données transmises. Le chevauchement des points résultant de ces altérations complique la distinction entre les symboles, rendant difficile l'identification précise de chaque point. On peut mieux percevoir l'influence du bruit en visualisant la densité spectrale à l'émission et à la réception du signal. Cela nous permet de mieux comprendre comment le bruit affecte la transmission en observant les variations de densité spectrale à chaque étape.

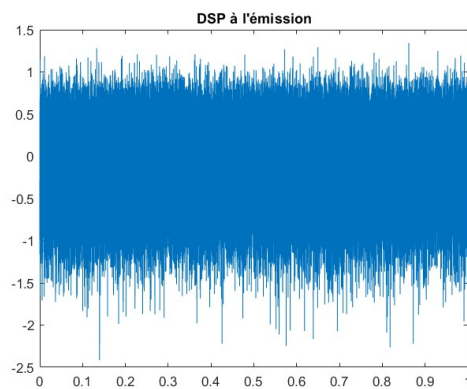


FIGURE 1.1 – DSP a l'emission

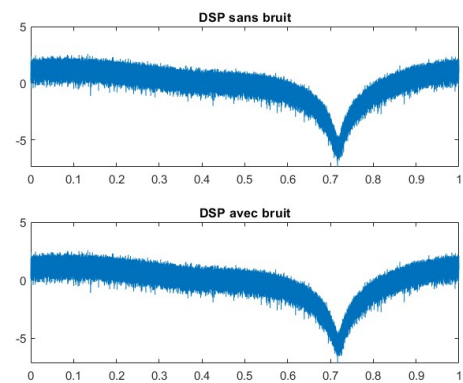


FIGURE 1.2 – DSP sans/avec bruit



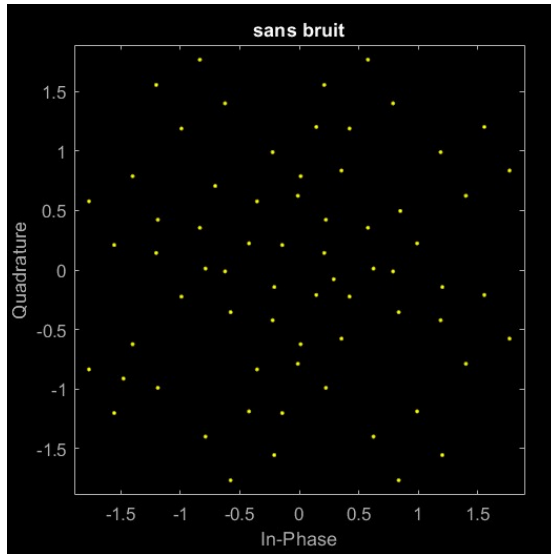


FIGURE 1.3 – Constellation sans bruit

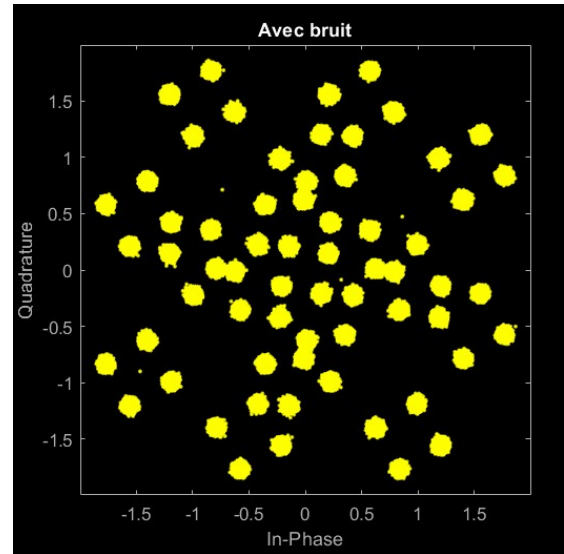


FIGURE 1.4 – Constellation avec bruit

On peut mieux percevoir l'influence du bruit en visualisant la densité spectrale à l'émission et à la réception du signal. Cela nous permet de mieux comprendre comment le bruit affecte la transmission en observant les variations de densité spectrale à chaque étape.

## 1.2 Egaliseurs temporels a structure non contrainte

*On realisera en suite une comparaison des performances des egaliseurs de type ZF et MMSE sans contrainte en comparant les reponses impulsionnelles des filtres egaliseurs et leurs performances en terme de taux d'erreur binaire. Quand le canal est d'inverse stable et causal, le calcul de l'egaliseur ZF non contraint peut etre realise de maniere directe par la fonction filter de Matlab. Dans le cas contraire et pour le cas MMSE non contraint, il est difficile d'avoir acces a une implementation aisee avec Matlab qui permet de gerer une reponse impulsionnelle non causale. Nous realiserons une version approchee en considerant un calcul direct de la reponse impulsionnelle de ces filtres sur un nombre de coefficients suffisamment grand pour considerer cette approximation valide. Pour ce faire, on calculera cette reponse impulsionnelle a l'aide la fonction ComputeRI fournie.*

function [RI]= computerI( N , r, p, k )

*Cette fonction calcule directement une approximation a taille finie de la reponse impulsionnelle stable du filtre en distinguant les poles de module superieur ou inferieur.*

## 1.2. Egaliseurs temporels a structure non contrainte

---

**Egalisateur ZF :** L'égaliseur ZF opère en divisant le signal reçu par la réponse fréquentielle du canal pour compenser l'interférence intersymbole . La réponse fréquentielle de cet égaliseur est déterminée en utilisant la méthode du zero forcing, visant à annuler les effets du canal et à restaurer la forme originale du signal.

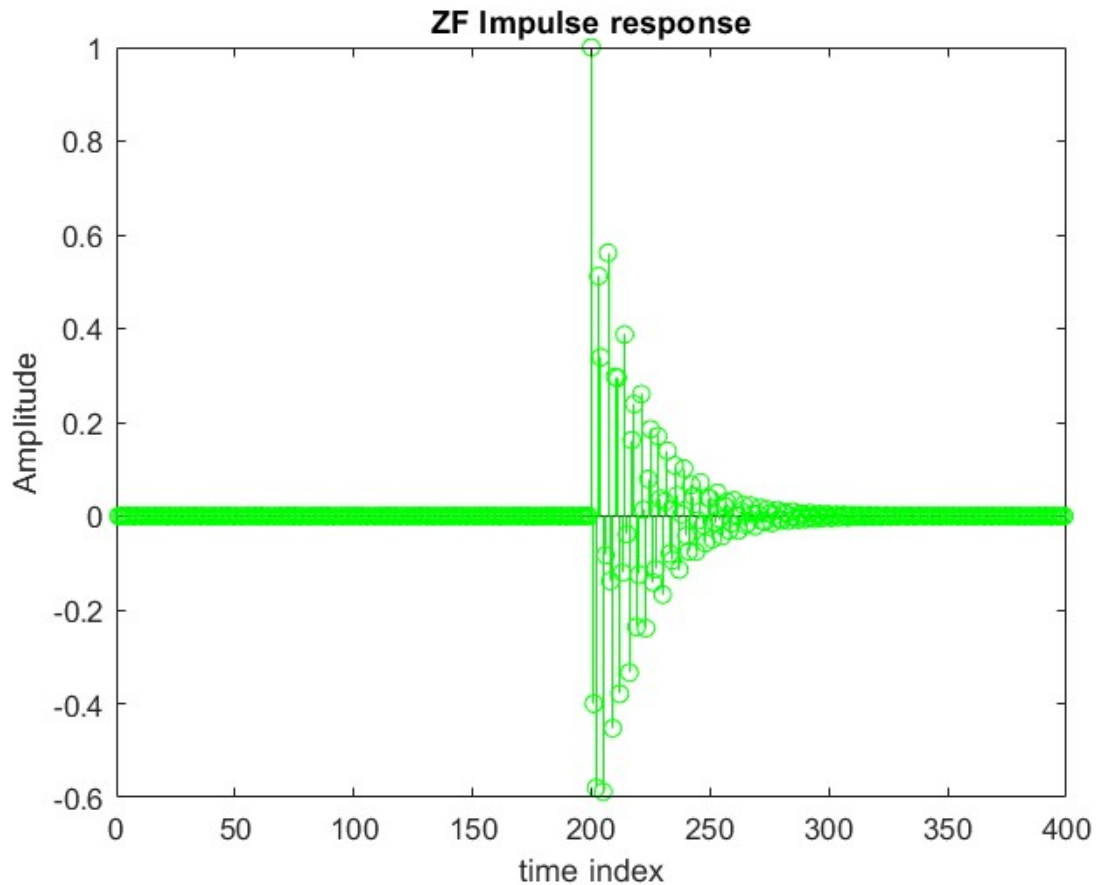


FIGURE 1.5 – ZF

## Partie 1. Transmission sur canal selectif en frequence : egalisation temporelle

**Egalisateur MMSE :** Dans cette section, nous déploierons un égaliseur MMSE, dont la mission est de réduire l'erreur quadratique moyenne entre la sortie de l'égaliseur et le symbole que nous cherchons à estimer. La conception de la réponse fréquentielle de cet égaliseur s'alignera sur cet objectif de minimisation d'erreur.

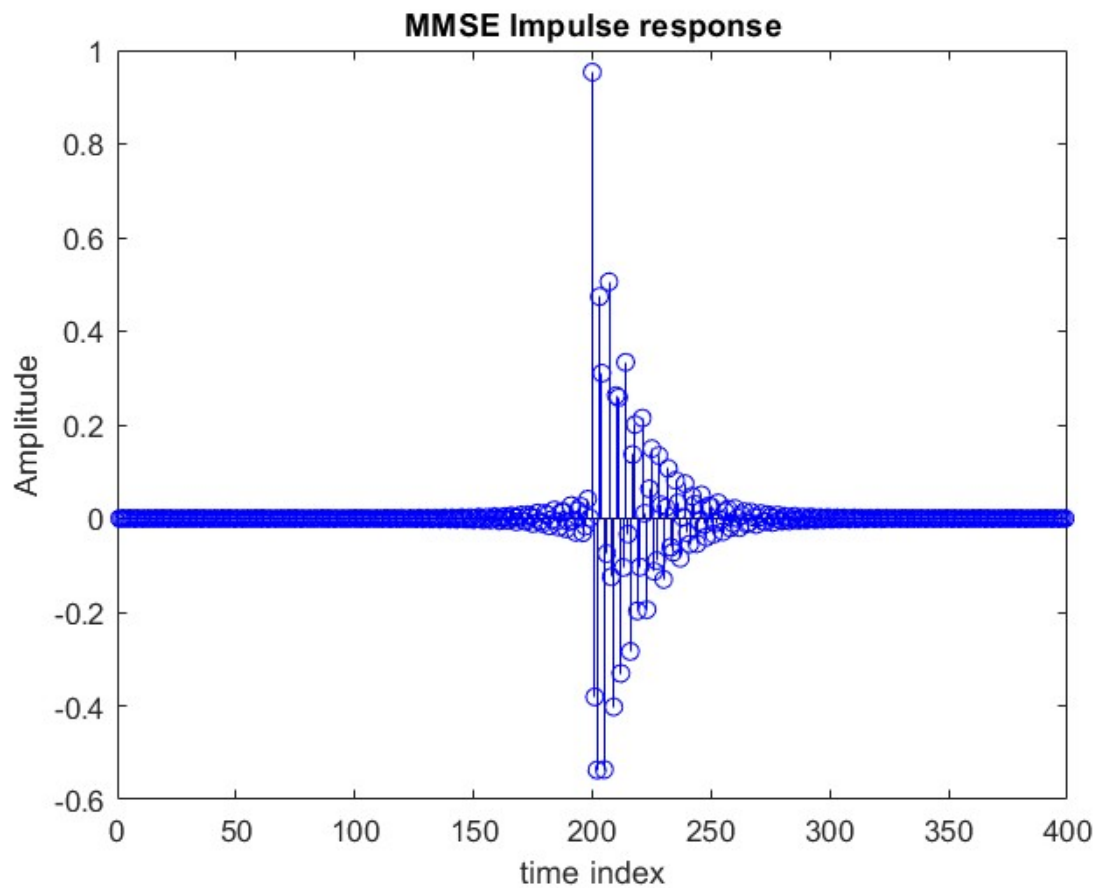


FIGURE 1.6 – MMSE

## 1.2. Égaliseurs temporels a structure non contrainte

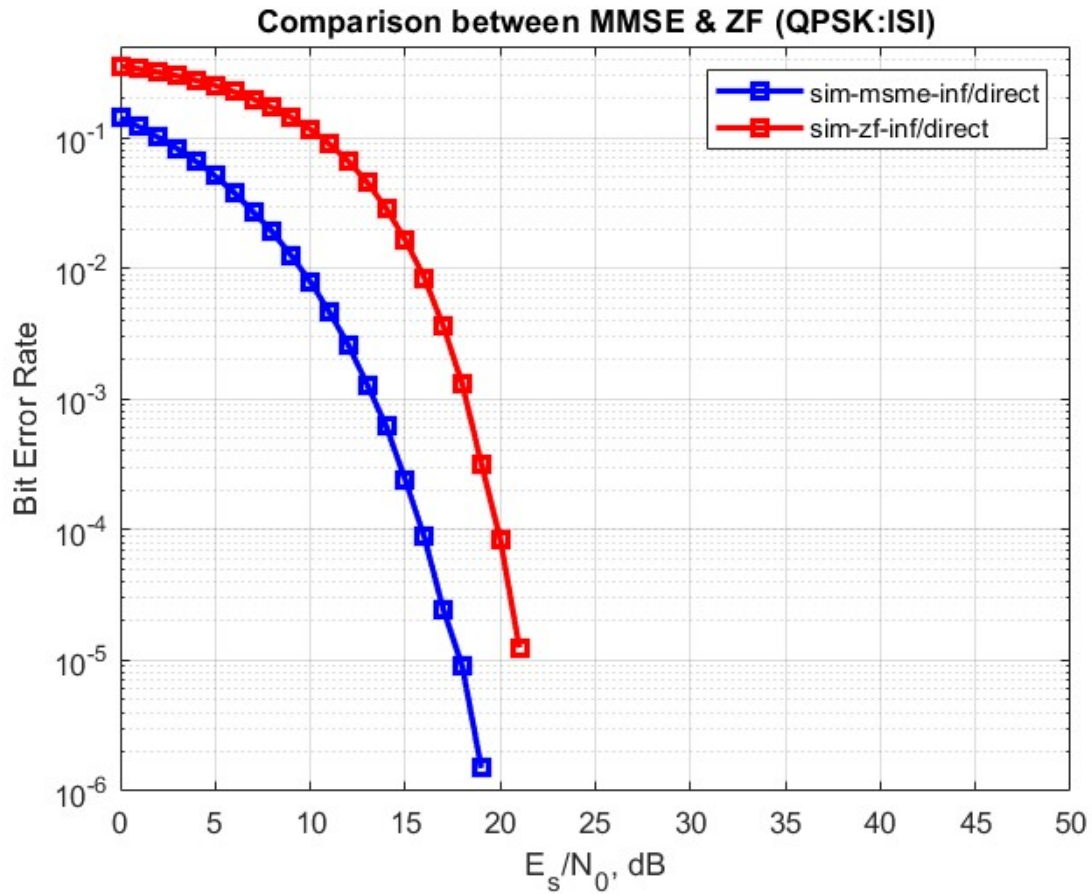


FIGURE 1.7 – Comparaison entre ZF et MMSE

**Comparaison :** En présence d'un faible SNR, l'égaliseur MMSE offre un avantage notable en tenant compte du bruit additif ainsi que de la réduction de l'interférence entre symboles, deux composantes majeures de perturbation du signal reçu. Contrairement à l'égaliseur ZF qui se focalise exclusivement sur l'interférence entre symboles, l'égaliseur MMSE cherche un compromis entre la réduction des interférences et l'amplification du bruit. Cependant, à des niveaux élevés de SNR, les résultats des égaliseurs ZF et MMSE convergent, car les deux parviennent efficacement à minimiser l'erreur de démodulation dans de telles conditions.

### 1.3 Egaliseurs temporels a structure RIF.

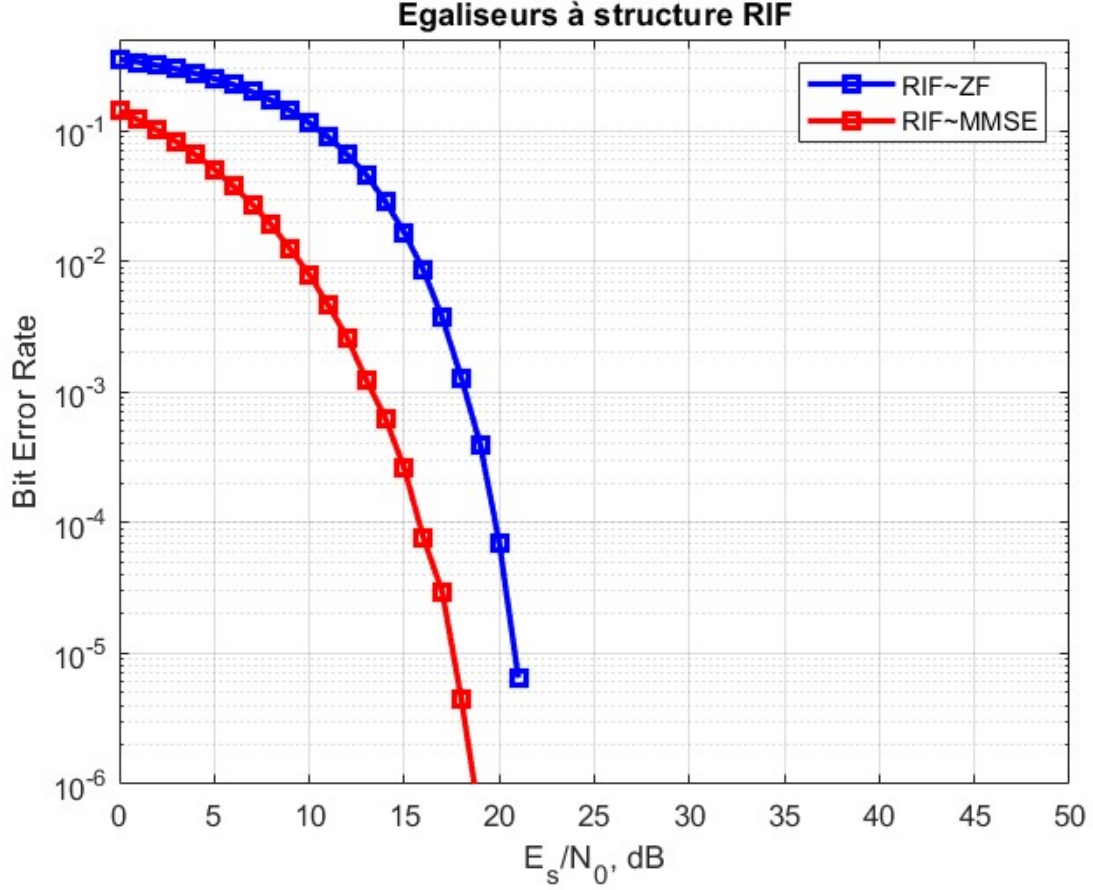


FIGURE 1.8 – Structure RIF

L'égaliseur MMSE démontre une performance supérieure au ZF, même en présence d'une réponse impulsionnelle finie. Cette amélioration résulte du fait que l'égaliseur MMSE évalue l'erreur quadratique de chaque symbole en tenant compte du bruit introduit dans le canal, contrairement à l'égaliseur ZF qui néglige cet aspect. Bien que l'égaliseur ZF vise à minimiser la distorsion maximale entre les symboles en sortie, il ne parvient pas à éliminer complètement l'ISI. Un inconvénient majeur de l'égaliseur ZF réside dans son comportement amplificateur du bruit ou des erreurs d'approximation lorsque les valeurs de  $C(k)$  sont très proches de zéro, en raison de l'ampleur accrue du filtre réciproque  $H(k)$ . En revanche, l'égaliseur MMSE offre une meilleure robustesse dans de telles situations.

### 1.4 Egaliseur Maximum de vraisemblance

*On réalisera la mise en oeuvre d'une égalisation par l'égaliseur de maximum de vraisemblance qui est réalisée par la mise en oeuvre de l'algorithme de Viterbi sur le treillis associé au canal équivalent bande de base  $h[n]$ . Pour ce faire on utilisera les fonctions natives fournies par Matlab.*

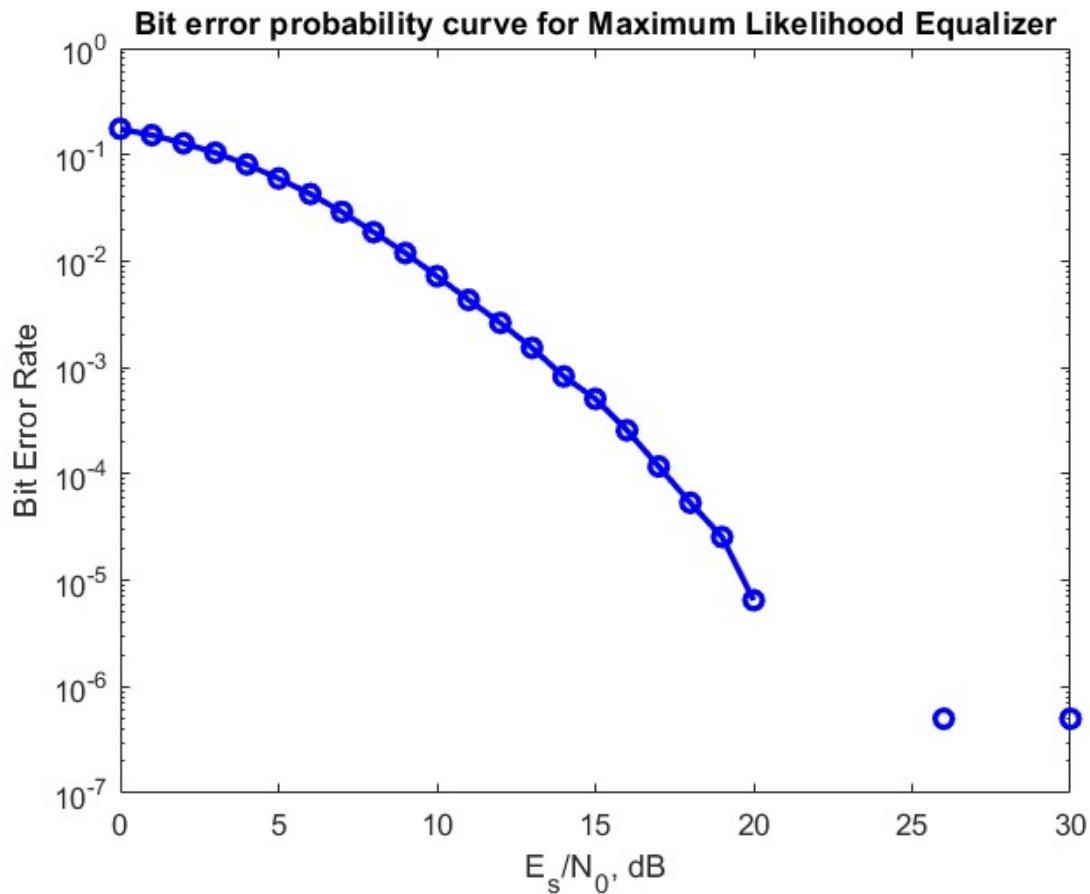
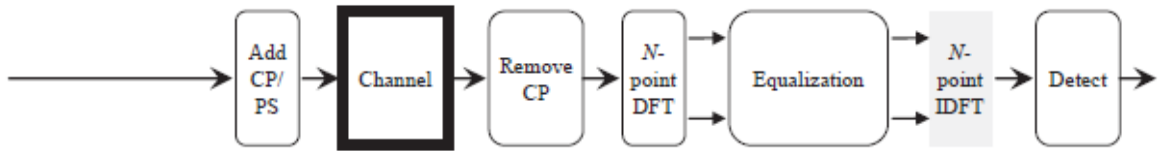


FIGURE 1.9 – Maximum Likelihood Equalizer

En raison de la forte sélectivité en fréquence du canal utilisé, l'égaliseur Maximum de Vraisemblance démontre une performance supérieure par rapport aux égaliseurs linéaires. Cette supériorité s'explique par la capacité de l'égaliseur Maximum de Vraisemblance à mieux s'adapter aux caractéristiques spécifiques du canal, optimisant ainsi la qualité de la transmission dans un environnement fréquemment exigeant.

## Partie 2

### Transmission sur canal selectif en frequence : egalisation frequetielle



On considere tout d'abord une transmission sur un canal selectif en frequence avec egalisation frequetielle dont le schema est donne dans la figure . On considerera le modele de transmission bande de base. On utilisera une modulation de type MAQ a  $M$  etats avec mapping de Gray. Le nombre d'etats consideres devra etre variable de  $M = 4$  a  $M = 64$  etats. En reception, le signal est alors egalise dans le domaine frequetiel.

On rappelle que les egaliseurs ZF et MMSE ont pour expressions,  $\forall k = 1 \dots NFFT-1$

$$W_{zf}[k] = \frac{H^*[k]}{|H[k]|^2}$$

$$W_{mmse}[k] = \frac{H^*[k]}{|H[k]|^2 + (E_s/N_0)^{-1}}$$

ou  $H[k]$ ,  $\forall k \in [1, NFFT]$  est la sequence obtenue a  $\text{fft}(h(n), NFFT)$ .

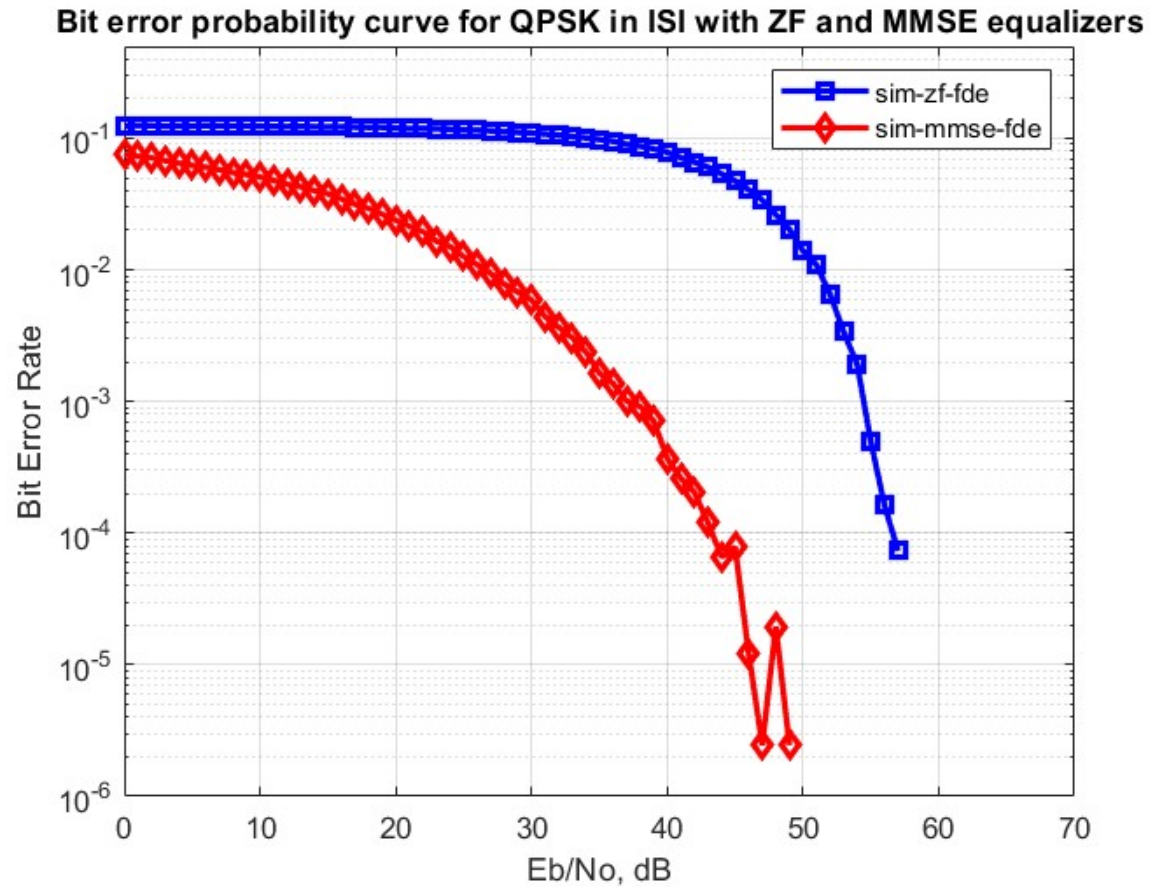


FIGURE 2.1 – PEB QPSK avec ZF et MMSE

L'égaliseur MMSE démontre une performance notablement supérieure en termes de TEB, même dans des conditions de SNR plus défavorables, par rapport à l'égaliseur ZF . En effet, l'égaliseur ZF n'affiche une efficacité significative qu'en l'absence de bruit. Cette constatation suggère que l'égaliseur MMSE offre une robustesse accrue face aux conditions bruitées, le rendant ainsi plus adapté pour des applications où le bruit est présent. Par ailleurs, il est observé que dans les trois cas de canaux les performances du filtre MMSE conserve sa supériorité par rapport au filtre ZF même dans le domaine fréquentiel.



## Partie 3

### Transmission multi-utilisateurs

On considère maintenant l'extension au cas multi-utilisateurs et on souhaite implanter les systèmes SC-FDMA dans le cadre de deux utilisateurs. La structure de ces schémas est donnée. On prendra soin de prendre des canaux différents pour chaque utilisateur. On pourra tester différents types de mapping comme montré sur la figure. Comparer pour les schémas l'évolution de l'amplitude des signaux (module) au cours du temps pour le cas 4-QAM. Que pouvez-vous en déduire ?

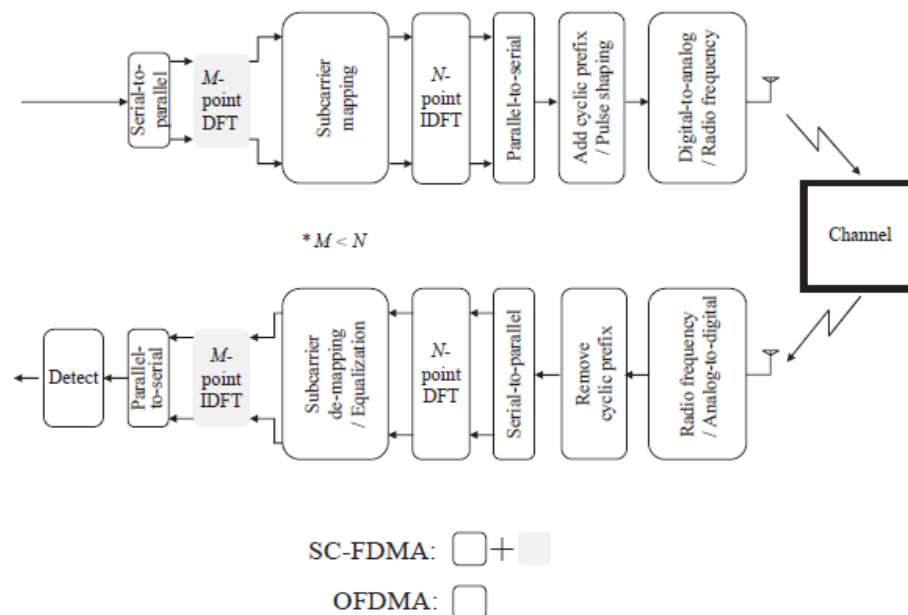


FIGURE 3.1 – SC-FDMA VS OFDMA

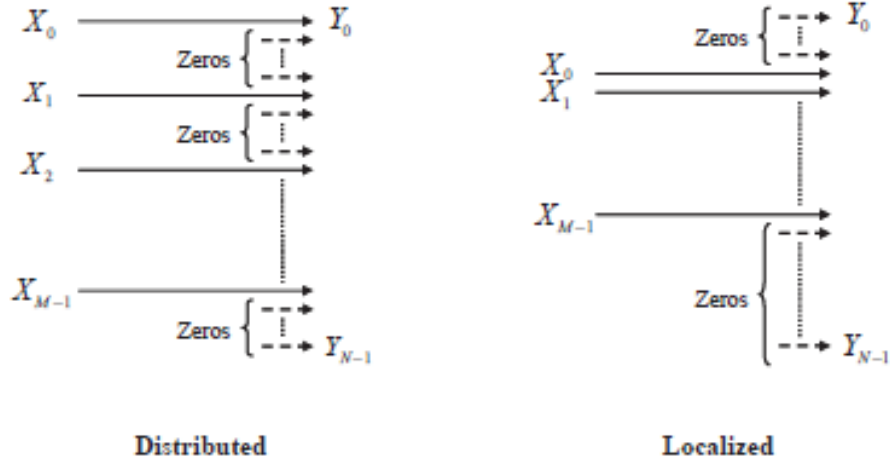


FIGURE 3.2 – Mappings frequentiels possibles

**USER 1** :  $h_1(t) = x(t) - 0.9x(t - T_s)$

**USER 2** :  $h_2(t) = 0.227x(t) + 0.46x(tT_s) + 0.688x(t2T_s) + 0.46x(t3T_s) + 0.227x(t4T_s)$

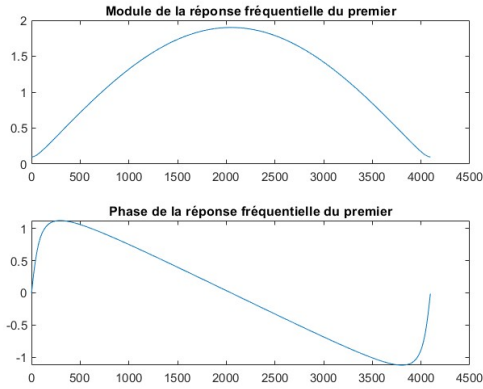


FIGURE 3.3 – Module et Phase user1

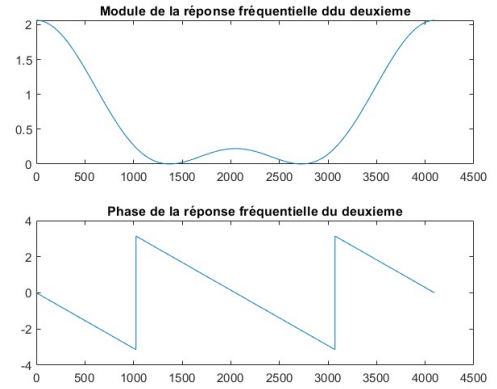


FIGURE 3.4 – fModule et Phase user2

La transmission s'effectue sur un total de 1024 porteuses, dont 512 sont assignées au premier utilisateur et les 512 restantes au deuxième utilisateur (par le biais d'un mapping localisé). Le PC est constitué de 8 porteuses. Le SNR est maintenu à 10 décibels, et un égaliseur de type MMSE est utilisé dans le bloc récepteur. Une comparaison peut être établie entre l'amplitude des signaux avant l'introduction du bruit dans ce scénario et celui du cas précédemment étudié avec la technique SCFDE.

# Conclusion

Dans le cadre de cette étude, nous avons examiné attentivement l'efficacité de différentes techniques d'égalisation dans le contexte d'un canal. Notre analyse a porté sur la comparaison des performances de divers types d'égaliseur, MMSE , ainsi que d'autres égaliseurs moins complexes, tels que l'égaliseur ZF.

Les résultats de cette comparaison ont révélé que l'égaliseur de type MMSE se distingue en offrant des performances supérieures par rapport aux autres égaliseurs testés. Cette supériorité peut être attribuée à la complexité de l'égaliseur MMSE, lui permettant de s'adapter de manière plus efficace aux caractéristiques du canal imparfait et de mieux compenser les distorsions résultantes.

Au cours de notre étude, nous nous sommes concentrés sur l'efficacité de diverses techniques d'égalisation dans un environnement de canal imparfait, caractérisé par des altérations telles que le bruit, l'interférence et la distorsion. Notre évaluation des performances des égaliseurs s'est appuyée sur des indicateurs tels que la DSP et le SNR pour mesurer la qualité du signal reçu après l'égalisation.

Les conclusions de cette étude mettent en évidence l'importance des égaliseurs adaptatifs, en particulier l'égaliseur MMSE, pour améliorer significativement les performances de transmission dans des canaux imparfaits. Cette démarche a le potentiel d'optimiser la qualité du signal en présence de diverses perturbations, ouvrant ainsi des perspectives intéressantes pour le domaine des communications sans fil.