

# BE OFDM

## Deuxième année Département Sciences du Numérique Options Télécommunications et Réseaux

2024 – 2025

### 1 Introduction

Ce BE sera effectué sous Matlab et a pour objectif que vous soyez capable d'implanter une chaîne de transmission OFDM dans un contexte de canal sélectif en fréquences et d'analyser les résultats obtenus. Il donnera lieu à une note sur la base des codes réalisés et d'un rapport qui devra contenir les tracés demandés et les explications associées. Les codes Matlab et le rapport, au format pdf, devront être déposés sur moodle, dans l'espace prévu pour votre groupe de TP, au plus tard le 20/12/2024.

### 2 Implantation de la chaîne de transmission OFDM sans canal

La chaîne de transmission OFDM devra, dans un premier temps, être implantée sans canal afin de vérifier son bon fonctionnement. Le nombre de porteuses,  $N$ , pourra être choisi égal à 16. Afin de simplifier les simulations, on considérera un mapping BPSK sur chaque porteuse. La durée d'un symbole OFDM sera de  $NT_s$ , si  $T_s$  représente la durée symbole que l'on aurait en monoporteuse et donc la période d'échantillonnage de l'implantation à réaliser ici.

#### 2.1 Emission

On implantera la génération du signal OFDM (en utilisant la fonction *ifft.m* de Matlab), on visualisera sa Densité Spectrale de Puissance (DSP) et on expliquera, à chaque fois, la forme obtenue pour la DSP (en se référant à son expression théorique, qui devra être donnée dans le rapport) :

1. Lorsqu'une seule porteuse parmi 16 est utilisée. Les autres seront mises à zéro.
2. Lorsque deux porteuses parmi 16 sont utilisées. Les autres seront mises à zéro.
3. Lorsque les 8 porteuses centrales sont utilisées. Les autres seront mises à zéro : 4 sur le bord gauche du spectre, 4 sur le bord droit.

#### 2.2 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.

### 3 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 (un des canaux test de Proakis, échantillonné à  $T_s$ ) :

$$y(t) = 0.407x(t) + 0.815x(t - T_s) + 0.407x(t - 2T_s)$$

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

#### 3.1 Implantation sans intervalle de garde

1. Déterminer les expressions théoriques de la réponse impulsionnelle et de la réponse en fréquence du canal de propagation.
2. Tracer, sous Matlab, le module et la phase de la réponse en fréquence du canal de propagation.
3. En conservant  $N = 16$  porteuse pour générer le signal OFDM, implanter le passage du signal OFDM dans le canal de propagation multitrajets. On pourra utiliser la fonction *filter* de Matlab : *SignalSortieCanal=filter(h,1,SignalOFDM)* ;, où  $h$  représente la réponse impulsionnelle numérique du canal de propagation considéré échantillonné à  $T_s$ .
4. Visualiser la densité spectrale de puissance du signal en sortie du canal et la comparer à celle obtenue avant passage dans le canal. Le résultat obtenu est-il conforme à ce qui était attendu ?
5. Visualiser les constellations obtenues en réception sur les porteuses numéros 6 et 15 et expliquer les résultats obtenus.
6. Déterminer le TEB simulé et expliquer le résultat obtenu (nul ou non nul et pourquoi).

#### 3.2 Implantation avec intervalle de garde composé de zéros

Dans cette partie, nous allons ajouter un intervalle de garde composé de zéros devant chaque symbole OFDM transmis avant passage dans le canal de propagation.

1. Quelle est la longueur minimale de l'intervalle de garde à introduire ? Expliquez votre réponse.
2. On introduira un intervalle de garde de longueur minimale et on conservera un nombre de porteuse  $N = 16$ .
  - Quel sera la valeur de l'interférence entre symbole sur chaque porteuse ?
  - Quel est le prix à payer du fait de l'introduction de cet intervalle de garde (coût de cet IG) ?
3. Tracez les constellations obtenues sur les porteuses 6 et 15 et expliquez les résultats obtenus.
4. Déterminez le TEB simulé et expliquez le résultat obtenu (nul ou non nul et pourquoi).
5. Quel est l'intérêt d'ajouter un intervalle de garde composé de zéros devant chaque symbole OFDM ?

#### 3.3 Implantation avec préfixe cyclique

On ajoutera maintenant un préfixe cyclique devant chaque symbole OFDM transmis avant passage dans le canal de propagation.

1. Tracez les constellations obtenues sur les porteuses 6 et 15 et expliquez les résultats obtenus.
2. Déterminer le TEB simulé et expliquez le résultat obtenu (nul ou non nul et pourquoi).
3. Quel est l'intérêt d'ajouter un préfixe cyclique devant chaque symbole OFDM ?

### 3.4 Implantation avec préfixe cyclique et égalisation

En considérant que le canal est connu du récepteur, on ajoutera à la chaine précédente (avec préfixe cyclique) un égaliseur. Deux égaliseurs seront à tester :

- Un égaliseur de type ZFE (Zero Forcing Equalizer), de réponse en fréquences

$$H = [H(0)H(1)\dots H(N-1)], \text{ avec } H(k) = 1/C(k) \text{ pour } k = 0 \text{ à } N-1$$

- Un égaliseur de type ML (Maximum Likelihood) , de réponse en fréquences

$$H = [H(0)H(1)\dots H(N-1)], \text{ avec } H(k) = C^*(k) \text{ pour } k = 0 \text{ à } N-1$$

où  $C(k)$  est le coefficient représentant l'impact du canal de transmission sur la  $k^{\text{ième}}$  porteuse et  $N$  le nombre de porteuses utilisées. La figure 1 présente la chaine complète avec égalisation.

Dans chaque cas, tracez, après égalisation, les constellations obtenues sur les porteuses 6 et 15 et déterminez le TEB simulé. Expliquez 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 ?

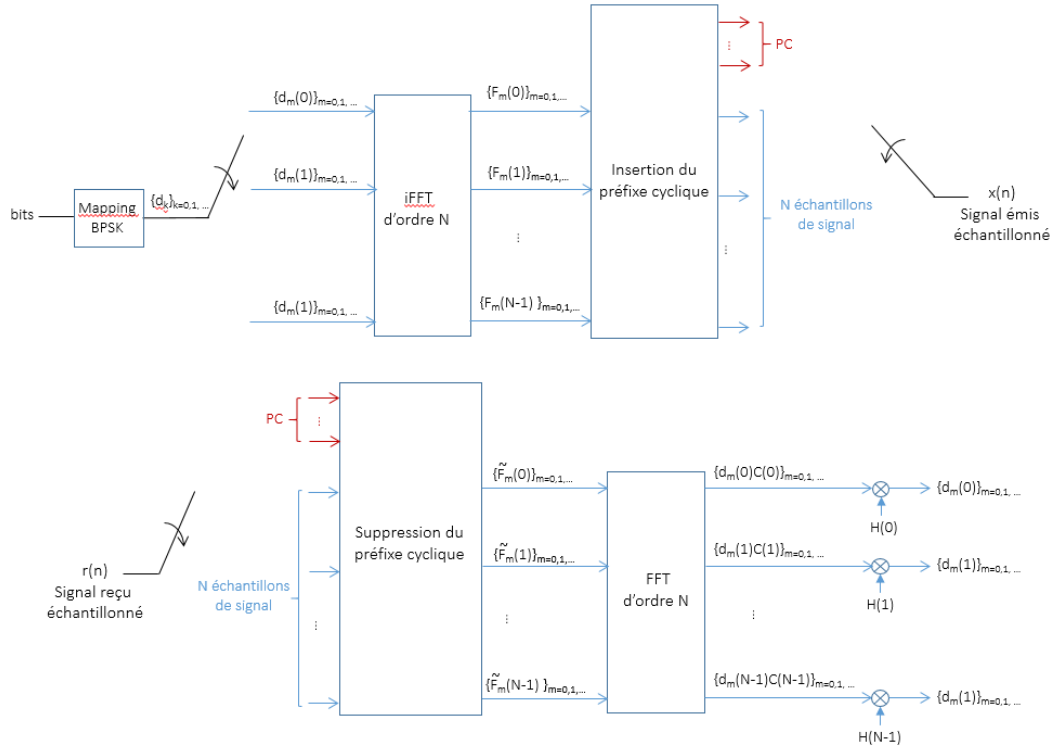


FIGURE 1 – Chaine de transmission OFDM sans bruit.

## 4 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 2, avec un préfixe cyclique (PC) surdimensionné, c'est-à-dire plus long que l'étalement des retards introduits par le canal, noté  $\tau_{max}$ .

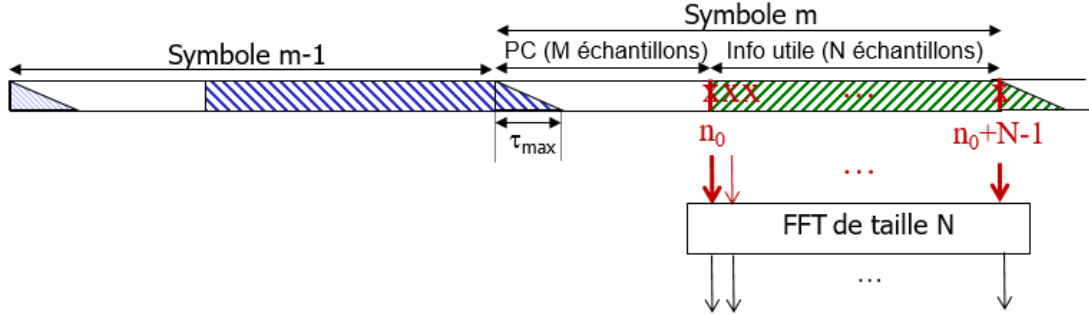


FIGURE 2 – Suppression du préfixe cyclique, synchronisation idéale.

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 tripler la taille (surdimensionnement du préfixe cyclique). A 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,  $\tau$ , sont un nombre entier d'échantillons.

En observant les constellations sur deux porteuses 6 et 15, on vérifiera tout d'abord qu'il n'y a que dans le cas 2 (figure 4) que l'erreur de synchronisation n'introduit pas d'interférences. On expliquera pourquoi et pourquoi les interférences restent présentes dans les cas 1 (figure 3) et 3 (figure 5).

En se plaçant dans le cas 2 (figure 4), on observera les constellations sur les deux mêmes porteuses que précédemment pour différentes valeurs du retard  $\tau$ . 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 2) ?

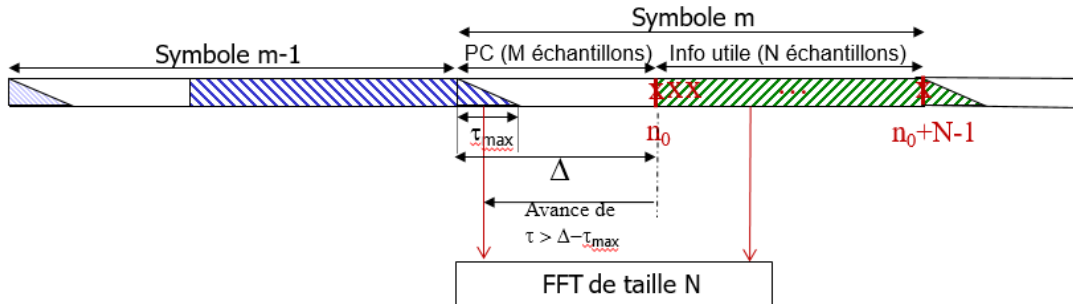


FIGURE 3 – Suppression du préfixe cyclique, problème de synchronisation, cas 1.

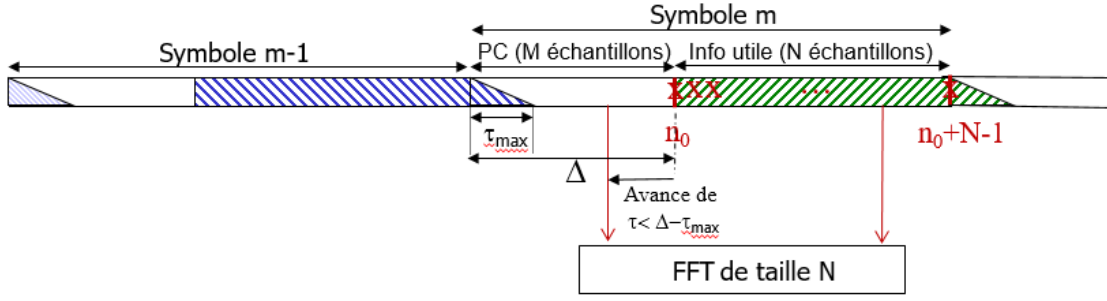


FIGURE 4 – Suppression du préfixe cyclique, problème de synchronisation, cas 2.

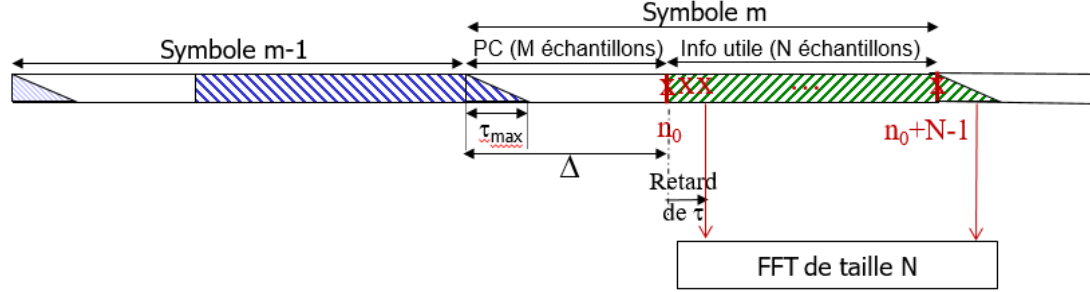


FIGURE 5 – Suppression du préfixe cyclique, problème de synchronisation, cas 3.

## 5 Implantation de la chaîne de transmission OFDM avec canal à bruit additif blanc et gaussien

A partir de la chaîne OFDM implantée avec préfixe cyclique et égalisation, modifiez le mapping pour passer en QPSK et on ajoutez un bruit blanc, gaussien et complexe à l'enveloppe complexe correspondant au signal OFDM à transmettre (canal AWGN). La puissance du bruit à ajouter sur chaque voie (phase et quadrature) est donnée par :

$$\sigma_I^2 = \sigma_Q^2 = \frac{P_{x_e}}{2 \log_2(M) \frac{E_b}{N_0}}$$

si  $P_{x_e}$  représente la puissance de l'enveloppe complexe du signal OFDM généré,  $M$  l'ordre de la modulation sur chaque porteuse et  $\frac{E_b}{N_0}$  le rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur. On remplira ici toutes les porteuses (pas de mises à zéro), sinon la puissance de bruit à ajouter devrait prendre en compte le nombre de porteuses totales sur le nombre de porteuses utiles. On tracera alors le taux d'erreur binaire obtenu en fonction de  $\frac{E_b}{N_0}$  et on vérifiera que l'on retrouve bien celui d'une modulation monoporteuse de type QPSK.