



Projet Egalisation De Canal

GAUTHIER Florian
WITHANAGE Sakun

Département Sciences du Numérique - Deuxième année - Parcours Réseaux
2024-2025

Table des matières

1	Introduction	3
2	Premier TP	4
2.1	Transmission sur un canal sélectif en fréquence : égalisation temporelle	4
2.1.1	Canal de transmission	4
2.1.2	Égaliseurs temporels à structure non contrainte	6
2.1.3	Égaliseurs temporels à structure RIF	7
2.1.4	Égaliseur Maximum de vraisemblance	8
3	Deuxième TP	10
3.1	Transmission sur un canal sélectif en fréquence : égalisation temporelle	10
3.2	Transmission sur un canal sélectif en fréquence : égalisation fréquentielle	10
3.2.1	Égalisation fréquentielle et démodulation	10
4	Conclusion	12

1 Introduction

L'objectif de ces travaux pratiques est d'étudier et de mettre en œuvre différentes techniques d'égalisation de canal dans un système de transmission numérique.

Lorsqu'un signal est transmis sur un canal, celui-ci peut introduire des distorsions et des interférences inter-symboles (ISI), qui vont affecter la qualité de réception et augmenter le taux d'erreur binaire (TEB). L'égalisation permet de corriger ces effets en compensant les dégradations que le signal aura subies.

Dans ces TP, nous avons travaillé sur plusieurs approches d'égalisation dans le domaine temporel. On a commencé par étudier la transmission d'un signal modulé sur un canal sélectif en fréquence et observé son impact sur la réception. Puis nous avons implémenté et comparé différentes stratégies d'égalisation :

- L'égalisation linéaire ZF (Zero-Forcing) et MMSE (Minimum Mean Square Error) : Ces méthodes permettent de compenser les distorsions du canal en minimisant respectivement l'interférence et le bruit.
- L'égalisation non linéaire basée sur un treillis : Cette méthode utilise l'algorithme de Viterbi pour estimer les symboles transmis avec une meilleure robustesse face au bruit.

L'ensemble des simulations a été réalisé sous Matlab, en intégrant la génération du signal, la modulation, la transmission sur un canal avec bruit, et l'application des égaliseurs.

L'objectif final est d'analyser et de comparer les performances de ces différentes techniques en fonction du canal et du rapport signal sur bruit (SNR).

2 Premier TP

Ce premier TP porte sur l'égalisation de canal dans le domaine temporel.

L'objectif est d'analyser l'impact d'un canal sélectif en fréquence sur un signal modulé et de comparer différentes techniques d'égalisation pour corriger les distorsions subies.

2.1 Transmission sur un canal sélectif en fréquence : égalisation temporelle

2.1.1 Canal de transmission

Lorsqu'un signal est transmis sur un canal sélectif en fréquence, il subit des distorsions qui peuvent entraîner une interférence inter-symboles (ISI) et une dégradation des performances du système de communication.

Ainsi, lorsqu'on affiche les symboles reçus sans bruit :

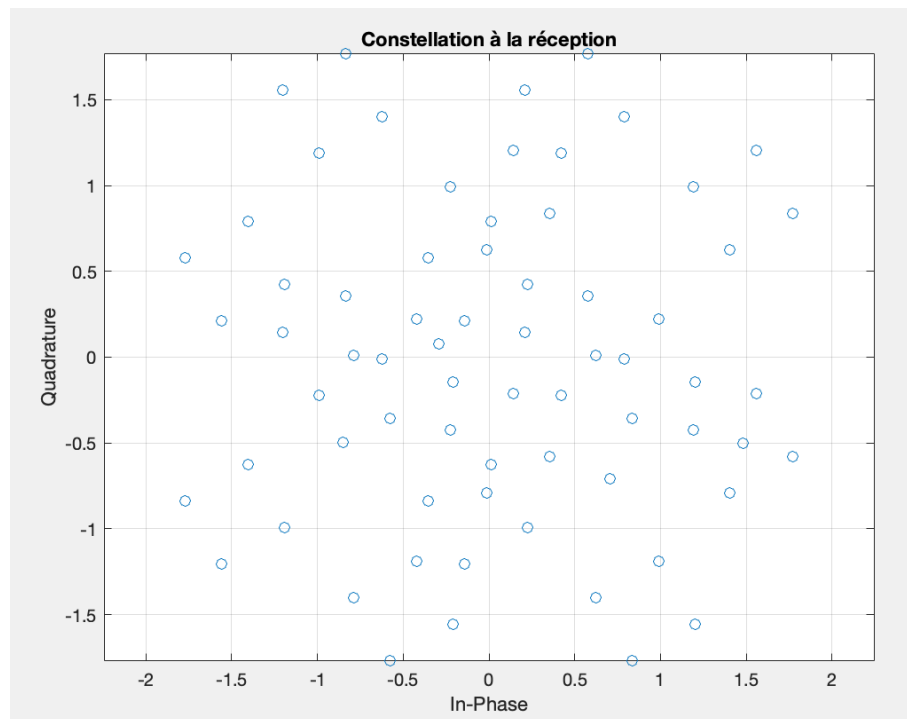


FIGURE 1 – Constellation à la réception sans bruit

on observe que les points sont dispersés, que ce soit en phase ou en quadrature par rapport à la constellation émise.

Alors, si du bruit est ajouté :

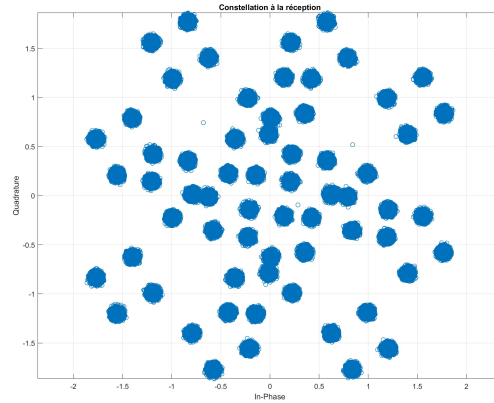


FIGURE 2 – Constellation à la réception avec bruit faible

Pour un bruit faible, on observe que des nuages de points sont générés autour de chacun des symboles en réception de la constellation non bruitée. Puis avec un bruit qui augmente, la dispersion de ces nuages augmente jusqu'à ce que tous ces nuages se confondent entre eux.

Le bruit amplifie encore la dispersion qui était déjà présente avec les ISI. La distinction entre les symboles devient plus difficile ce qui augmente le taux d'erreur binaire (TEB), car les symboles se mélangent encore plus.

Pour affiner nos observations, on affiche la DSP du signal modulé à l'émission :

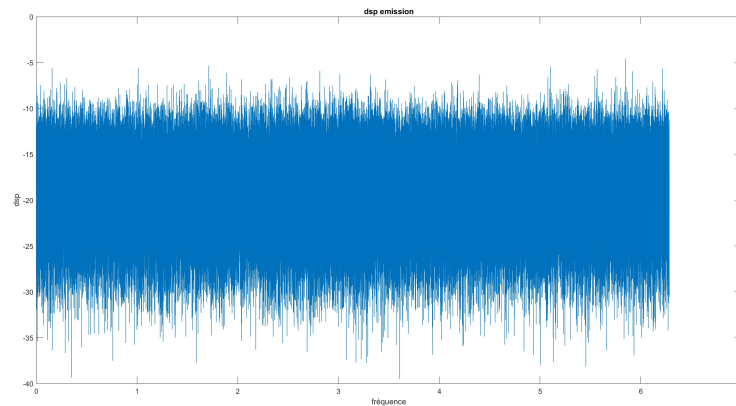


FIGURE 3 – Densité spectrale de puissance à l'émission

La DSP présente une répartition d'énergie uniforme, conforme à la bande passante du signal modulé.

Ensuite, on s'intéresse à l'impact de la chaîne de transmission. Pour cela, on affiche la DSP en réception, d'abord sans bruit :

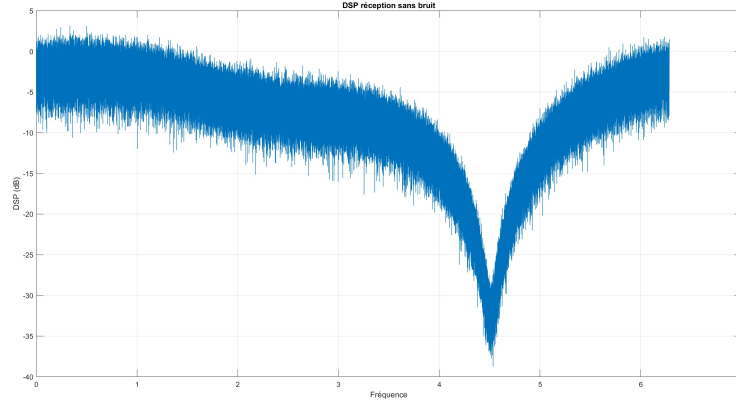


FIGURE 4 – Densité spectrale de puissance à la réception sans bruit

La DSP conserve une structure similaire à celle du signal émis, mais avec des modifications liées aux distorsions introduites par le canal. On peut observer une atténuation sélective pour une fréquence de 4.5 kHz, ce qui correspond aux creux de la réponse fréquentielle du canal.

Puis pour étudier les effets du bruit, on affiche cette même DSP en réception pour des signaux plus ou moins bruités :

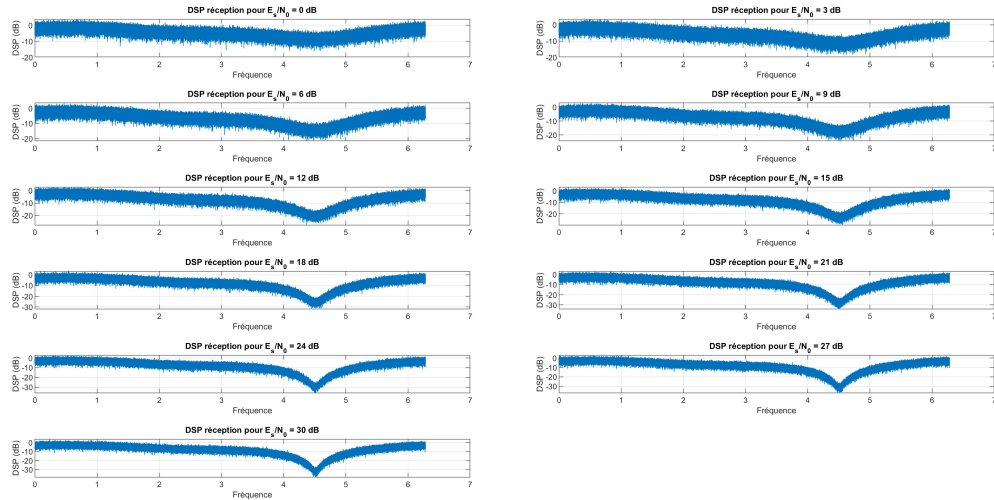


FIGURE 5 – Densité spectrale de puissance à réception avec bruit

On observe qu'à faible E_b/N_0 donc à bruit élevé, l'atténuation qui est normalement générée par le canal dans la DSP a tendance à disparaître. Puis lorsque E_b/N_0 augmente on observe que la DSP suit de plus en plus l'allure de la DSP sans bruit générée précédemment.

On en conclut que l'impact du bruit est plus marqué dans les zones où le canal atténue fortement le signal, et donc que c'est sur ces zones que le bruit dégrade davantage la réception.

2.1.2 Égaliseurs temporels à structure non contrainte

Ici, nous implémentons l'égalisation MMSE et ZFE sans contrainte en utilisant une matrice de Toeplitz pour représenter la matrice de convolution associée au canal.

Pour étudier les effets de ces deux égalisations selon les bruits, on affiche leurs courbes d'évolutions respectives de TEB en fonction du bruit :

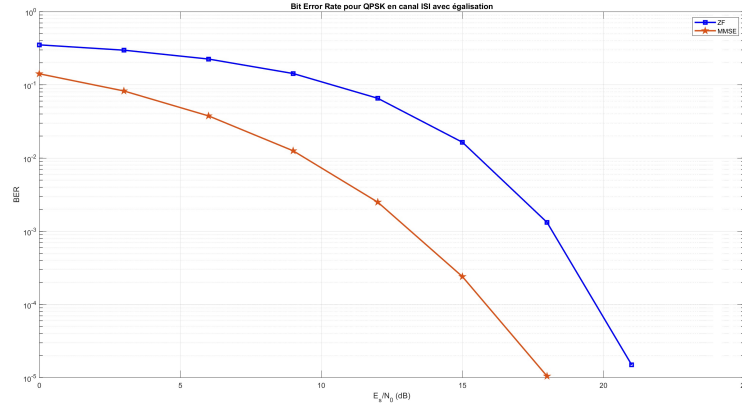


FIGURE 6 – TEB pour MMSE et ZFE sans contraintes

On observe que quelque soit le bruit, les performances obtenues avec l'égalisation MMSE sont meilleures.

La différence en terme de TEB est surtout vraie lorsque le bruit est fort, parce que l'égaliseur ZFE annule totalement l'interférence inter-symboles mais amplifie le bruit, ce qui dégrade ses performances, surtout à faible E_s/N_0 . À l'inverse, l'égaliseur MMSE optimise l'égalisation en tenant compte du bruit, ce qui va améliorer ses performances en terme de TEB.

Globalement, le MMSE est préférable, notamment dans les environnements bruyants, grâce à sa meilleure gestion du compromis entre réduction de l'ISI et amplification du bruit.

2.1.3 Égaliseurs temporels à structure RIF

L'objectif l'implémentation avec contrainte RIF est de limiter la taille du filtre de réception à une longueur finie. Cela oblige à ne considérer qu'un nombre restreint d'éléments du canal.

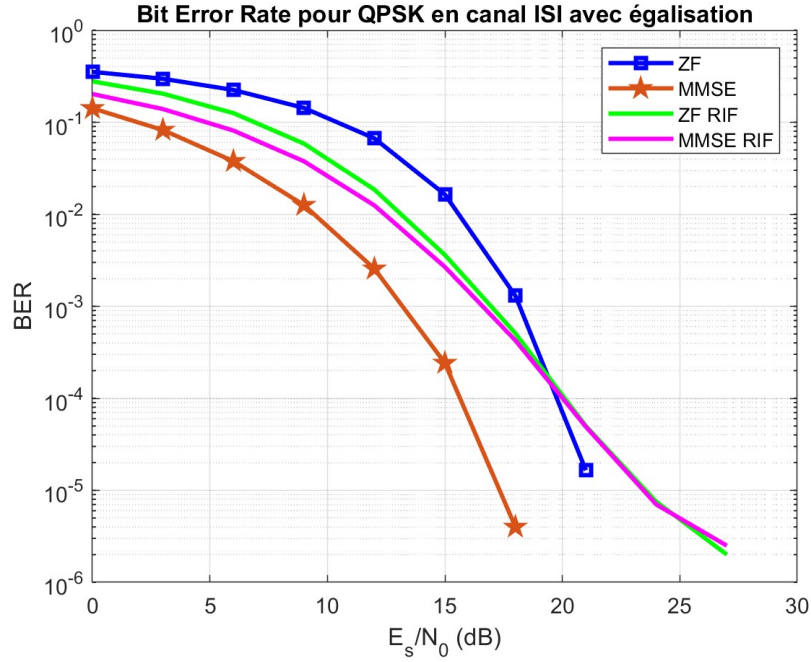


FIGURE 7 – TEB pour comparer MMSE et ZFE sans contraintes puis avec une structure RIF

On observe que les versions RIF des égaliseurs ZF et MMSE, représentées en vert et magenta respectivement, montrent un comportement similaire à leurs équivalents classiques mais avec une légère dégradation des performances due à la contrainte de longueur finie du filtre.

Ainsi, les versions RIF des égaliseurs détériorent légèrement les versions idéales, ce qui est prévisible puisque la longueur du filtre impose une approximation qui limite leurs capacités de compensation de l'ISI.

2.1.4 Égaliseur Maximum de vraisemblance

L'égaliseur à maximum de vraisemblance cherche à identifier la séquence de symboles envoyée qui a le plus de chances d'avoir généré le signal reçu, tout en prenant en compte les distorsions du canal et l'ajout de bruit

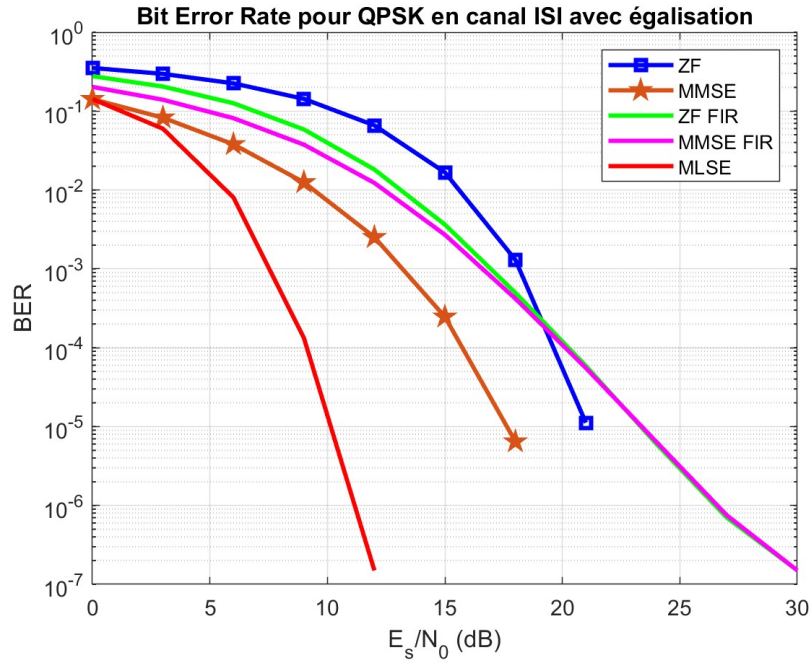


FIGURE 8 – TEB pour comparer ML aux autres égalisations

On observe que l'algorithme du Maximum du Vraisemblance (ML), tracé en rouge, offre les meilleures performances.

Cette méthode exploite une approche qui prend en compte la structure du canal pour minimiser le TEB. Comme le montre la courbe, le ML permet d'atteindre des BER très faibles à partir de 10 dB de E_b/N_0 , en surpassant largement toutes les autres méthodes d'égalisation testées.

Ainsi le ML, comme attendu, offre des performances optimales en termes de BER puisqu'il minimise globalement les erreurs en évaluant la séquence la plus probable.

Par contre, cette amélioration des performances se fait au prix d'une complexité de calcul plus élevée.

3 Deuxième TP

Ce deuxième TP prolonge l'étude de l'égalisation de canal en introduisant l'égalisation dans le domaine fréquentiel.

Après avoir analysé les performances de l'égalisation temporelle, nous comparons son efficacité à celle de l'égalisation fréquentielle, qui repose sur une approche différente pour compenser les distorsions du canal.

Enfin, nous abordons la transmission multi-utilisateurs, où plusieurs signaux partagent un même canal, ce qui nécessite d'autres techniques pour limiter les interférences.

3.1 Transmission sur un canal sélectif en fréquence : égalisation temporelle

Cette partie ayant déjà été implantée dans le TP1, on se contente de reprendre la chaîne de transmission réalisée précédemment pour les égalisateurs ZF et MMSE.

3.2 Transmission sur un canal sélectif en fréquence : égalisation fréquentielle

Dans cette section, nous étudions l'impact d'un canal sélectif en fréquence sur une transmission modulée et analysons les performances de deux approches d'égalisation temporelle : ZF et MMSE.

L'objectif est de compenser les distorsions introduites par le canal et de réduire le taux d'erreur binaire (TEB).

3.2.1 Égalisation fréquentielle et démodulation

Nous faisons varier l'ordre de modulation M entre 4 et 64, et utilisons un préfixe cyclique pour éliminer les interférences inter-blocs.

On distingue alors les performances obtenues avec les égalisations ZF et MMSE :

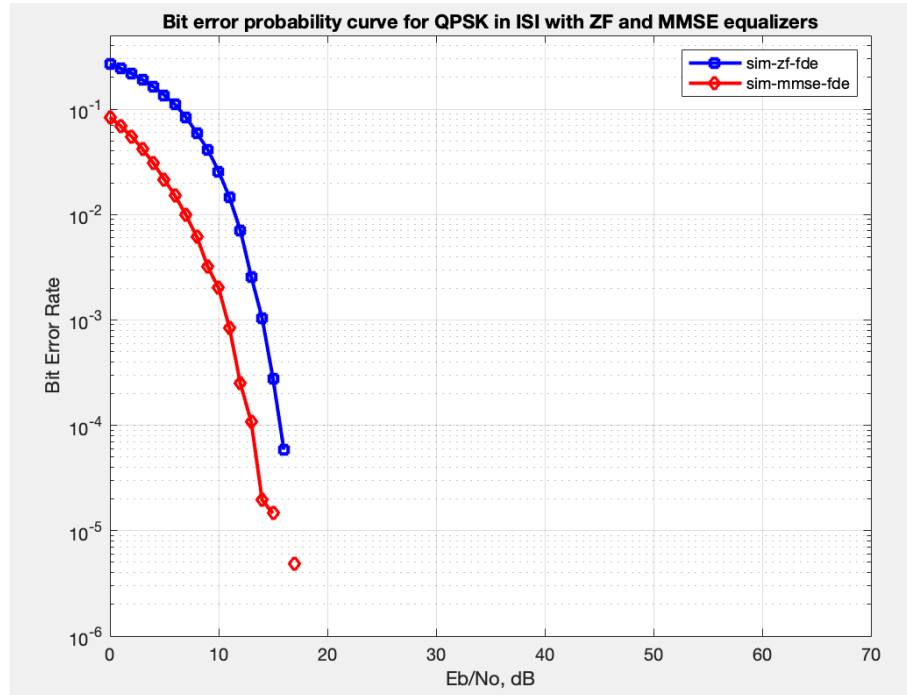


FIGURE 9 – TEB égalisation fréquentielle

On remarque que les performances en terme de TEB sont meilleures avec l'égalisation MMSE quelque soit le bruit introduit.

Tout comme dans le TP1, la différence en terme de TEB est surtout vraie lorsque le bruit est fort, parce que l'égaliseur ZFE annule totalement l'interférence inter-symboles mais amplifie le bruit, ce qui dégrade ses performances, surtout à faible E_s/N_0 . À l'inverse, l'égaliseur MMSE optimise l'égalisation en tenant compte du bruit, ce qui va améliorer ses performances en terme de TEB.

Par contre, comparé au TP1, l'ajout du préfixe cyclique permet d'observer une diminution du TEB plus rapide que sans. C'est logique car le préfixe cyclique va permettre de supprimer les interférences inter-symboles qui sont sources d'erreurs dans la transmission des bits.

4 Conclusion

A travers ces TP, nous avons pu comparer les techniques d'égalisation dans le contexte de canaux sélectifs en fréquence, en analysant les performances des égaliseurs ZF et MMSE avec et sans contrainte. Nous avons également étudié l'impact du préfixe cyclique dans la transmission.

Les résultats obtenus montrent que :

- L'égaliseur ZF, bien qu'efficace à haut E_s/N_0 , est limité par sa sensibilité au bruit, ce qui peut dégrader ses performances à faible E_s/N_0 .
- L'égaliseur MMSE offre une meilleure robustesse, en équilibrant la réduction du bruit et la compensation des distorsions du canal, particulièrement dans des conditions de faible rapport signal-bruit.

De plus, l'utilisation de la structure RIF a permis d'imposer des contraintes qui ont montrées leur impact sur les performances des égaliseurs, en modifiant les performances en terme de TEB des deux égaliseurs de l'étude, même si le MMSE garde les meilleures performances.

Le préfixe cyclique, quant à lui, a permis de supprimer les interférences inter-blocs. Cette transformation a permis une amélioration de l'efficacité des techniques d'égalisation dans le domaine fréquentiel.

En conclusion, ce TP met en évidence l'importance de choisir l'égaliseur et les stratégies de transmission en fonction des caractéristiques du canal et des contraintes du système.