



# **Rapport du TP2 de Télécommunications : Transmission sur fréquence porteuse**

Tom Bonetto  
Mickaël Song

Département Sciences du Numérique - Première année  
2021-2022

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Définition de la chaîne passe-bas équivalente à une chaîne de transmission sur fréquence porteuse</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Utilisation de la chaîne passe-bas équivalente pour le calcul et l'estimation du taux d'erreur binaire</b>	<b>4</b>
3.1	Implantation de la chaîne sur fréquence porteuse . . . . .	4
3.1.1	Signaux générés sur les voies en phase et en quadrature ainsi que le signal transmis sur fréquence porteuse . . . . .	4
3.1.2	Estimation puis tracé de la DSP du signal modulé sur fréquence porteuse . . . . .	5
3.1.3	Comparaison du TEB simulé et du TEB théorique . . . . .	6
3.2	Implantation de la chaîne passe bas équivalente . . . . .	7
3.2.1	Signaux générés sur les voies en phase et en quadrature pour la chaîne passe-bas équivalente . . . . .	7
3.2.2	Estimation puis tracé de la DSP passe-bas équivalente et comparaison avec DPS fréquence porteuse . . . . .	8
3.2.3	Constellations et rapport signal à bruit . . . . .	8
3.2.4	Comparaison des TEBs simulés et du TEB théorique . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Comparaison de modulations sur fréquence porteuse</b>	<b>10</b>
4.1	Étude de chaque chaîne de transmission . . . . .	11
4.1.1	Constellations et rapport signal à bruit . . . . .	11
4.1.2	Ajout du bruit et comparaison TEB simulé et TEB théorique . . . . .	14
4.2	Comparaison des chaînes de transmission . . . . .	16

## Table des figures

1	Chaîne de transmission sur porteuse . . . . .	3
2	Chaîne de transmission passe-bas équivalente . . . . .	3
3	Voies en phase et en quadrature pour 2000 bits (plus visible) . . . . .	4
4	Signal transmis sur fréquence porteuse . . . . .	5
5	DSP du signal $F_p = 3kHz$ . . . . .	5
6	TEB simulé sur fréquence porteuse et TEB théorique . . . . .	6
7	Voies en phase et en quadrature pour 2000 bits (plus visible) . . . . .	7
8	Comparaison DSP fréquence porteuse et passe-bas équivalente . . . . .	8
9	Constellations en sortie du mapping et en sortie de l'échantillonneur pour 3 valeurs de $E_b/N_0$ et Nb-bits = 2000 . . . . .	9
10	Comparaison des TEBs des deux chaînes avec le TEB théorique et Nb-bits = 10k . . . . .	10
11	Constellations 4-ASK, pour 3 valeurs de $E_b/N_0$ et Nb-bits = 12000 . . . . .	11
12	Constellations QPSK, pour 3 valeurs de $E_b/N_0$ et Nb-bits = 12000 . . . . .	12
13	Constellations 8-PSK, pour 3 valeurs de $E_b/N_0$ et Nb-bits = 12000 . . . . .	13
14	Constellations 16-QAM, pour 3 valeurs de $E_b/N_0$ et Nb-bits = 12000 . . . . .	14
15	Comparaison des TEB simulés au TEB théorique pour les 4 chaînes . . . . .	15
16	Comparaison des TEBs pour les 4 chaînes . . . . .	16
17	Comparaison des DSPs pour les 4 chaînes et $R_b = 48$ kpbs . . . . .	17

# 1 Introduction

Objectifs de ce travail : Implanter une chaîne de transmission sur fréquence porteuse de type PSK ou QAM, d'éterminer puis implanter la chaîne de transmission passe-bas équivalente à une chaîne de transmission sur fréquence porteuse de type PSK ou QAM et comparer, en termes d'efficacité spectrale et d'efficacité en puissance, plusieurs chaînes de transmission sur fréquence porteuse en utilisant une implantation de type chaîne passe-bas équivalente.

## 2 Définition de la chaîne passe-bas équivalente à une chaîne de transmission sur fréquence porteuse

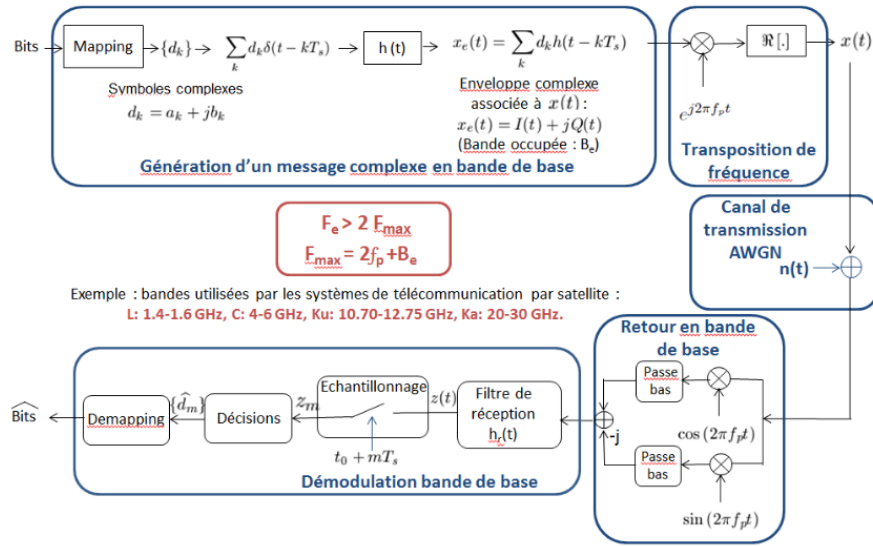


FIGURE 1 – Chaîne de transmission sur porteuse

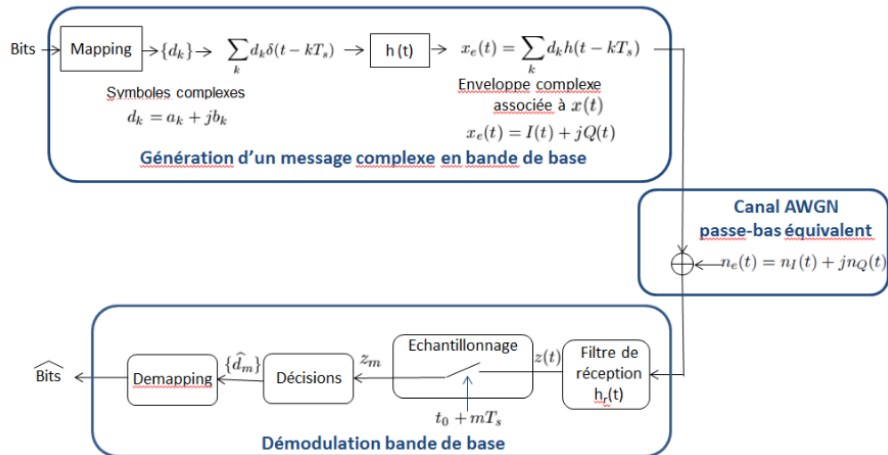


FIGURE 2 – Chaîne de transmission passe-bas équivalente

### 3 Utilisation de la chaîne passe-bas équivalente pour le calcul et l'estimation du taux d'erreur binaire

L'objectif de cette partie est de montrer que le taux d'erreur binaire obtenu pour une transmission est identique que l'on implante la chaîne de transmission sur fréquence porteuse ou bien la chaîne passe-bas équivalente. L'étude sera réalisée pour une transmission QPSK.

#### 3.1 Implantation de la chaîne sur fréquence porteuse

On implante, dans un premier temps, la chaîne de transmission QPSK sur fréquence porteuse, avec mapping de Gray, facteur de sur échantillonnage permettant de respecter la condition de Shannon, mise en forme en racine de cosinus sur élevé, canal AWGN et récepteur optimal (critère de Nyquist respecté, filtrage adapté, instants optimaux d'échantillonnage, d'électeur à seuil avec seuil optimaux).

##### 3.1.1 Signaux générés sur les voies en phase et en quadrature ainsi que le signal transmis sur fréquence porteuse

Fréquence d'échantillonnage  $F_e = 10$  kHz, débit binaire  $R_b = 2000$  bits par seconde

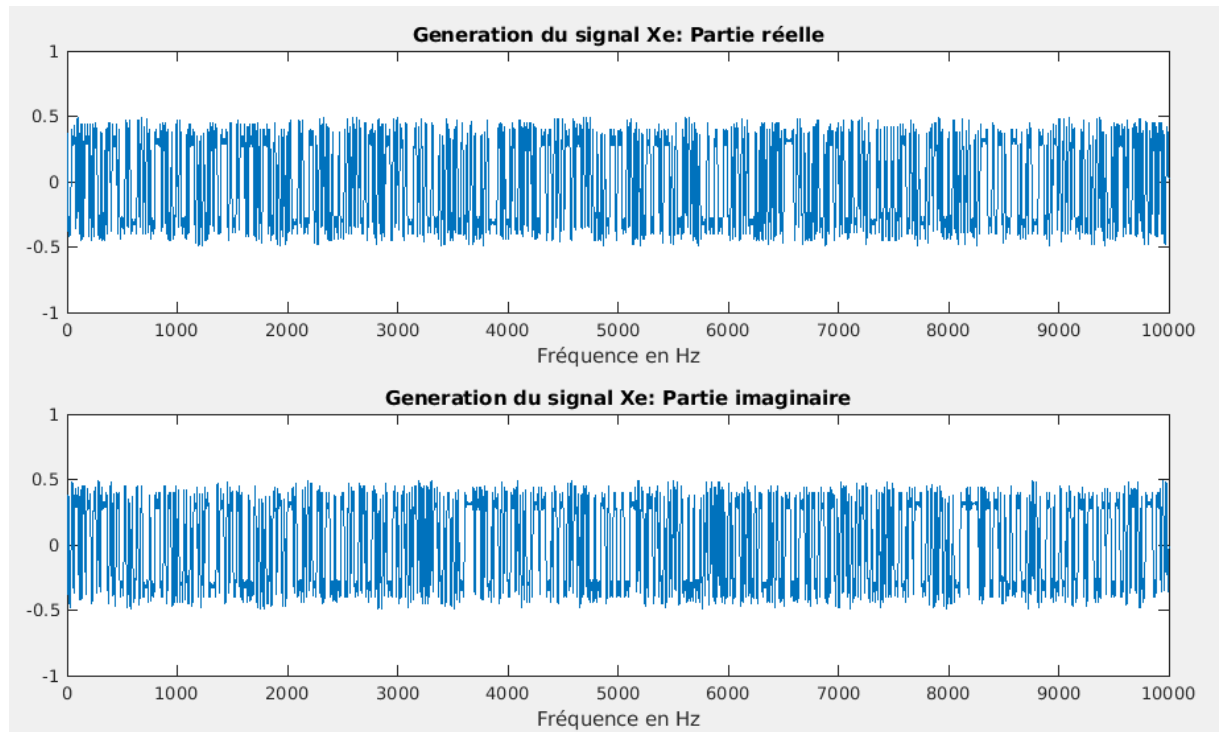


FIGURE 3 – Voies en phase et en quadrature pour 2000 bits (plus visible)

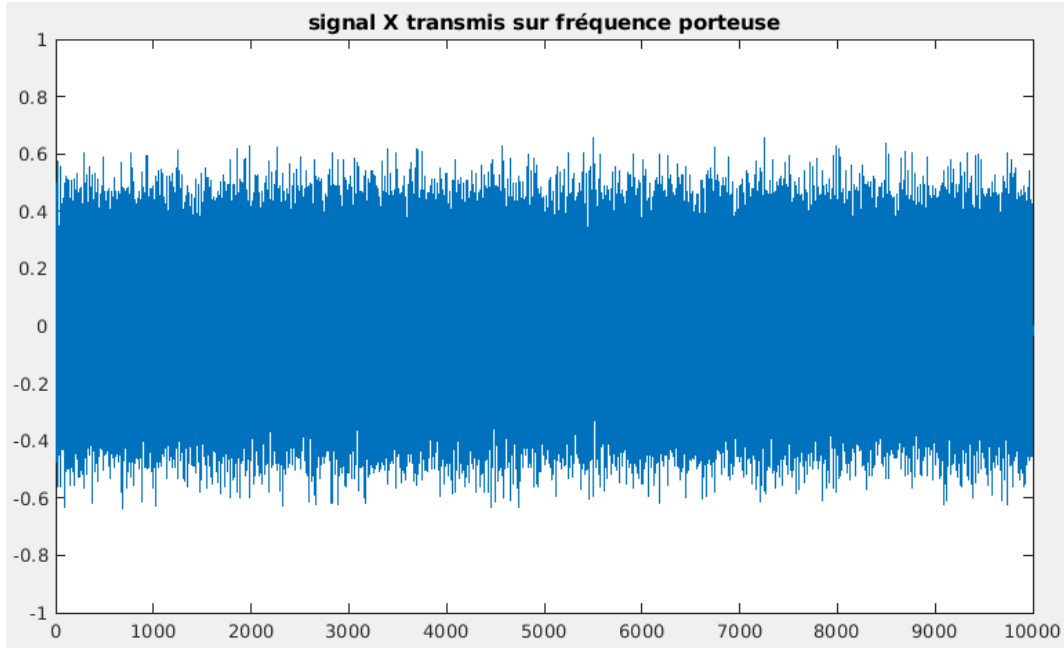


FIGURE 4 – Signal transmis sur fréquence porteuse

### 3.1.2 Estimation puis tracé de la DSP du signal modulé sur fréquence porteuse

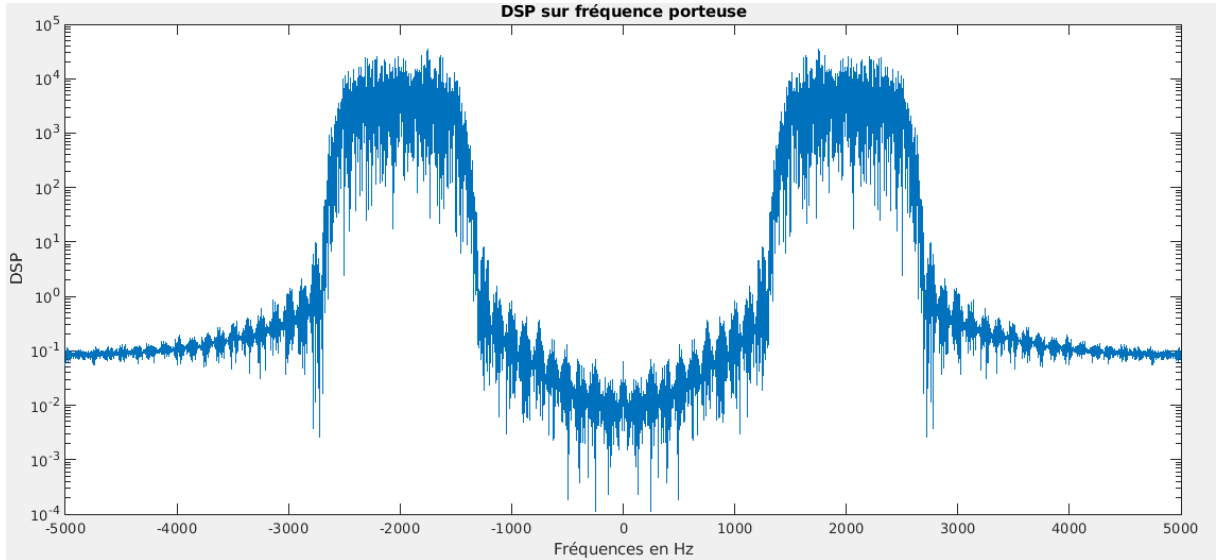


FIGURE 5 – DSP du signal  $F_p = 3kHz$

On vient de transposer un signal en bande de base, c'est à dire avec une DSP qui s'étend autour de la fréquence 0, après transposition, la forme de la DSP se retrouve donc centrée en  $F_p$  et  $-F_p$ , c'est ce qui correspond à la théorie.

### 3.1.3 Comparaison du TEB simulé et du TEB théorique

D'abord on implante la chaîne complète sans bruit pour vérifier que le TEB est bien nul (c'est le cas). Ensuite on rajoute le bruit et on trace le taux d'erreur obtenue en fonction du rapport signal à bruit par bits à l'entrée du récepteur, on prends des valeurs  $E_b/N_0$  allant de 0 à 6 dB.

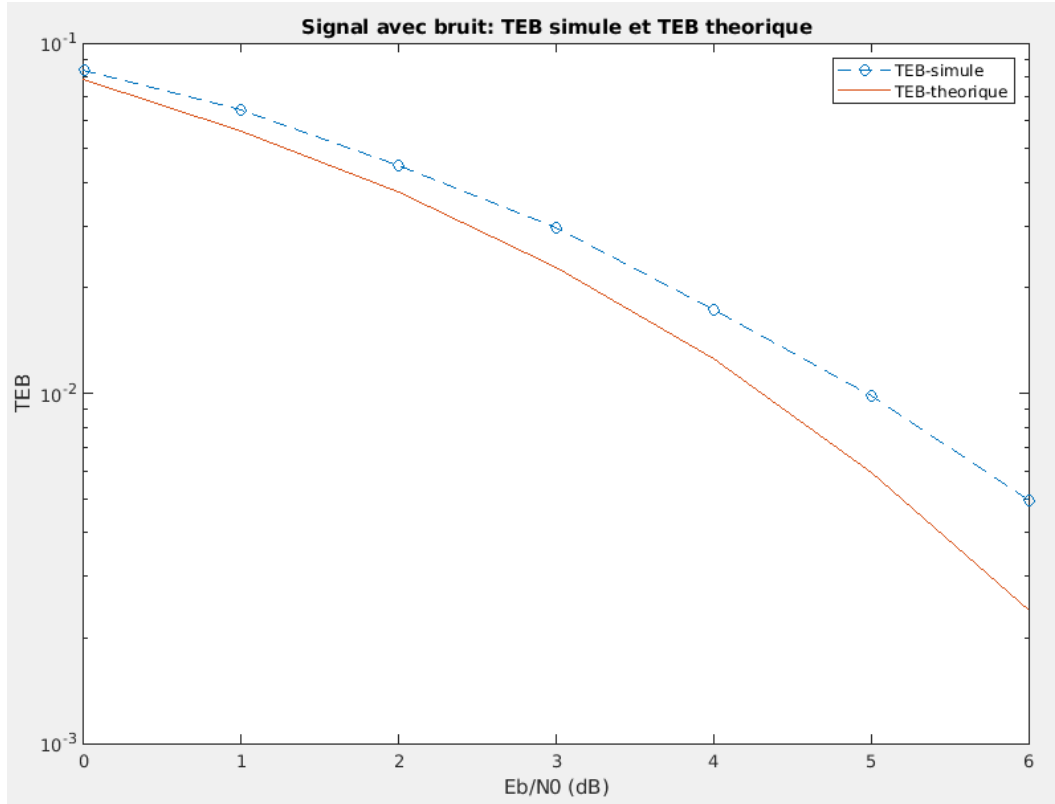


FIGURE 6 – TEB simulé sur fréquence porteuse et TEB théorique

On voit que les deux courbes ne se superposent pas parfaitement, peut-être un problème d'implantation de la chaîne, les deux courbes restent tout de même assez proche d'autant plus que le comportement pour un rapport signal à bruit nul est correct, on valide donc le fonctionnement de notre chaîne de transmission.

## 3.2 Implantation de la chaîne passe bas équivalente

Il n'y a désormais plus de transposition de fréquence et le bruit rajouté est désormais complexe

### 3.2.1 Signaux générés sur les voies en phase et en quadrature pour la chaîne passe-bas équivalente

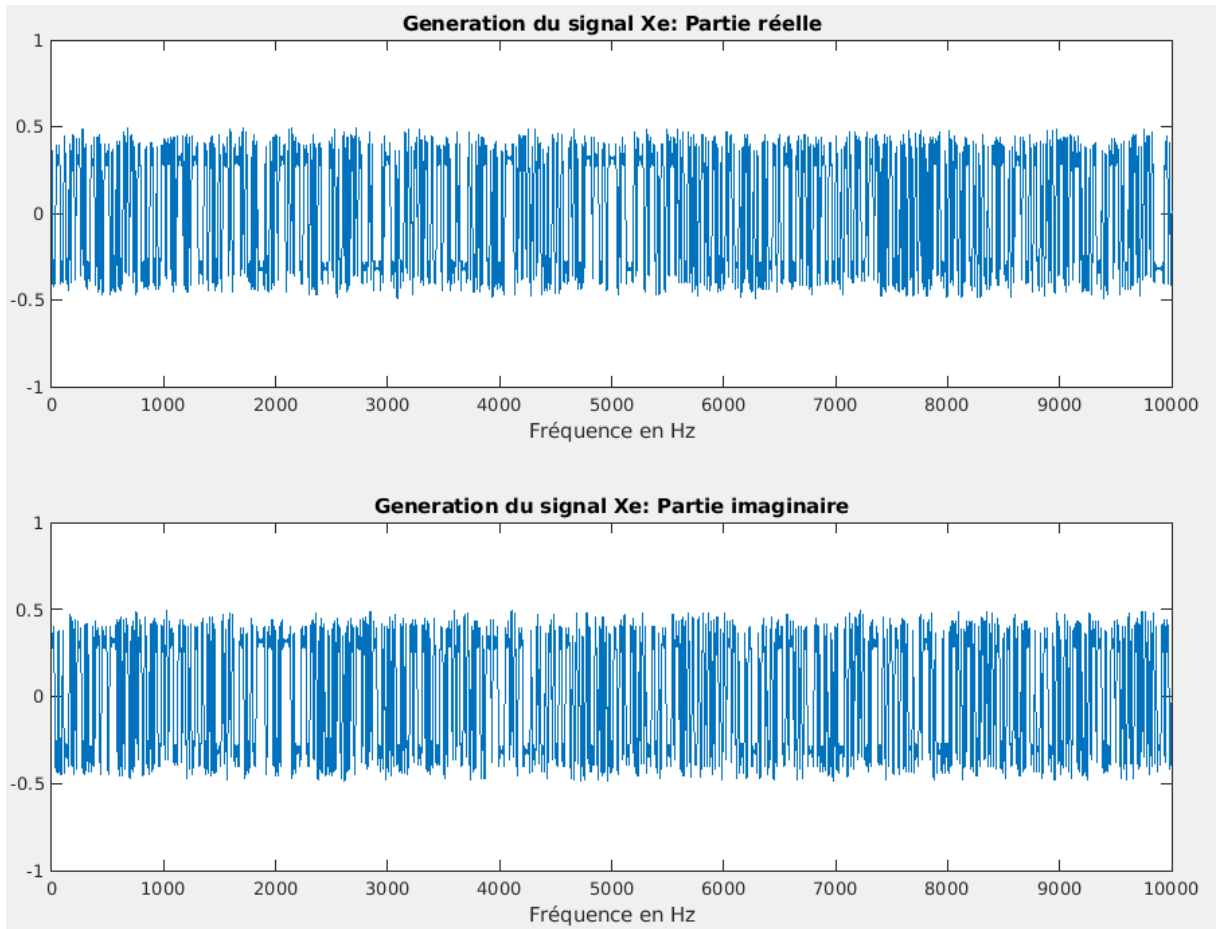


FIGURE 7 – Voies en phase et en quadrature pour 2000 bits (plus visible)

### 3.2.2 Estimation puis tracé de la DSP passe-bas équivalente et comparaison avec DPS fréquence porteuse

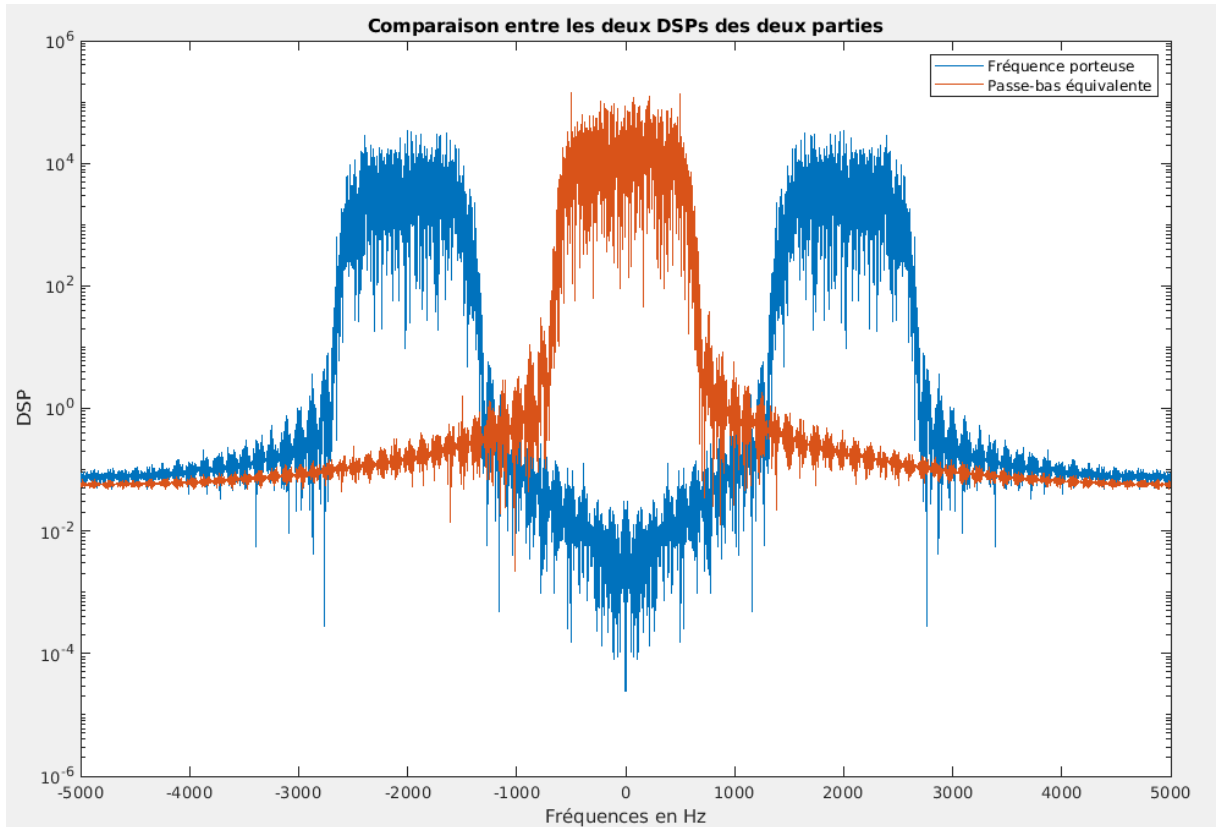


FIGURE 8 – Comparaison DSP fréquence porteuse et passe-bas équivalente

Comparer à la DSP sur fréquence porteuse, la DSP avec chaîne passe-bas équivalente est centrée autour de la fréquence 0 (modulation en bande de base) ce qui est logique puisqu'il n'y a plus de transposition de fréquence, la forme reste la même car le filtre de mise en forme (filtre en racine de cosinus surélevé) n'a pas changé. Le tracé est conforme à la théorie.

### 3.2.3 Constellations et rapport signal à bruit

On implante, dans un premier temps, la chaîne complète sans bruit pour vérifier que le TEB est bien nul (c'est le cas). Ensuite on rajoute le bruit complexe et on trace la constellation en sortie de l'échantillonneur pour différentes valeurs de rapport signal à bruit.



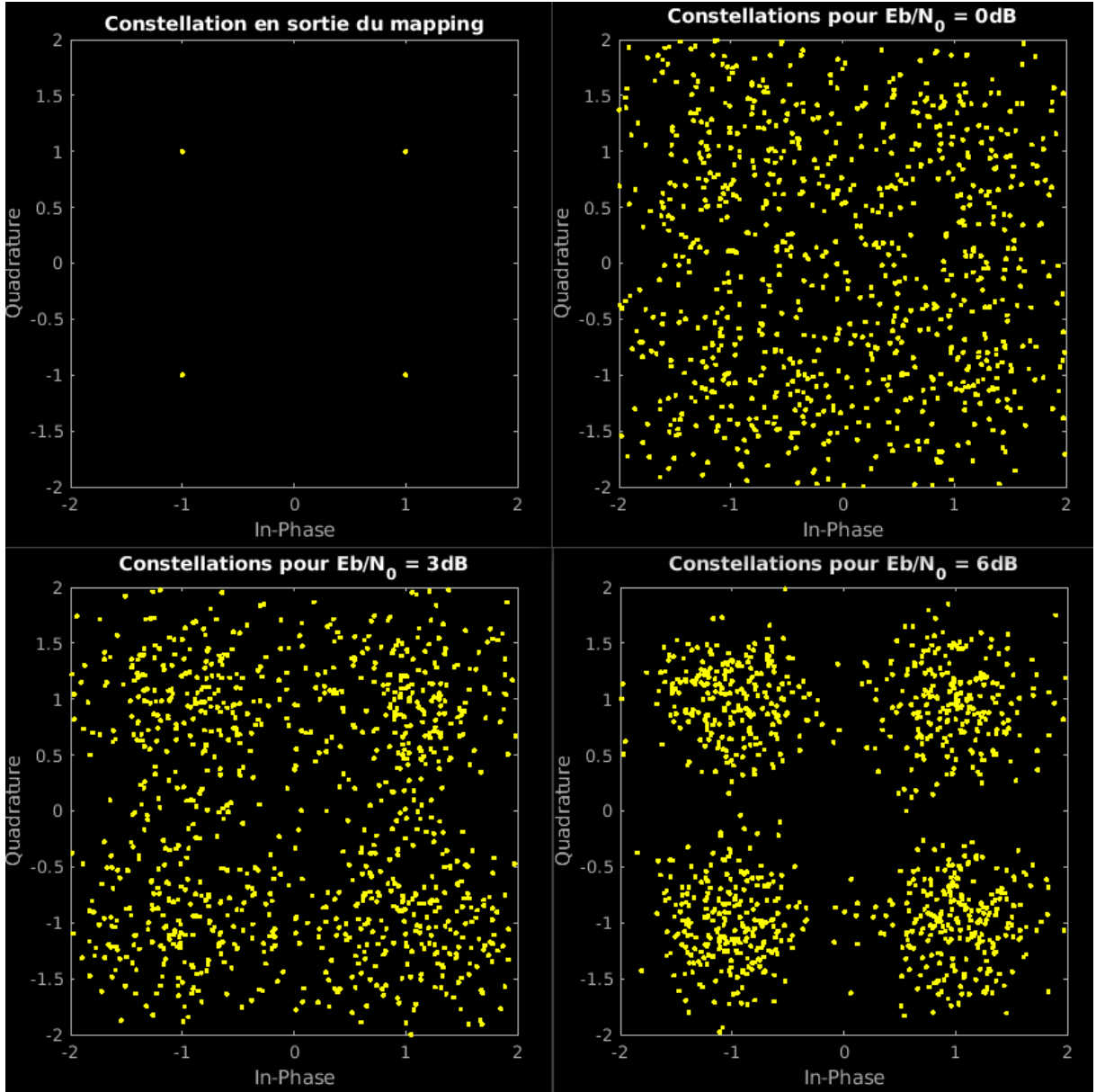


FIGURE 9 – Constellations en sortie du mapping et en sortie de l'échantillonneur pour 3 valeurs de  $E_b/N_0$  et Nb-bits = 2000

On remarque que plus le rapport signal à bruit est faible et plus la répartition des points est chaotique, à l'inverse plus le rapport signal à bruit est élevé plus il est facile de distinguer les paquets. Ce qui est logique puisque, plus la puissance du signal est grande par rapport à celle du bruit et moins le bruit aura d'impact sur le signal (le signal est simplement moins bruité ce qui se repercute sur les constellations).

### 3.2.4 Comparaison des TEBs simulés et du TEB théorique

On trace le taux d'erreur binaire en fonction du rapport signal à bruit par bits à l'entrée du récepteur, on prends des valeurs  $E_b/N_0$  allant de 0 à 6 dB.

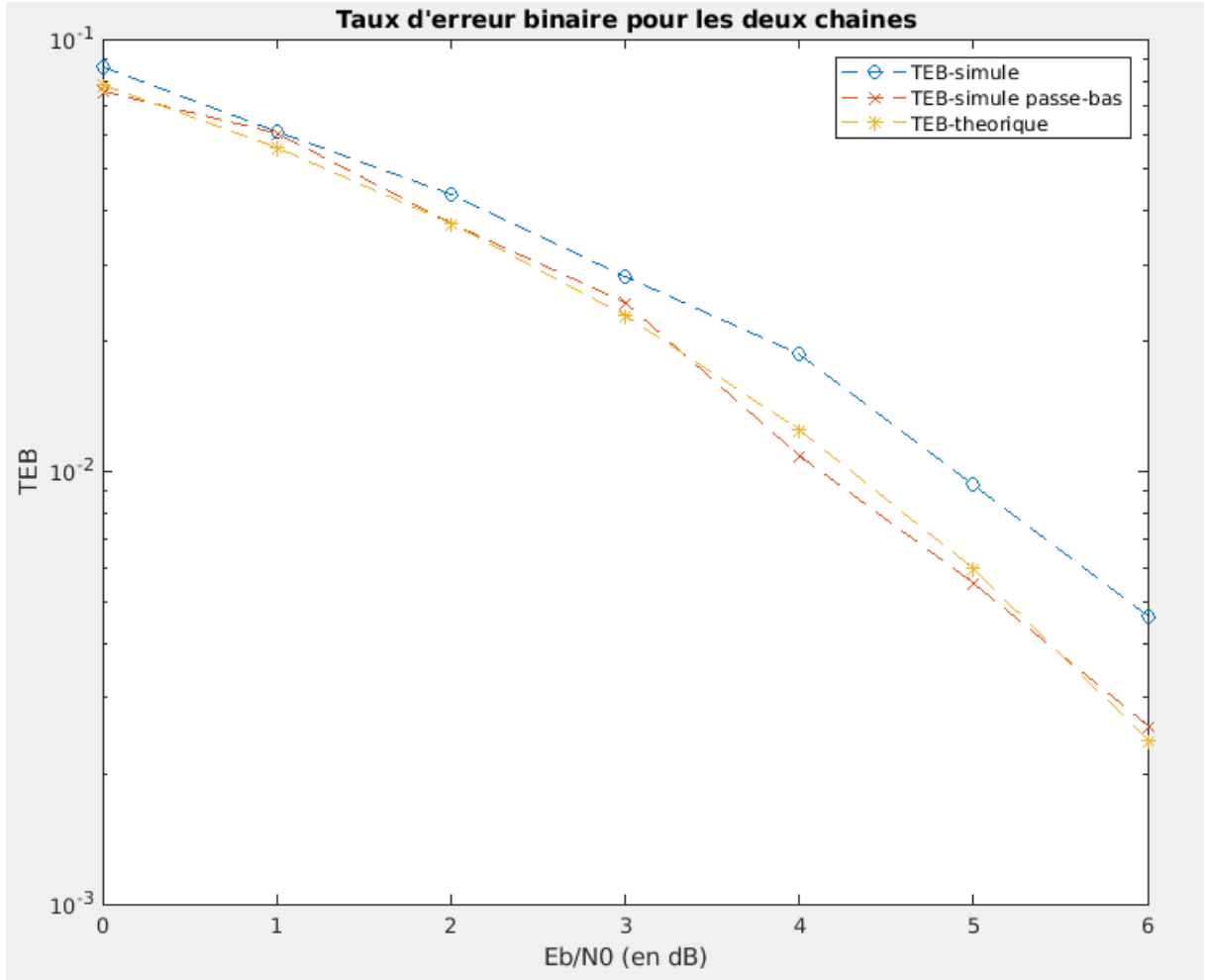


FIGURE 10 – Comparaison des TEBs des deux chaînes avec le TEB théorique et Nb-bits = 10k

Le TEB pour la chaîne passe-bas équivalente est quasiment similaire au TEB théorique, ce qui indique que la chaîne a été correctement implantée. Si la chaîne sur fréquence porteuse avait également été correctement implantée, elle aurait dû être similaire à la chaîne passe-bas équivalente et donc les 3 courbes seraient superposées. Le comportement reste toute fois proche.

## 4 Comparaison de modulations sur fréquence porteuse

On considèrera les quatre chaînes de transmission définies dans le tableau suivant :

Modulation :	4-ASK	QPSK	8-PSK	16-QAM
Filtre d'émission :	SRRCF, $\alpha = 0,5$	SRRCF, $\alpha = 0,5$	SRRCF, $\alpha = 0,5$	SRRCF, $\alpha = 0,5$
Filtre de reception :	SRRCF, $\alpha = 0,5$	SRRCF, $\alpha = 0,5$	SRRCF, $\alpha = 0,5$	SRRCF, $\alpha = 0,5$
Debit binaire :	48 kbps	48 kbps	48 kbps	48 kbps
TEB :	$10^{-2}$	$10^{-2}$	$10^{-2}$	$10^{-2}$

## 4.1 Étude de chaque chaîne de transmission

On implante la chaîne complète sans bruit afin de vérifier que le TEB obtenu est bien nul (c'est le cas pour les 4 chaînes). Pour la mapping/démapping et prises de décision on utilise les fonctions `pskmod.m`, `pskdemod.m` et `qammod.m`, `qamdemod.m` de MATLAB pour nous faciliter la tâche.

### 4.1.1 Constellations et rapport signal à bruit

On trace les constellations en sortie de l'échantillonneur pour différentes valeurs de rapport signal à bruit pour les 4 chaînes.

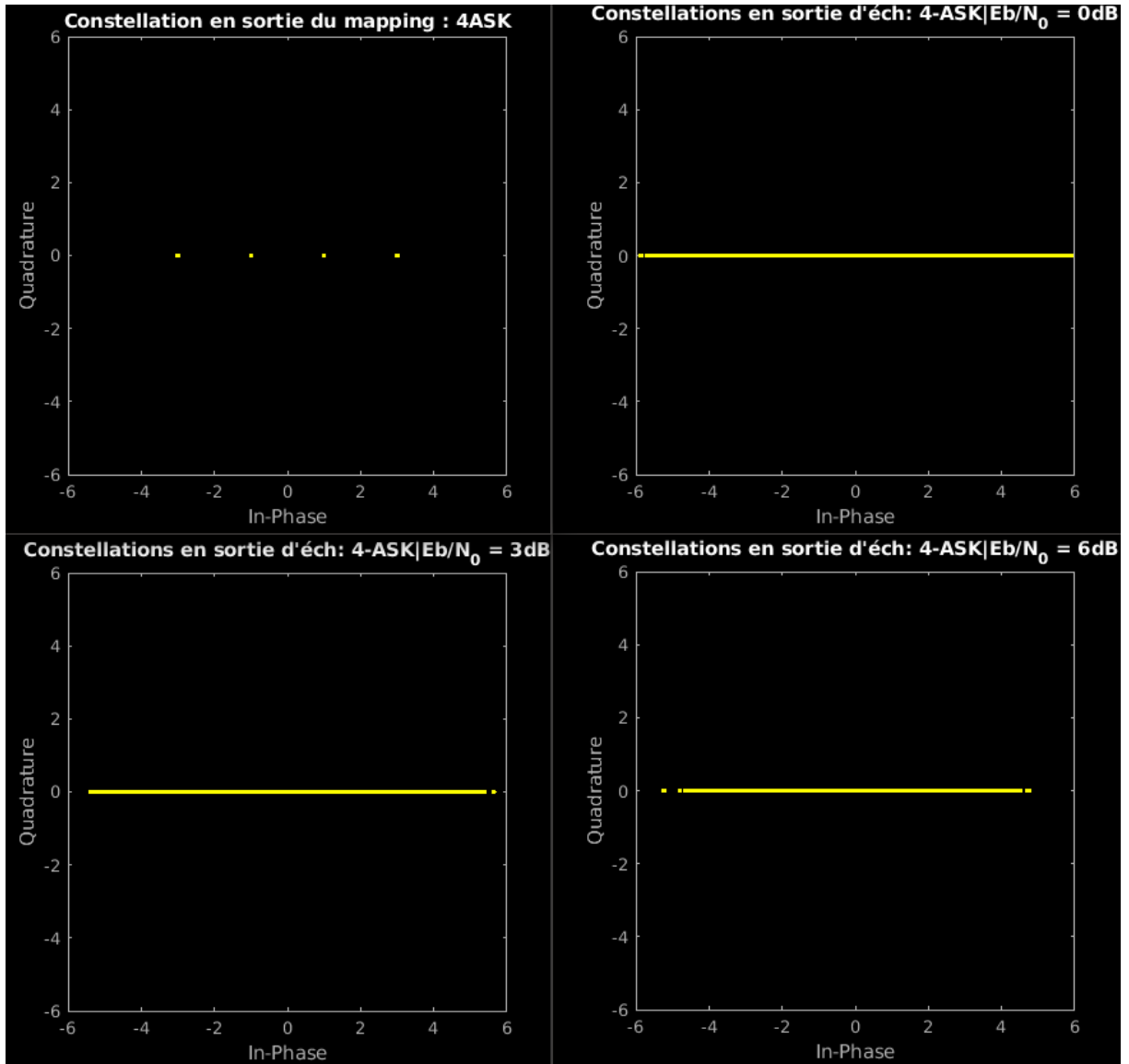


FIGURE 11 – Constellations 4-ASK, pour 3 valeurs de  $E_b/N_0$  et  $N_b\text{-bits} = 12000$

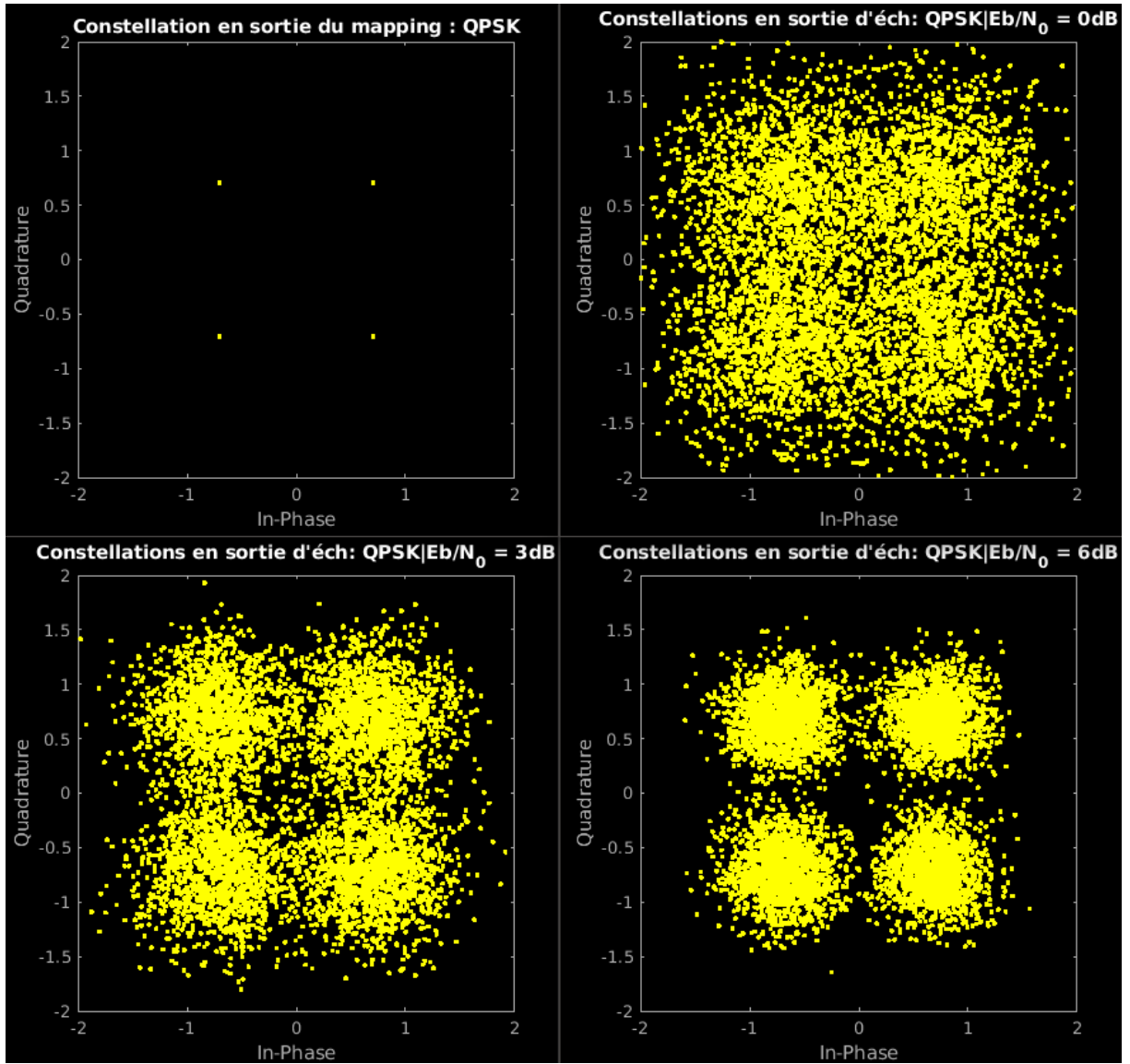


FIGURE 12 – Constellations QPSK, pour 3 valeurs de  $E_b/N_0$  et Nb-bits = 12000

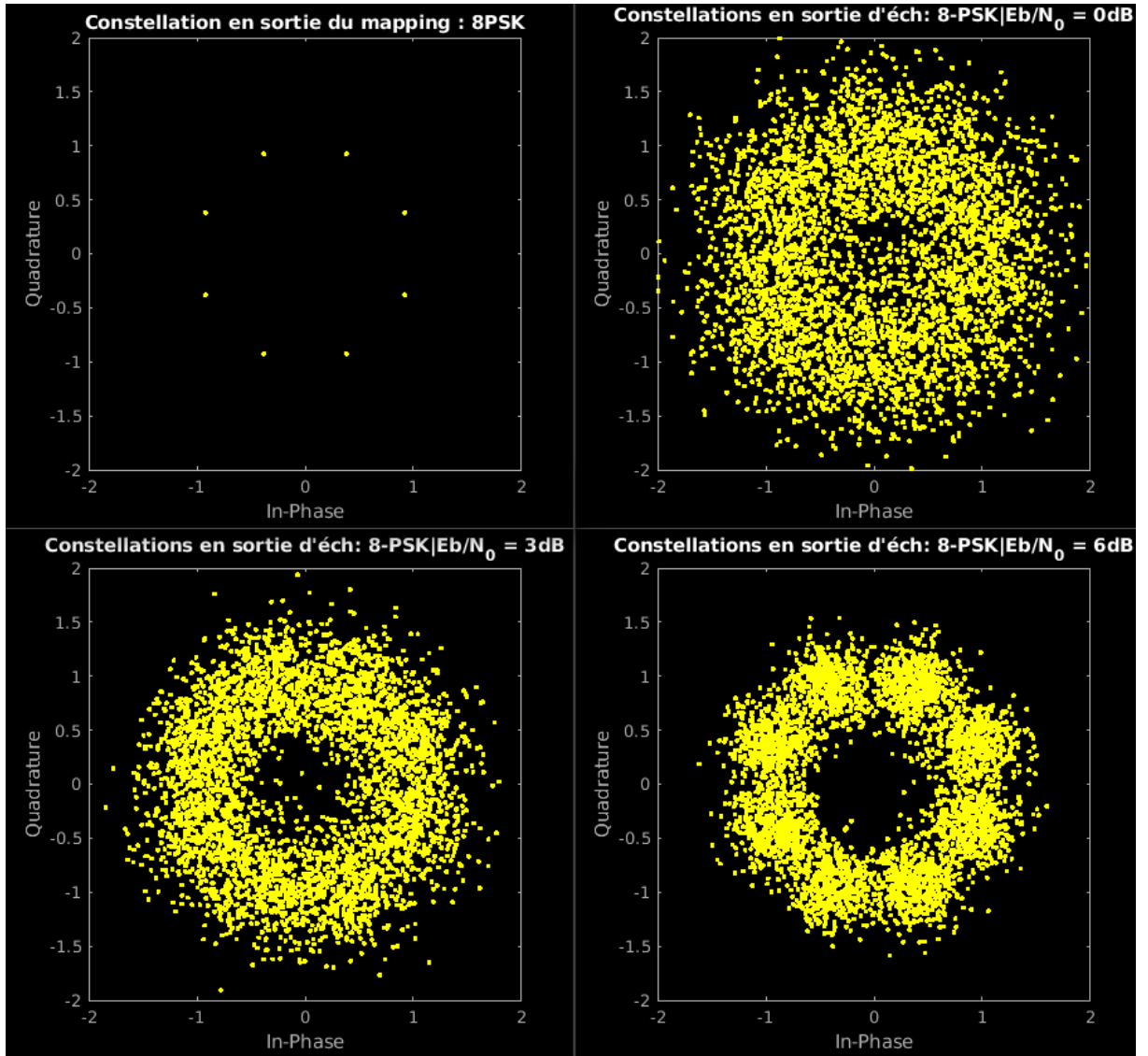


FIGURE 13 – Constellations 8-PSK, pour 3 valeurs de  $E_b/N_0$  et Nb-bits = 12000

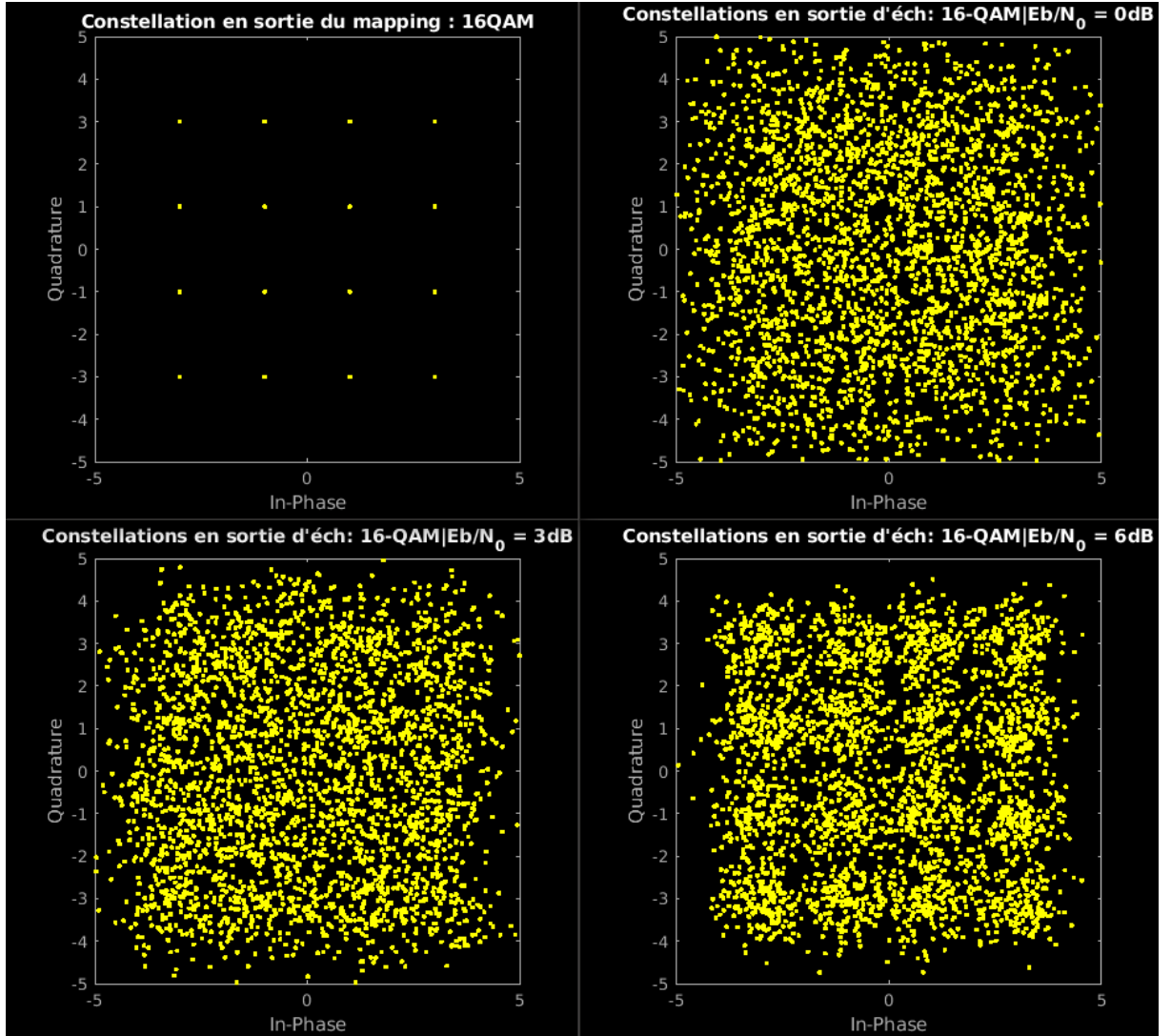


FIGURE 14 – Constellations 16-QAM, pour 3 valeurs de  $E_b/N_0$  et Nb-bits = 12000

Les mêmes conclusions que pour la section 3.2.3 peuvent se faire.

#### 4.1.2 Ajout du bruit et comparaison TEB simulé et TEB théorique

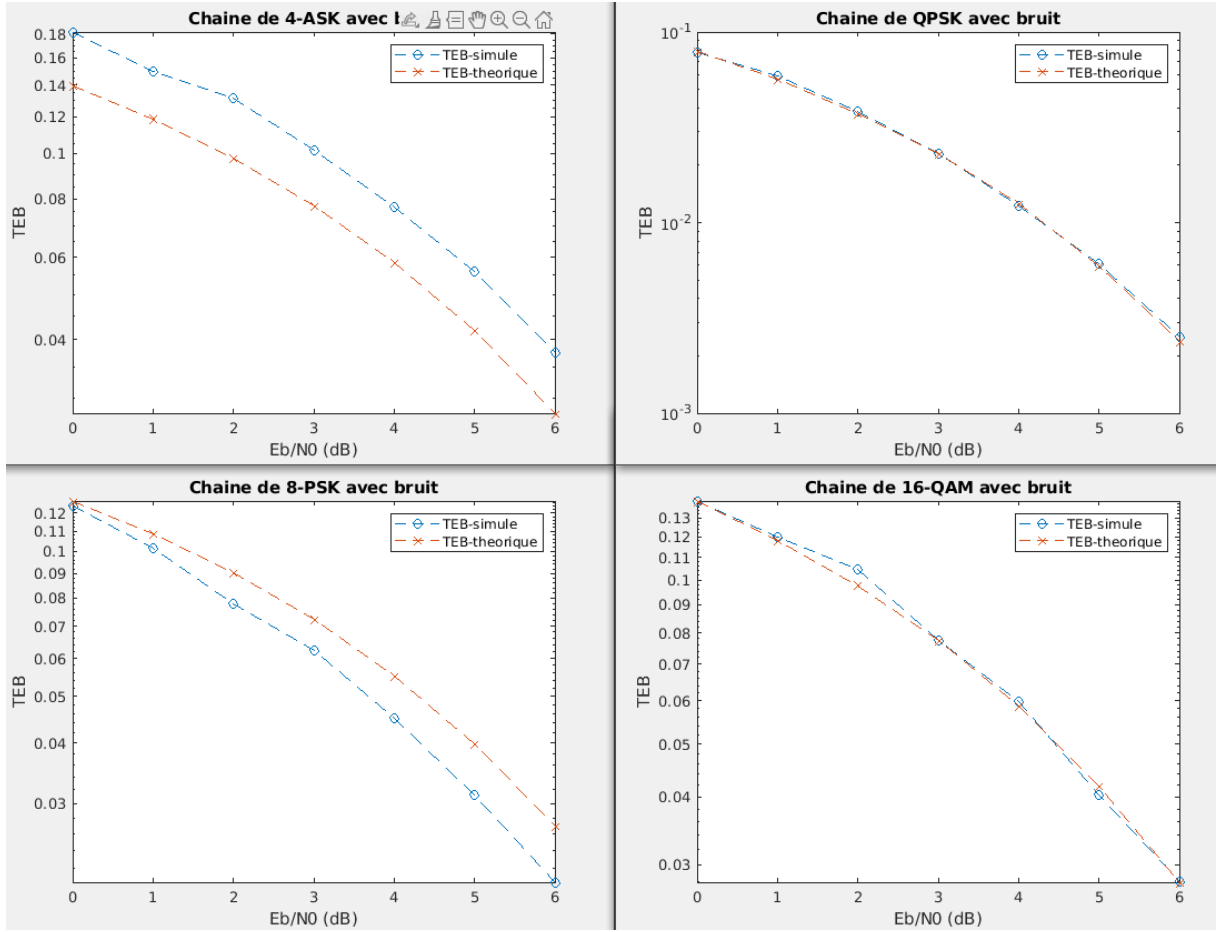


FIGURE 15 – Comparaison des TEB simulés au TEB théorique pour les 4 chaînes

Les tracés des TEB des chaînes QPSK et 16-QAM correspondent bien à leur TEB théorique, les chaînes sont correctement implantées. En revanche le TEB des chaînes 8-PSK et 4-ASK ne correspond pas tout à fait à leur TEB théorique, il y a un problème d'implantation sur ces deux chaînes. Le comportement de la chaîne 8-PSK reste acceptable, celui de la chaîne 4-ASK est discutable.

## 4.2 Comparaison des chaînes de transmission

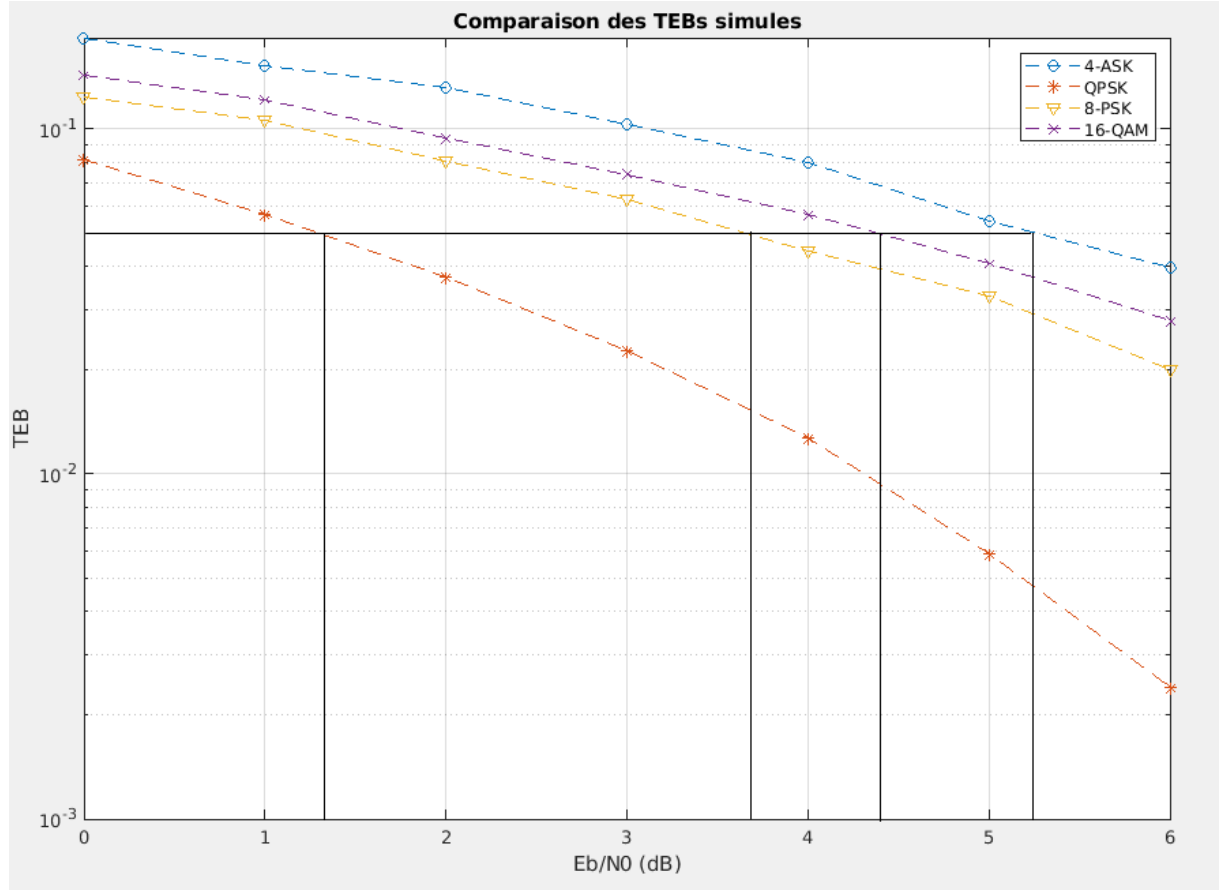


FIGURE 16 – Comparaison des TEBs pour les 4 chaînes

On voit que pour un même TEB, le rapport signal à bruit nécessaire pour la chaîne QPSK est plus faible que pour la chaîne 8-PSK, le rapport nécessaire pour 8-PSK est plus faible que pour la chaîne 16-QAM et que le rapport nécessaire pour 16-QAM est plus faible que pour la chaîne 4-ASK. Ce qui veut dire en termes d'efficacité de puissance que QPSK est plus efficace que 8-PSK qui est lui même plus efficace que 16-QAM qui est lui même plus efficace que 4-ASK. Ceci est conforme avec la théorie puisque l'on sait que pour un même filtre de mise en forme et de réception (Nyquist respecté, filtrage adaptée, même bruit gaussien blanc, mapping de Gray) la différence d'efficacité en puissance est proportionnelle à la distance minimale entre symboles. Plus la distance minimale entre symboles est grande plus l'efficacité en puissance sera importante. Il suffit de regarder les différentes constellations pour voir que la distance minimale entre symboles pour QPSK est plus grande que pour 8-PSK qui est elle même plus grande que pour 16-QAM qui est elle-même plus grande que pour 4-ASK.



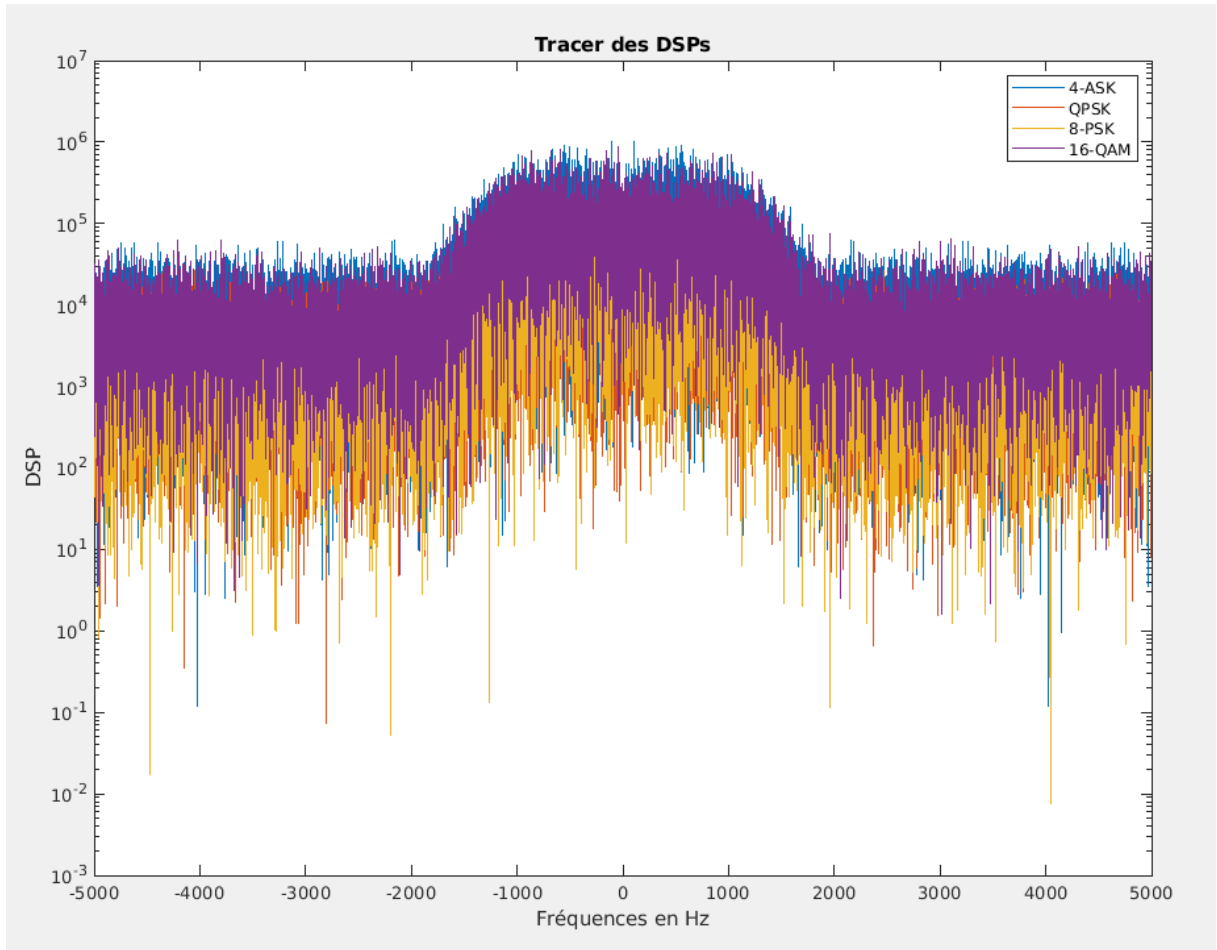


FIGURE 17 – Comparaison des DSPs pour les 4 chaînes et  $R_b = 48$  kpbs

Une bonne efficacité spectrale se traduit par une bande occupée faible, on voit que la bande occupée par le signal de la chaîne 16-QAM est bien plus petite que pour les autres. On en conclut que c'est la chaîne 16-QAM qui est la plus efficace spectralement. Ceci est conforme avec la théorie car pour un même coefficient de proportionnalité  $k$  (qui dépend du filtrage, ici les 4 chaînes possèdent le même filtrage : racine de cosinus surélevé avec un roll-off de 0.5) l'efficacité spectrale est proportionnelle au nombre de symboles  $M$ . Plus  $M$  est grand et plus l'efficacité spectrale sera importante. Donc la chaîne 16-QAM ( $M = 16$ ) est plus efficace que la chaîne 8-PSK ( $M = 8$ ) qui est elle-même plus efficace que les chaînes QPSK et 4-ASK ( $M = 4$ ).