



Deuxième année Département Sciences du Numérique Options
Télécommunications et Réseaux

BE OFDM

Auteur :
M. Ramy BTEICH

Encadrant :
Dr. Thomas NATHALIE

22 décembre 2023

Introduction

Ce rapport expose notre exploration approfondie de la conception, de l'implémentation et de l'analyse d'une chaîne de transmission OFDM, entreprise dans le cadre de notre cursus en Sciences du Numérique, spécialisation Télécommunications et Réseaux. Notre objectif est de maîtriser l'implémentation d'une telle chaîne dans un contexte de canal sélectif en fréquence à l'aide de l'environnement Matlab.

Notre démarche se décompose en plusieurs phases : une première mise en place de la chaîne sans canal pour évaluer son fonctionnement, l'introduction d'un canal multi-trajets et l'exploration d'ajouts tels que les intervalles de garde et les préfixes cycliques. Nous examinerons également l'utilisation d'égaliseurs pour compenser les distorsions du canal et étudierons l'effet d'une erreur de synchronisation horloge.

Ce travail vise à illustrer notre maîtrise des concepts théoriques de l'OFDM ainsi que notre capacité à les appliquer dans des contextes pratiques. Chaque étape de cette exploration sera détaillée, mettant en lumière nos analyses, interprétations et conclusions pour fournir une vision exhaustive et approfondie de ce domaine crucial des télécommunications et des réseaux.

Table des matières

1	Implantation de la chaine de transmission OFDM sans canal	1
1.1	Emission	1
1.1.1	Lorsqu'une seule porteuse parmi 16 est utilisée.	1
1.1.2	Lorsque deux porteuses parmi 16 sont utilisées	2
1.1.3	Lorsque les 8 porteuses centrales sont utilisées.	3
1.2	Réception sans canal	3
2	Implantation de la chaine de transmission OFDM avec canal multi- trajets, sans bruit	4
2.1	Implantation sans intervalle de garde	4
2.1.1	Détermination du nombre N de porteuses de 20% a 25%	4
2.1.2	la réponse en fréquence (module et phase) du canal de propagation.	5
2.1.3	Le passage du signal OFDM dans le canal de propagation multitrajets	5
2.1.4	Densité spectrale de puissance du signal avant et apres le passsage dans le canal.	6
2.1.5	Les constellations obtenues en réception sur deux porteuses sans IG	8
2.1.6	Détermination du TEB simulée	8
2.2	Implantation avec intervalle de garde composé de zéros	8
2.2.1	Les constellations obtenues en réception sur les deux porteuses avec IG	8
2.2.2	Détermination du TEB simulée	9
2.2.3	L'intérêt d'ajouter un intervalle de garde composé de zéros	9
2.3	Implantation avec préfixe cyclique	9
2.3.1	Les constellations obtenues en réception sur les deux porteuses avec Préfixe Cyclique	9
2.3.2	Détermination du TEB simulée	10
2.3.3	L'intérêt d'ajouter un préfixe cyclique	10
2.4	Implantation avec préfixe cyclique et égalisation	10
2.4.1	Les constellations obtenues en réception sur les deux porteuses . . .	11
2.4.2	Détermination du TEB simulée	12

3	Impact d'une erreur de synchronisation horloge	13
3.1	Suppression du préfixe cyclique, problème de synchronisation, cas 1.	14
3.2	Suppression du préfixe cyclique, problème de synchronisation, cas 2.	15
3.3	Suppression du prfixe cyclique, problème de synchronisation, cas 3.	16
	Conclusion	17

Table des figures

1.1	Utilisation de la porteuses 4	1
1.2	Utilisation des porteuses 5 et 6	2
1.3	Utilisation des 8 porteuses centrales	3
2.1	Your caption for the image.	5
2.2	le passage du signal OFDM dans le canal de propagation multitrajets. . . .	6
2.3	DSP avant et apres le passage dans le canal	7
2.4	3 ^{eme} Porteuse sans IG	8
2.5	15 ^{eme} Porteuse sans IG	8
2.6	3 ^{eme} Porteuse avec IG	9
2.7	15 ^{eme} Porteuse avec IG	9
2.8	3 ^{eme} Porteuse avec PC	10
2.9	15 ^{eme} Porteuse avec PC	10
2.10	3 ^{eme} Porteuse avec ML	11
2.11	15 ^{eme} Porteuse avec ML	11
2.12	3 ^{eme} Porteuse avec ZFE	12
2.13	15 ^{eme} Porteuse avec ZFE	12
3.1	Suppression du préfixe cyclique, synchronisation idéale.	13
3.2	3 ^{eme} porteuse dans cas 1	14
3.3	15 ^{eme} porteuse dans cas 1	14
3.4	3 ^{eme} porteuse dans cas 2	15
3.5	15 ^{eme} porteuse dans cas 2	15
3.6	3 ^{eme} porteuse dans cas 3	16
3.7	15 ^{eme} porteuse dans cas 3	16

Liste des sigles et acronymes

OFDM	<i>Orthogonal frequency-division multiplexing</i>
DSP	<i>Densité Spectrale de Puissance</i>
TEB	<i>Taux d'Erreur Binaire</i>
PC	<i>Préfixe Cyclique</i>
IG	<i>Intervalle de Garde</i>
ZFE	<i>Zero Forcing Equalizer</i>
ML	<i>Maximum Likelihood</i>

Exercise 1

Implantation de la chaine de transmission OFDM sans canal

1.1 Emission

On implantera la génération du signal OFDM , on visualisera sa Densité Spectrale de Puissance et on expliquera, à chaque fois, la forme obtenue pour la DSP

1.1.1 Lorsqu'une seule porteuse parmi 16 est utilisée.

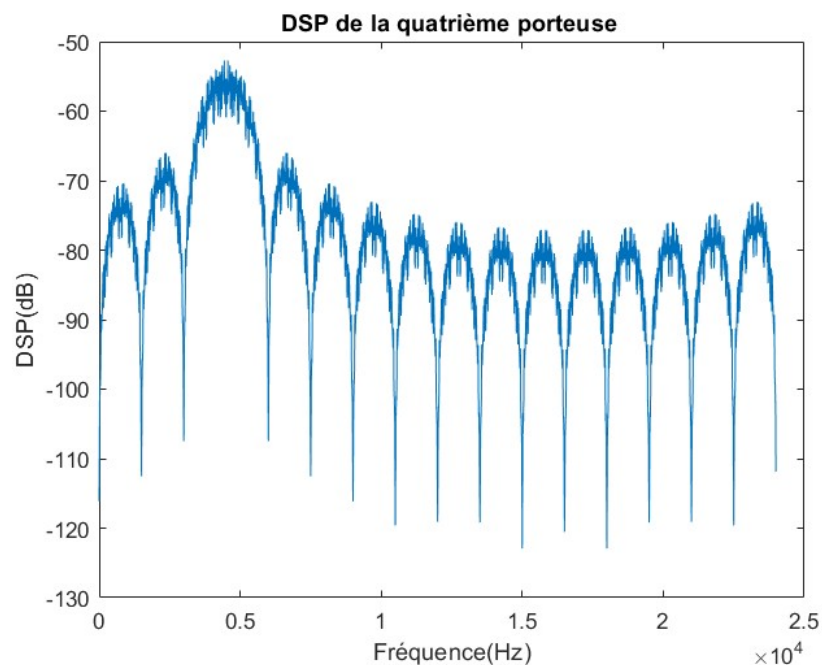


FIGURE 1.1 – Utilisation de la porteuses 4

Exercise 1. Implantation de la chaîne de transmission OFDM sans canal

On remarque que pour la porteuse sélectionné (4) le signal DSP est plus élevé que pour les autres

1.1.2 Lorsque deux porteuses parmi 16 sont utilisées

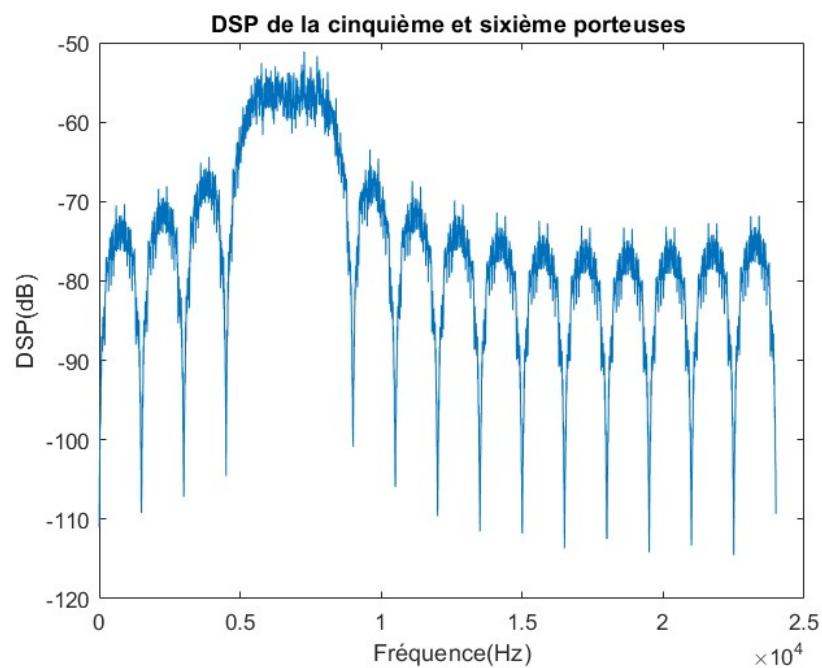


FIGURE 1.2 – Utilisation des porteuses 5 et 6

On note que pour les portesues sélectionné (5 et 6) la DSP est plus élevé que pour les autres Porteuses

1.2. Réception sans canal

1.1.3 Lorsque les 8 porteuses centrales sont utilisées.

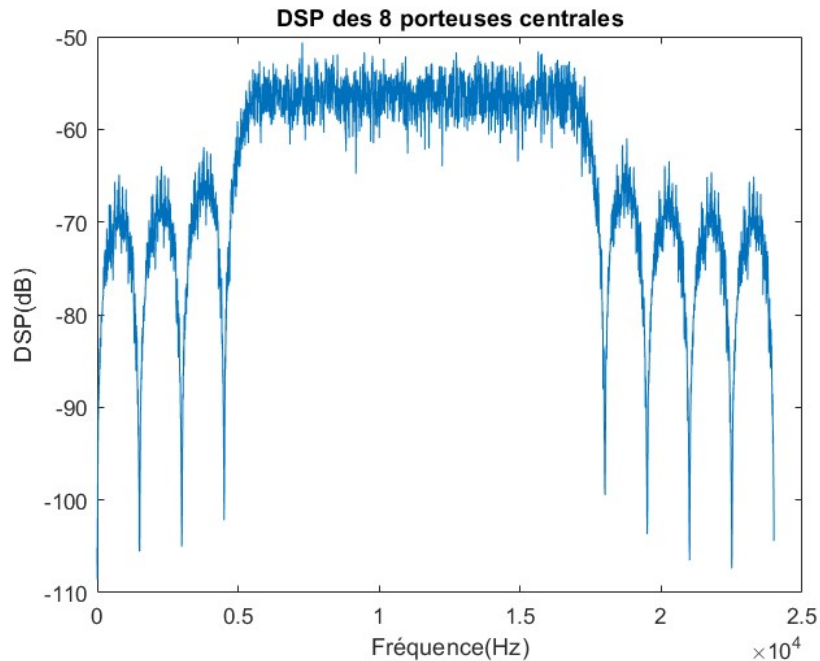


FIGURE 1.3 – Utilisation des 8 porteuses centrales

On note que pour cette fois que les portueses centrales sélectionné (de 5 a 12 la DSP est plus élevé que pour les autres Porteuses

1.2 Réception sans canal

En utilisant toutes les porteuses lors de la génération du signal OFDM, implanter la démodulation pour revenir aux bits transmis et calculer le taux d'erreur binaire (TEB) simulé obtenu. On vérifiera sans canal que ce TEB est bien nul.

La simulation de la démodulation OFDM sur l'ensemble des porteuses a été effectuée avec succès. En l'absence d'effets de canal, le Taux d'Erreur Binaire (TEB) obtenu était nul, démontrant l'efficacité de la démodulation pour récupérer les données transmises. Ce résultat confirme la robustesse du système OFDM dans des conditions idéales de transmission, et constitue une base solide pour évaluer ses performances dans des environnements de canal plus complexes

Exercice 2

Implantation de la chaine de transmission OFDM avec canal multi-trajets, sans bruit

On introduira, dans la chaine précédente, le canal de propagation multi-trajets suivant :

$$y(t) = 0.227x(t) + 0.46x(t-T_s) + 0.688x(t-2T_s) + 0.46x(t-3T_s) + 0.227x(t-4T_s)$$

où $x(t)$ représente le signal à l'entrée du canal multi-trajets et $y(t)$ le signal à la sortie.

2.1 Implantation sans intervalle de garde

2.1.1 Détermination du nombre N de porteuses de 20% à 25%

Déterminer le nombre, N , de porteuses à utiliser ici de telle manière que la taille de l'intervalle de garde, puis du préfixe cyclique, qui seront ajoutés par la suite ne représente que 20 à 25% de la durée totale du symbole

Il faut que $IG \geq \tau_{max}$.

$$\text{Et } \tau_{max} = 4 * T_s \Rightarrow IG = 4 * T_s.$$

$$\text{La durée de OFDM} = N * T_s.$$

$$\text{Alors, pour 25 \% } IG = 0.25 * N * T_s$$

$$\text{Donc } 4 * T_s = 0.25 * N * T_s \Rightarrow N = 16.$$

$$\text{Et pour 20 \% } IG = 0.20 * N * T_s$$

$$4 * T_s = 0.20 * N * T_s \Rightarrow N = 20.$$

$$\text{Finalement } 16 \leq N \leq 20$$

2.1. Implantation sans intervalle de garde

2.1.2 la réponse en fréquence (module et phase) du canal de propagation.

Tracer la réponse en fréquence (module et phase) du canal de propagation.

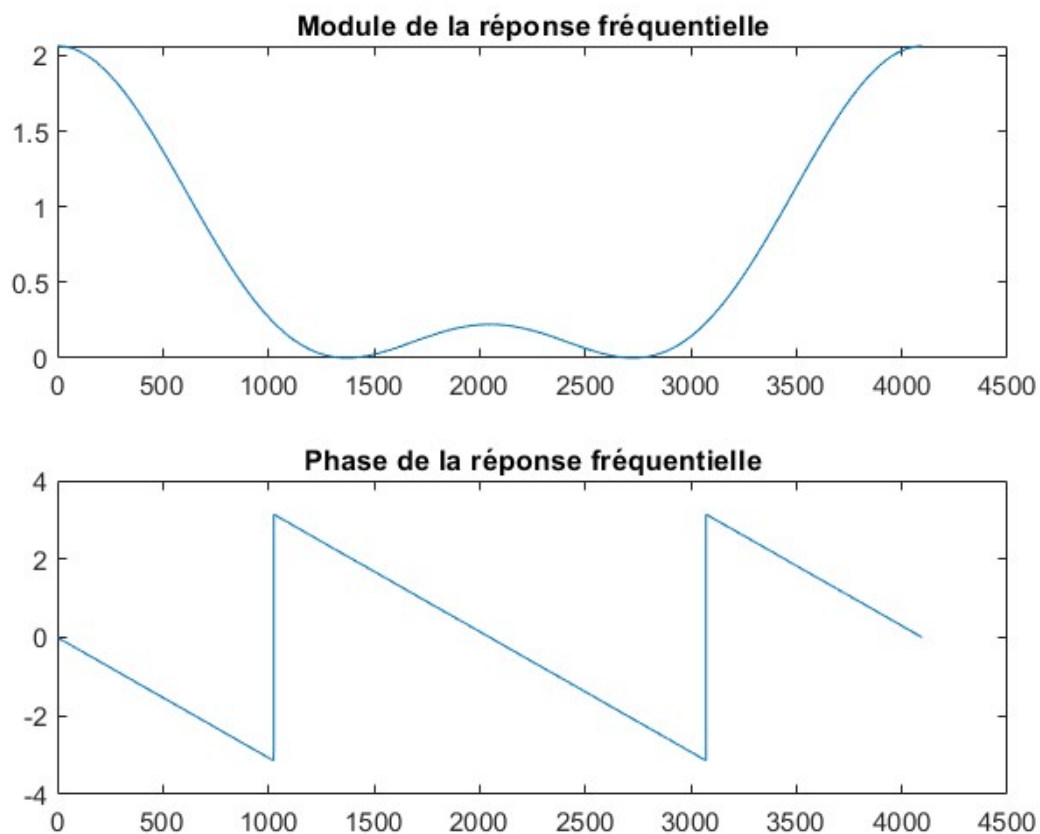


FIGURE 2.1 – Your caption for the image.

2.1.3 Le passage du signal OFDM dans le canal de propagation multitrajets

Implanter le passage du signal OFDM dans le canal de propagation multitrajets en utilisant la fonction filter de Matlab : $\text{SignalRecu} = \text{filter}(h, 1, \text{SignalOFDM})$;

Exercice 2. Implantation de la chaine de transmission OFDM avec canal multi- trajets, sans bruit

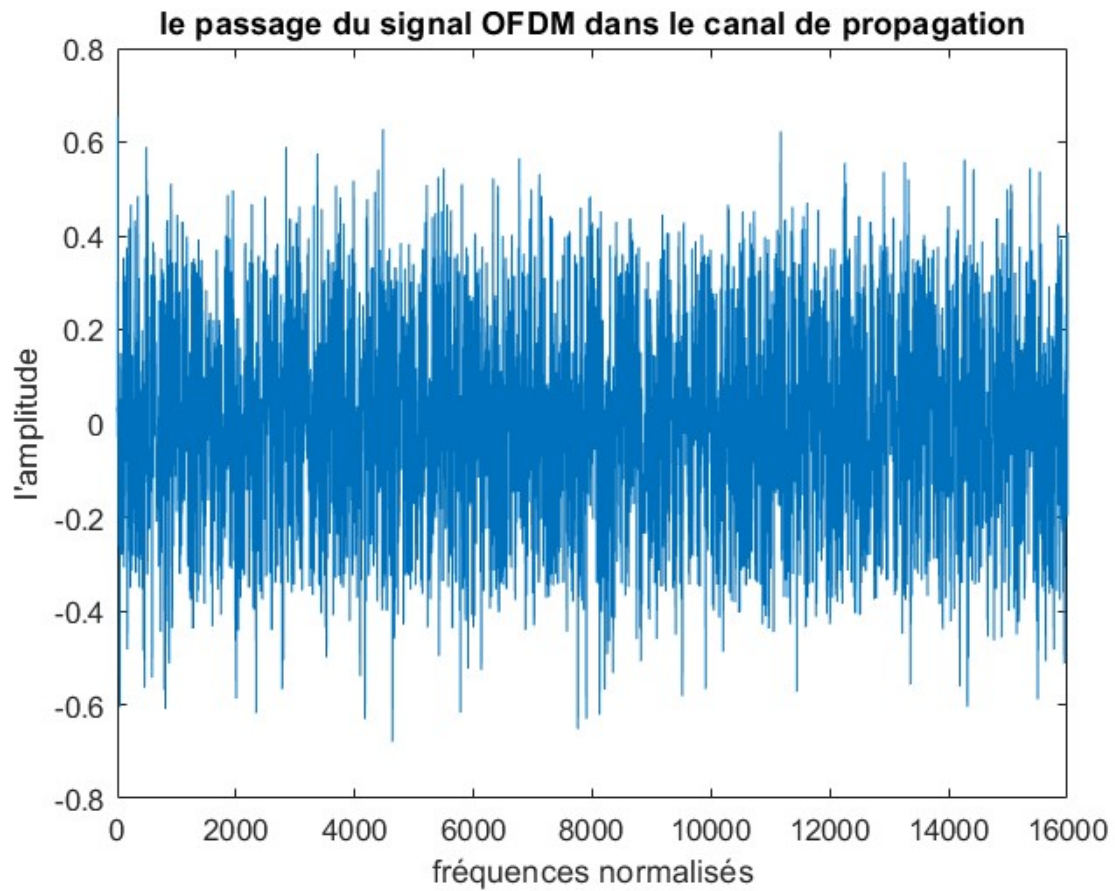


FIGURE 2.2 – le passage du signal OFDM dans le canal de propagation multitrajets.

2.1.4 Densité spectrale de puissance du signal avant et apres le passage dans le canal.

Visualiser la densité spectrale de puissance du signal en sortie du canal et la comparer à celle obtenue avant passage dans le canal.

2.1. Implantation sans intervalle de garde

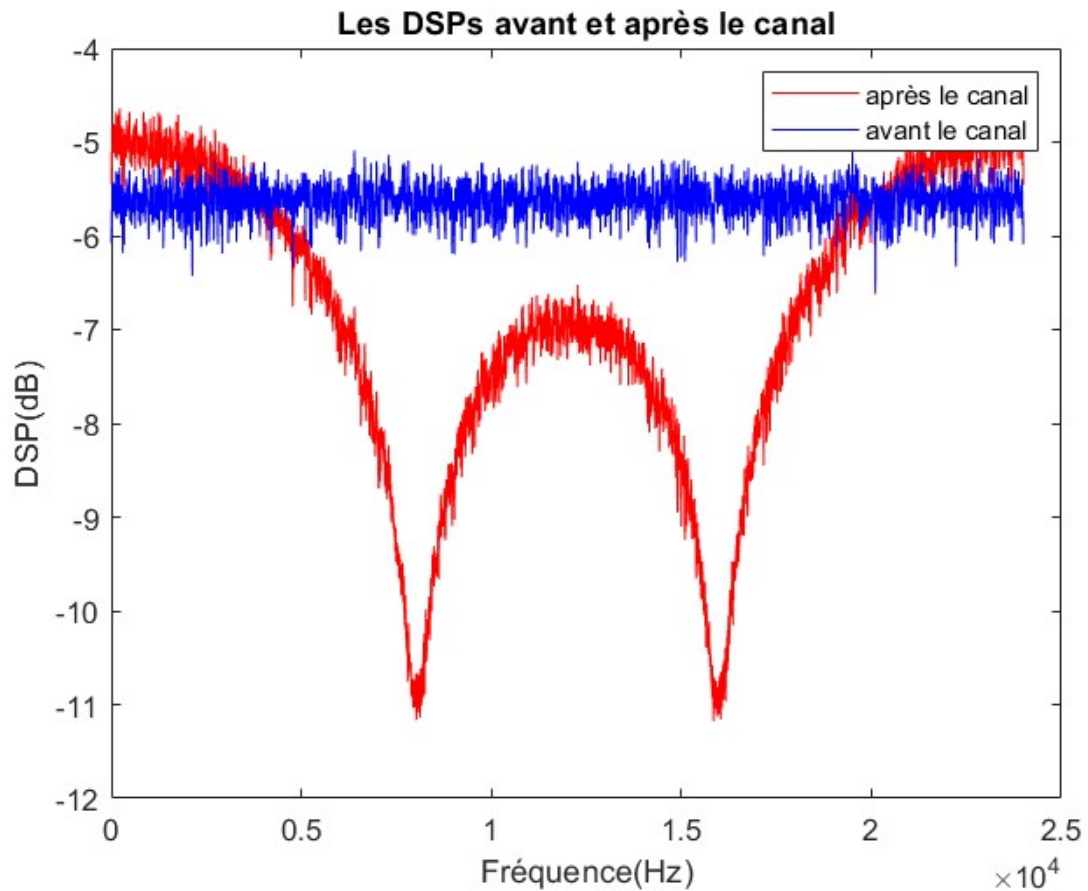


FIGURE 2.3 – DSP avant et après le passage dans le canal .

Après passer à travers le canal, le signal change de forme pour ressembler davantage au module de la réponse en fréquence. En conséquence, la densité spectrale de puissance du signal après le canal est plus faible que celle du signal avant la transmission dans le canal.

Exercice 2. Implantation de la chaine de transmission OFDM avec canal multi- trajets, sans bruit

2.1.5 Les constellations obtenues en réception sur deux porteuses sans IG

Visualiser les constellations obtenues en réception sur deux porteuses et expliquer les résultats obtenus

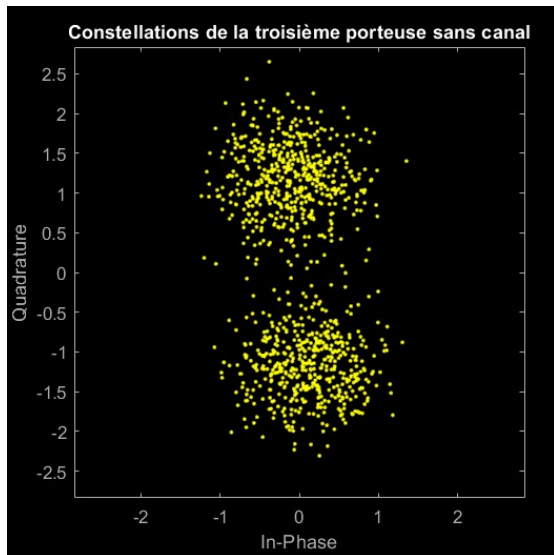


FIGURE 2.4 – 3^{ème} Porteuse sans IG

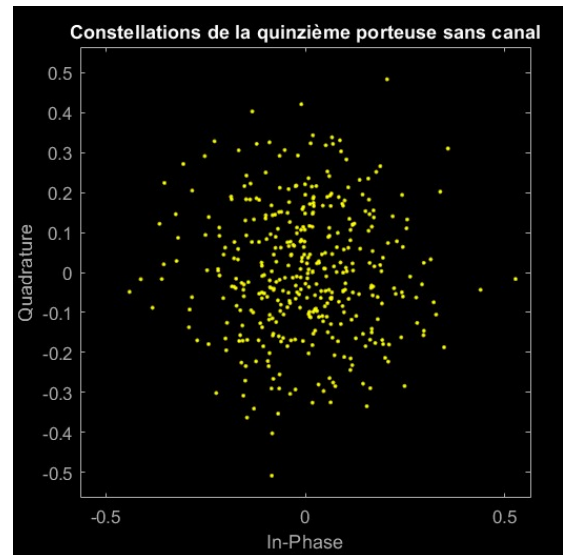


FIGURE 2.5 – 15^{ème} Porteuse sans IG

2.1.6 Détermination du TEB simulée

La présence de bruit et d'interférences induits par l'utilisation d'un canal à trajets multiples constitue une justification tangible de la persistance d'un Taux d'Erreur Binaire non nul.

2.2 Implantation avec intervalle de garde composé de zéros

Ajouter un intervalle de garde composé de zéros devant chaque symbole OFDM transmis avant passage dans le canal de propagation puis :

2.2.1 Les constellations obtenues en réception sur les deux porteuses avec IG

Tracer les constellations obtenues sur les mêmes porteuses que précédemment et expliquer les résultats obtenus.

2.3. Implantation avec préfixe cyclique

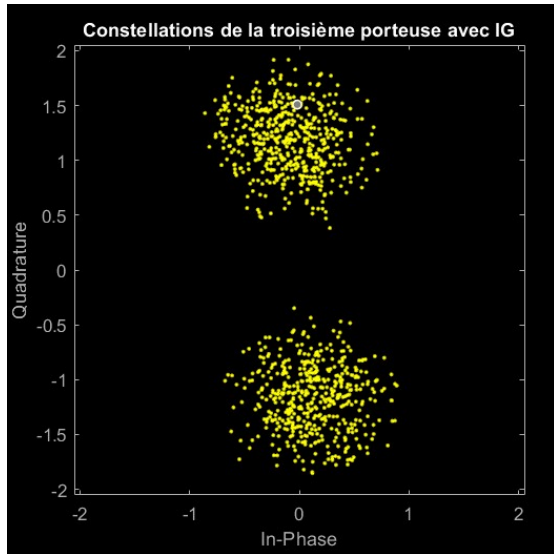


FIGURE 2.6 – 3^{ème} Porteuse avec IG

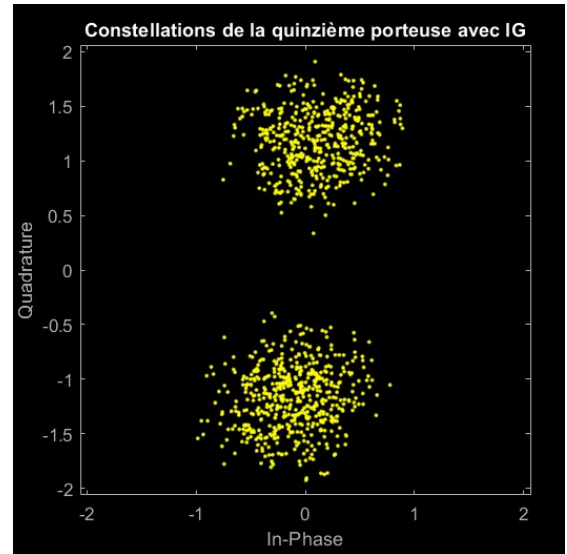


FIGURE 2.7 – 15^{ème} Porteuse avec IG

2.2.2 Détermination du TEB simulée

Même en ajoutant des intervalles de garde pour réduire les interférences dans un canal à trajets multiples, il est possible de maintenir un Taux d'Erreur Binaire (TEB) non nul.

2.2.3 L'intérêt d'ajouter un intervalle de garde composé de zéros

Quel est l'intérêt d'ajouter un intervalle de garde composé de zéros devant chaque symbole OFDM ?

L'ajout d'un intervalle de garde composé de zéros avant chaque symbole OFDM crée une marge temporelle, limitant l'interférence entre les symboles successifs. Cette technique réduit les erreurs de transmission en permettant au récepteur de mieux isoler et décoder chaque symbole, renforçant ainsi la fiabilité du système de communication OFDM.

2.3 Implantation avec préfixe cyclique

Ajouter un préfixe cyclique devant chaque symbole OFDM transmis avant passage dans le canal de propagation puis :

2.3.1 Les constellations obtenues en réception sur les deux porteuses avec Préfixe Cyclique

Tracer les constellations obtenues sur les mêmes porteuses que précédemment et expliquer les résultats obtenus.

Exercice 2. Implantation de la chaine de transmission OFDM avec canal multi- trajets, sans bruit

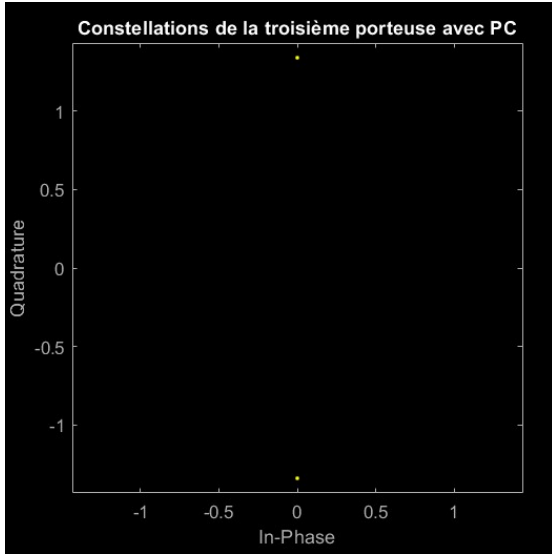


FIGURE 2.8 – 3^{eme} Porteuse avec PC

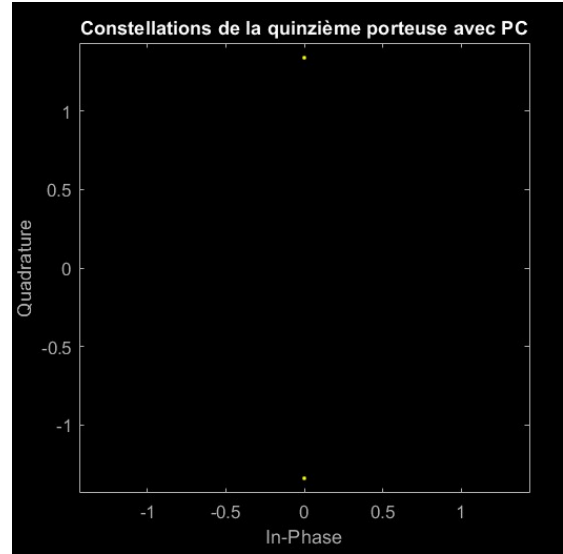


FIGURE 2.9 – 15^{eme} Porteuse avec PC

2.3.2 Détermination du TEB simulée

L'ajout du préfixe cyclique dans l'OFDM réduit le Taux d'Erreur Binaire (TEB) en minimisant l'interférence inter-symbole, mais il ne garantit pas un TEB nul. Il améliore la robustesse du système et diminue les erreurs, mais d'autres facteurs tels que le bruit ou des conditions de canal défavorables peuvent encore occasionner des erreurs de transmission, maintenant ainsi un TEB non nul, bien qu'il soit réduit

2.3.3 L'intérêt d'ajouter un préfixe cyclique

Quel est l'intérêt d'ajouter un préfixe cyclique devant chaque symbole OFDM ?

Le préfixe cyclique dans l'OFDM prévient les interférences entre les symboles en créant une marge de sécurité temporelle. Cela permet au récepteur de mieux séparer les symboles, réduisant ainsi les erreurs de transmission et améliorant la fiabilité du système de communication.

2.4 Implantation avec préfixe cyclique et égalisation

En considérant que le canal est connu du récepteur, on ajoutera à la chaine précédente un égaliseur. Deux égaliseurs seront à tester : - Un égaliseur de type ZFE (Zero Forcing Equalizer), de réponse en fréquences -Un égaliseur de type ML (Maximum Likelihood) , de réponse en fréquences

2.4. Implantation avec préfixe cyclique et égalisation

Dans chaque cas, tracer, après égalisation, les constellations obtenues sur les mêmes porteuses que précédemment et déterminer le TEB simulé. Expliquer les résultats obtenus. Voyez-vous une différence entre les résultats obtenus pour les deux égalisations proposées ? Dans quel contexte pourrait-on trouver un intérêt à utiliser l'un ou l'autre des égaliseurs ?

2.4.1 Les constellations obtenues en réception sur les deux porteuses

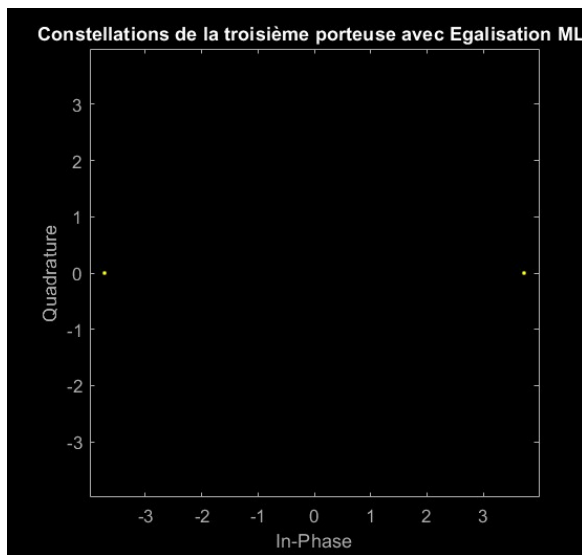


FIGURE 2.10 – 3^{ème} Porteuse avec ML

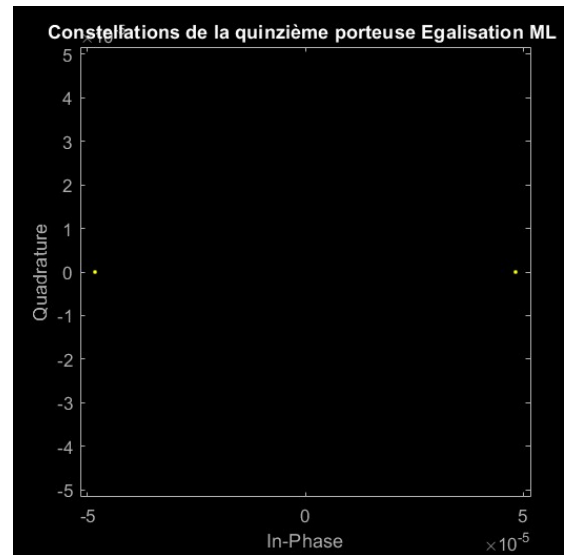


FIGURE 2.11 – 15^{ème} Porteuse avec ML

Exercice 2. Implantation de la chaine de transmission OFDM avec canal multi- trajets, sans bruit

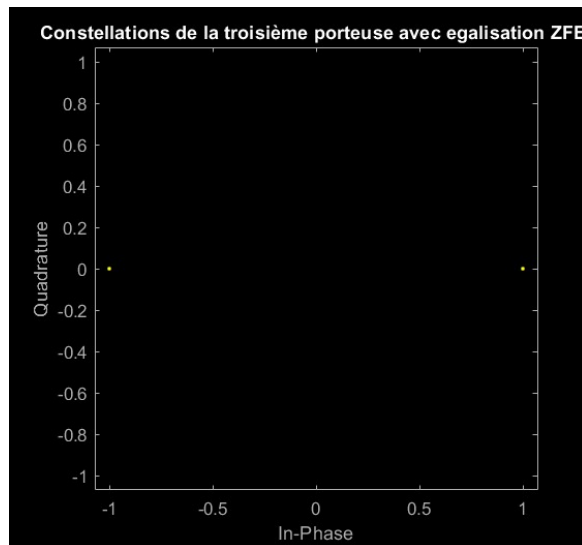


FIGURE 2.12 – 3^{eme} Porteuse avec ZFE

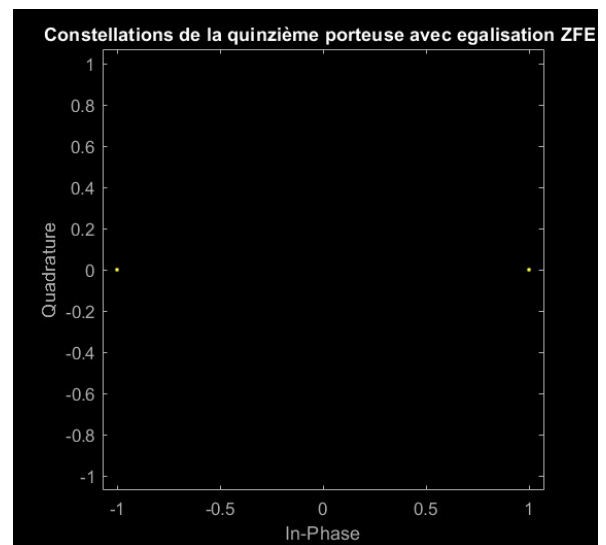


FIGURE 2.13 – 15^{eme} Porteuse avec ZFE

Les égalisations ZF et ML en OFDM rétablissent le signal reçu à sa forme initiale, éliminant les erreurs et les interférences induites par la transmission. Cette restauration précise permet de récupérer les données émises sans compromettre leur intégrité, assurant ainsi une transmission fiable et sans erreur malgré les perturbations du canal de communication

2.4.2 Détermination du TEB simulée

Après égalisation on retrouve un TER nul car on a compensé les effets du canal (rotation, décalage, etc.)

Exercise 3

Impact d'une erreur de synchronisation horloge

On va s'intéresser ici à l'impact d'une erreur de synchronisation horloge (on parle aussi de désalignement de la fenêtre de la FFT). Dans la partie implantation de la transmission avec préfixe cyclique, on a supposé que l'on était capable, en réception, de supprimer parfaitement l'interférence inter blocs (inter symboles OFDM) en alignant correctement la fenêtre de la FFT. Ce cas de figure est représenté dans la figure, avec un préfixe cyclique (PC) surdimensionné, c'est-à-dire plus long que l'étalement des retards introduits par le canal, noté τ_{max} .

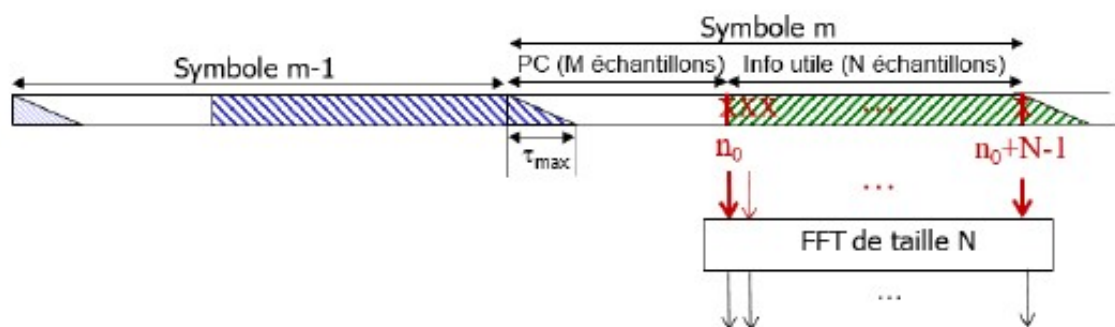


FIGURE 3.1 – Suppression du préfixe cyclique, synchronisation idéale.

Afin d'observer ce qui se passe en présence d'une erreur de synchronisation horloge, on commencera par reprendre la chaîne construite avec préfixe cyclique pour en doubler la taille (surdimensionnement du préfixe cyclique). À partir de là il s'agira de simuler les 3 cas d'erreurs présentés dans les figures 3, 4 et 5, en supposant, pour simplifier, que le retard ou les avances simulés, τ_i , sont un nombre entier d'échantillons. En observant les constellations sur deux porteuses un peu éloignées dans l'espace fréquentiel, on vérifiera

Exercice 3. Impact d'une erreur de synchronisation horloge

tout d'abord qu'il n'y a que dans le cas 2 que l'erreur de synchronisation n'introduit pas d'interférences. On expliquera pourquoi et pourquoi les interférences restent présentes dans les cas 1 et 3. En se plaçant dans le cas 2, on observera les constellations sur les deux mêmes porteuses que précédemment pour différentes valeurs du retard τ .

3.1 Suppression du préfixe cyclique, problème de synchronisation, cas 1.

Que constatez-vous ? Quelle(s) opération(s) faut-il effectuer dans le récepteur pour retrouver les mêmes performances que dans le cas de la synchronisation idéale.

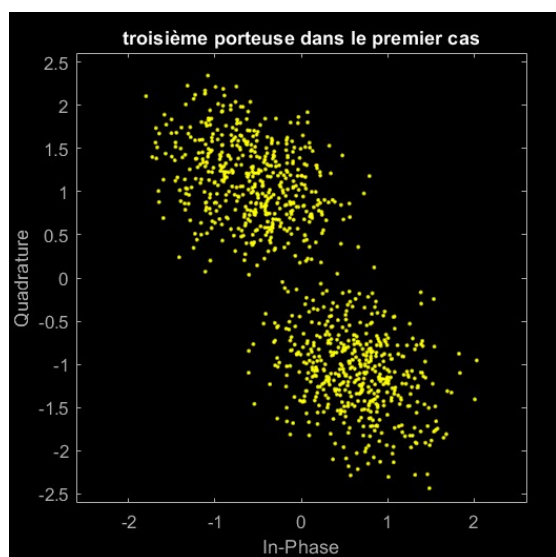
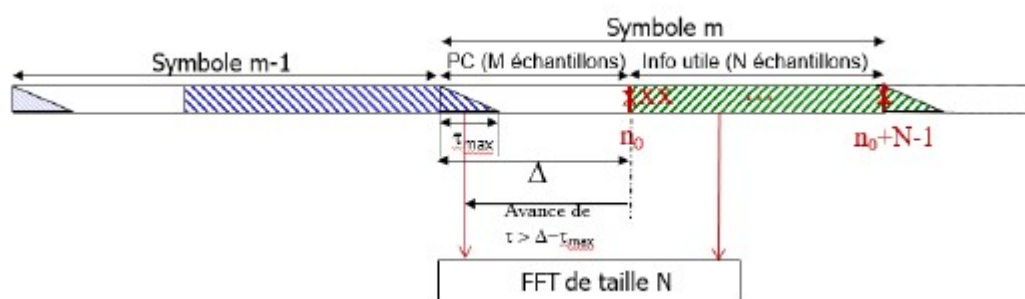


FIGURE 3.2 – 3^{ème} porteuse dans cas 1

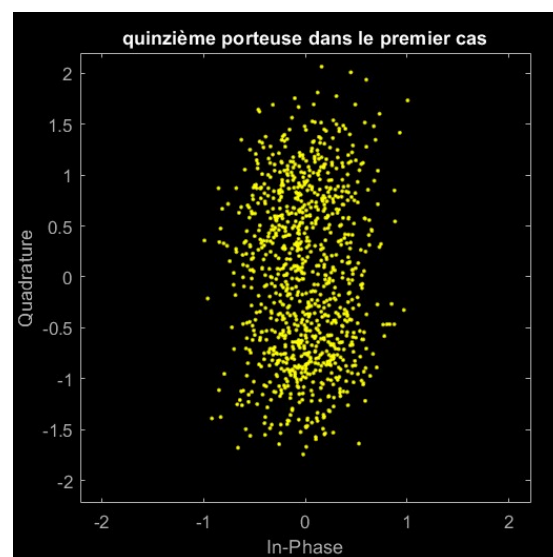


FIGURE 3.3 – 15^{ème} porteuse dans cas 1

Les interférences inter-symboles distincts entraînent un taux d'erreur binaire élevé, impactant la précision de manière significative.

3.2. Suppression du préfixe cyclique, problème de synchronisation, cas 2.

3.2 Suppression du préfixe cyclique, problème de synchronisation, cas 2.

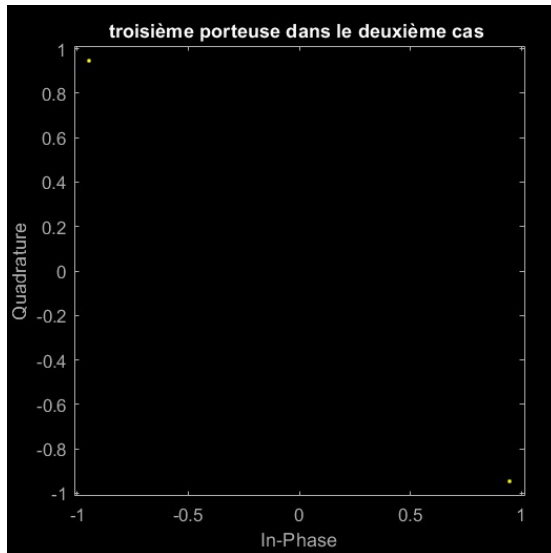
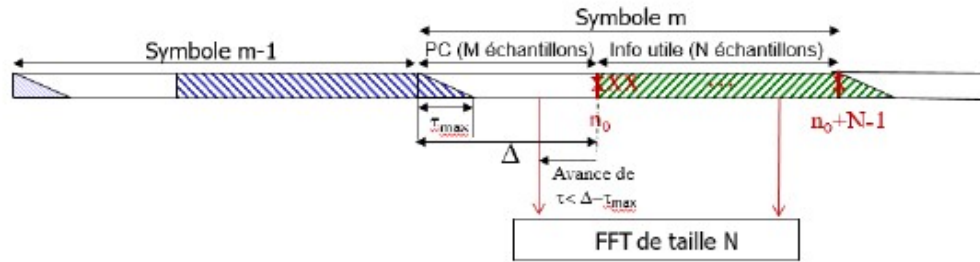


FIGURE 3.4 – 3^{eme} porteuse dans cas 2

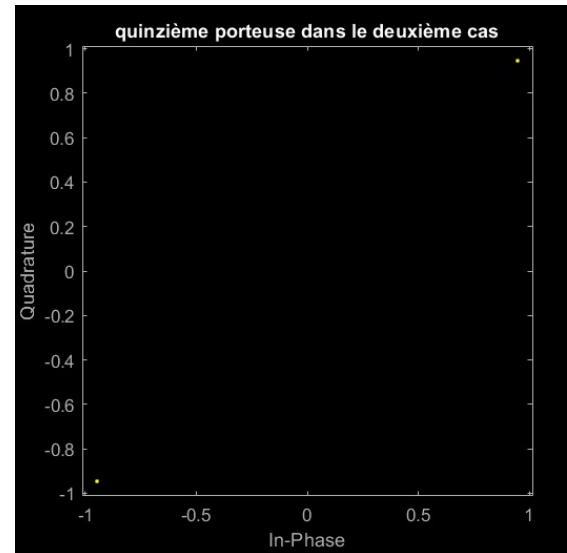


FIGURE 3.5 – 15^{eme} porteuse dans cas 2

Outre les interférences persistantes, la perte d'information aggrave le taux d'erreur binaire élevé observé. Cette double problématique combinant interférences et pertes d'informations contribue significativement à l'élévation du TEB.

3.3 Suppression du prfixe cyclique, problème de synchronisation, cas 3.

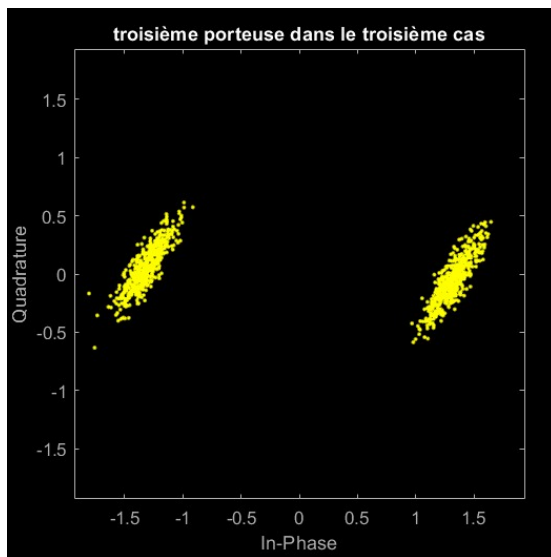
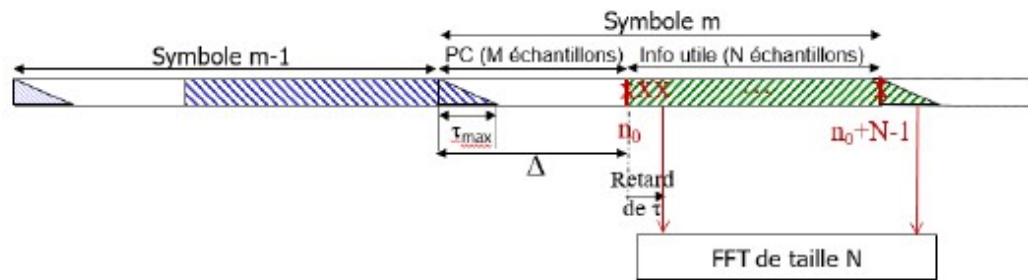


FIGURE 3.6 – 3^{eme} porteuse dans cas 3

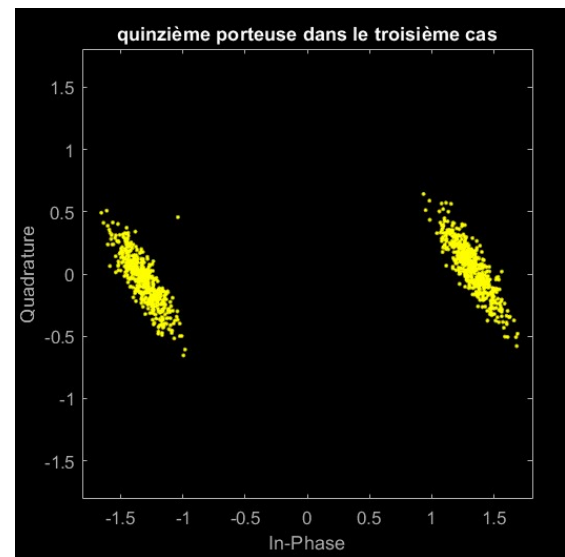


FIGURE 3.7 – 15^{eme} porteuse dans cas 3

Les interférences au intra-symboles sont observées, expliquant en partie le taux d'erreur binaire élevé. Cependant, une extraction sélective de l'information cruciale permet de contenir relativement le TEB malgré ces perturbations internes, préservant ainsi la qualité de la transmission

Conclusion

L'OFDM, une modulation multiporteuse largement adoptée dans les communications filaires et sans fil, offre des performances remarquables tout en limitant la complexité. La gestion des interférences inter-symboles est assurée par deux méthodes principales : le préfixe cyclique, qui copie les derniers échantillons en tête de chaque bloc, et le bourrage de zéros, consistant à insérer des zéros au début des blocs. Ces approches contribuent à minimiser les interférences et à garantir une transmission fiable des données sur le canal de communication.