

Rapport De Projet de Télécommunication  
Étude de chaines de transmission sur porteuse :  
modulateurs DVB-S, DVB-S2  
(Partie 2)

Nouha Lahyen et Benjamin Schlögel

Département Sciences du Numérique - Première année  
2022-2023

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Implantation de la transmission avec transposition de fréquence</b>	<b>3</b>
2.1	Tracés des signaux sur les voies en phase et en quadrature . . . . .	3
2.2	Tracé du signal transmis sur fréquence porteuse . . . . .	4
2.3	Tracé de la densité spectrale de puissance des signaux générés sur les voies en phase et en quadrature . . . . .	4
2.4	Tracé de la densité spectrale de puissance du signal transmis sur fréquence porteuse . . . . .	5
2.5	Explication des DSP obtenues . . . . .	5
2.6	Comparaison du TEB simulé et TEB théorique . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Implantation de la chaîne passe-bas équivalente à la chaîne de transmission sur porteuse</b>	<b>7</b>
3.1	signaux générés sur les voies en phase et en quadrature . . . . .	7
3.2	DSP de l'enveloppe complexe . . . . .	7
3.3	Explication de la DSP observée . . . . .	7
3.4	Constellations . . . . .	8
3.4.1	En sortie du Mapping . . . . .	8
3.4.2	En sortie de l'échantillonneur . . . . .	8
3.5	TEB expérimental et théorique dans une chaîne avec bruit . . . . .	10
3.6	Comparaison des TEB dans une chaîne passe-bas équivalente et chaîne avec transposition de fréquence . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Modulateur DVB_S2 ou 8-PSK</b>	<b>12</b>
4.1	Constellations . . . . .	12
4.1.1	En sortie du Mapping . . . . .	13
4.1.2	En sortie de l'échantillonneur . . . . .	13
4.2	TEB expérimental et théorique dans une chaîne avec bruit . . . . .	15
<b>5</b>	<b>Comparaison de modulateurs 8-PSK et 4-PSK</b>	<b>17</b>
5.1	Comparaison en efficacité en puissance . . . . .	17
5.2	Comparaison en efficacité spectrale . . . . .	17
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>18</b>

### 1 Introduction

L'objectif de ce projet est de comprendre et de réaliser la transmission de chaînes sur fréquence porteuse. Par la suite, nous pourrions en évaluer son efficacité spectrale, c'est-à-dire le rapport du débit binaire sur la bande de fréquence utilisée, et son efficacité en puissance, soit obtenir la SNR nécessaire pour obtenir le taux d'erreur binaire souhaité. Nous allons aussi identifier les facteurs sur lesquels nous pouvons jouer pour influencer les deux efficacités citées précédemment, pour le minimiser. Puis, nous comparerons différentes chaînes de transmissions pour visualiser l'efficacité spectrale et l'efficacité en puissance.

### 2 Implantation de la transmission avec transposition de fréquence

Dans cette première partie du projet, nous nous intéressons à implémenter un modulateur au format DVB\_S avec Mapping 4PSK ie chaque symbole est codé en 2 bits. Nous ferons en sorte de prendre comme filtre de mise en forme un filtre en racine de cosinus surélevé de roll off 0,35. On utilisera une fréquence d'échantillonnage  $F_e=24$  kHz pour transmettre un débit binaire  $R_b=3$  kbps sur une fréquence porteuse de 2 kHz. Nous ferons en sorte de respecter le critère de Nyquist et celui du filtrage adapté. Pour cela, on choisit de mettre un filtre de réception identique à celui de mise en forme et de choisir des instants d'échantillonnages tous les  $T_s$ .

#### 2.1 Tracés des signaux sur les voies en phase et en quadrature

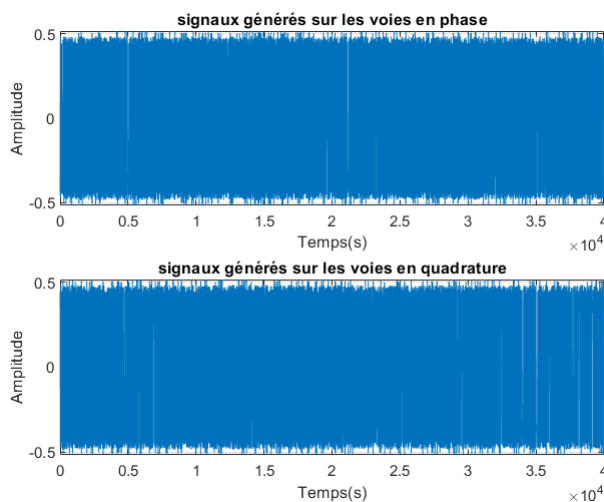


FIGURE 1 – Signaux en phase et en quadrature

### 2.2 Tracé du signal transmis sur fréquence porteuse

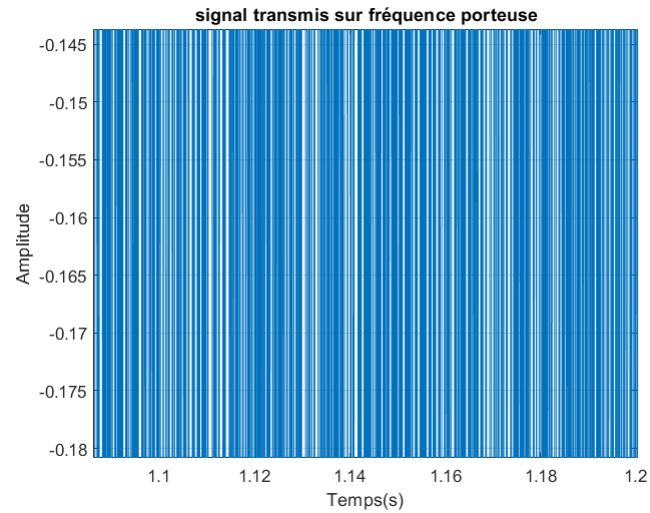


FIGURE 2 – Signal transmis sur fréquence porteuse

### 2.3 Tracé de la densité spectrale de puissance des signaux générés sur les voies en phase et en quadrature

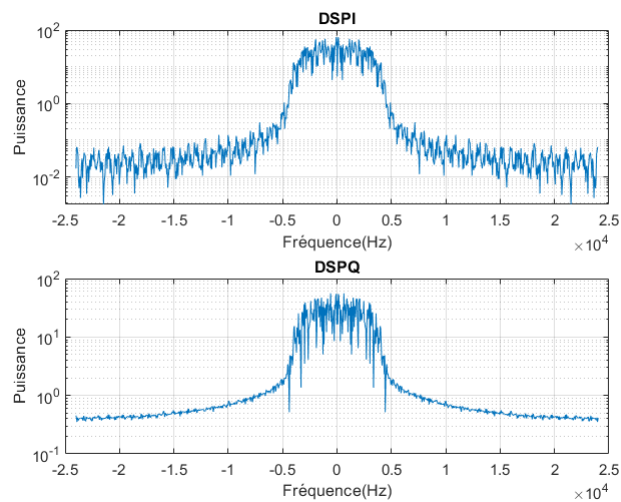


FIGURE 3 – DSP des signaux en phase et en quadrature

### 2.4 Tracé de la densité spectrale de puissance du signal transmis sur fréquence porteuse

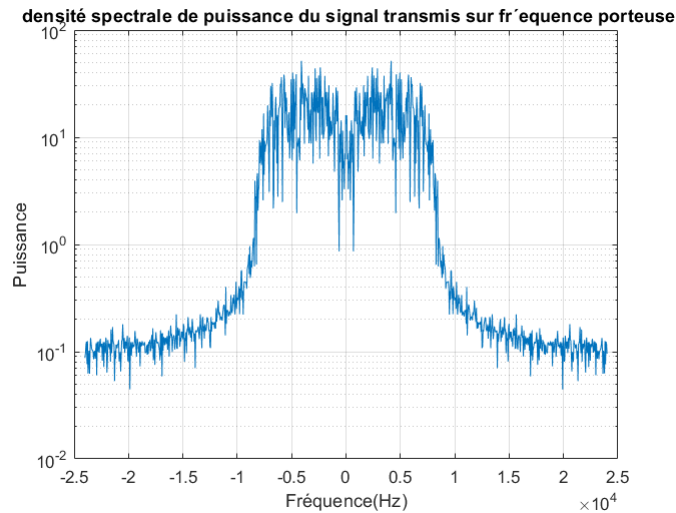


FIGURE 4 – DSP du signal transmis sur fréquence porteuse

### 2.5 Explication des DSP obtenues

En analysant les deux courbes : celles de la DSP du signal après mapping et celle du signal après transposition en fréquence, nous remarquons que la DSP du signal n'est maintenant plus centrée en 0, mais est devenue centrée en  $f_p = 2000$  Hz. Ceci est parfaitement compréhensible, car en multipliant mon signal par une exponentielle (mettre la formule mathématique de l'exponentielle) nous avons décalé la bande de notre signal tout en gardant la même largeur de bande.

### 2.6 Comparaison du TEB simulé et TEB théorique

Nous remarquons que le TEB simulé et théorique sont confondus. Pour le TEB théorique, nous utilisons cette formule :

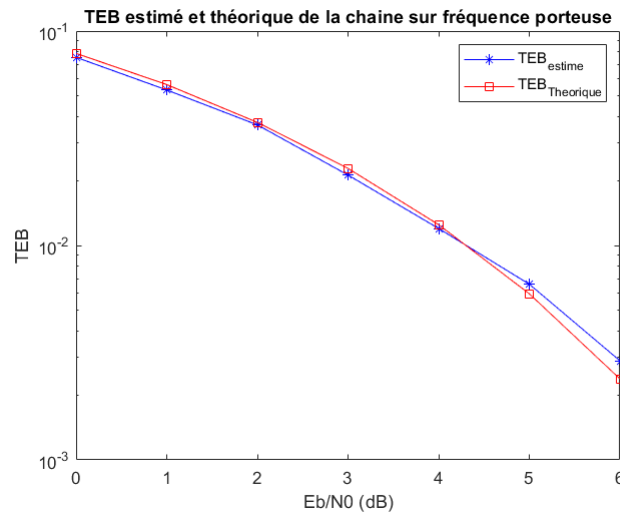


FIGURE 5 – TEB estimé et théorique en fréquence porteuse

## 3 Implantation de la chaîne passe-bas équivalente à la chaîne de transmission sur porteuse

Dans la chaîne passe-bas équivalente, nous reprenons à peu près le même schéma que la chaîne précédente, sauf que cette fois-ci sans la transposition en fréquence. Cela veut dire que nous allons faire fi de la multiplication par une exponentielle complexe et que nous enlèverons dans notre démodulateur les multiplications par les  $\cos()$  et  $\sin()$ . Nous nous posons alors une question :

Est-ce que les TEB resteront les mêmes ?

C'est ce que nous allons essayer de découvrir.

### 3.1 signaux générés sur les voies en phase et en quadrature

Ici une représentation après Mapping des signaux en phase et en quadrature. En effet, notre signal  $x = I + iQ$  comporte une partie réelle et une imaginaire. Nous prouverons ça à partir des constellations après Mapping.

### 3.2 DSP de l'enveloppe complexe

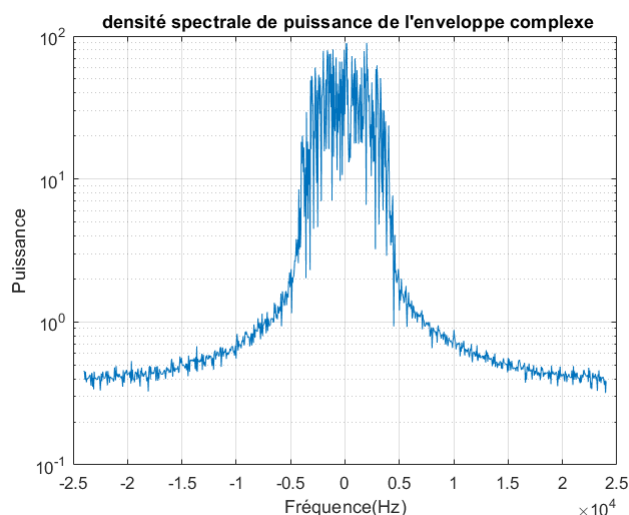


FIGURE 6 – DSP de l'enveloppe complexe

### 3.3 Explication de la DSP observée

Dans la chaîne passe-bas équivalente, nous n'avons pas transposé en fréquence. Ceci aura donc pour effet de ne pas décaler la DSP du signal. Par conséquent, la DSP restera

### 3 IMPLANTATION DE LA CHAÎNE PASSE-BAS ÉQUIVALENTE À LA CHAÎNE DE TRANSMISSION SUR PORTEUSE

---

centrée en 0. C'est donc une transmission en bande de base. Contrairement à celle de la chaîne précédente, qui elle, a une DSP centrée sur  $f_p$ .

## 3.4 Constellations

### 3.4.1 En sortie du Mapping

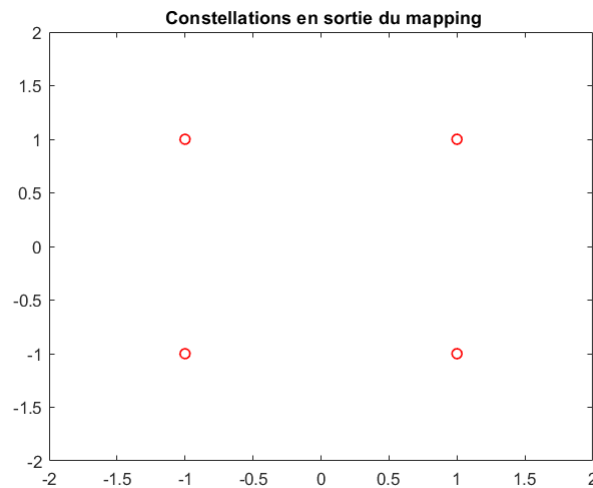


FIGURE 7 – Constellation QPSK

Ici, nous utilisons un mapping Q\_PSK qui fait que  $a_k$  et  $b_k$  auront chacun leur valeur dans  $+1 ; -1$ . Les constellations représentent bien le type de Mapping utilisé.

### 3.4.2 En sortie de l'échantillonneur

Dans un canal avec bruit, nous allons essayer pour différentes valeurs de  $E_b/N_0$  de tracer les constellations à la sortie de l'échantillonneur dans la partie démodulation.



### 3 IMPLANTATION DE LA CHAÎNE PASSE-BAS ÉQUIVALENTE À LA CHAÎNE DE TRANSMISSION SUR PORTEUSE

---

Pour  $E_b/N_0 = 7$  :

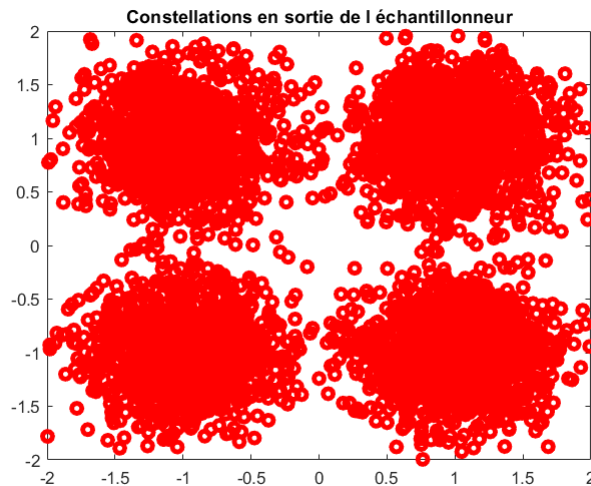


FIGURE 8 – Constellation pour  $E_b/N_0 = 7$

Pour  $E_b/N_0 = 5$  :

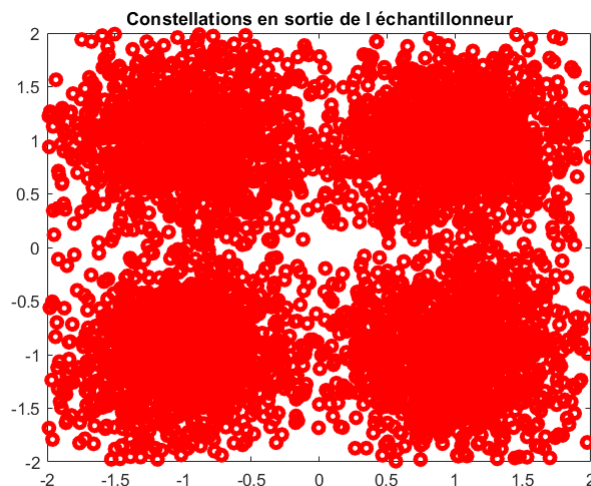


FIGURE 9 – Constellation pour  $E_b/N_0 = 5$

- Nous remarquons ici que plus  $E_b/N_0$  est grand, plus les valeurs sont bien centrées autour des constellations initiales présentes après le Mapping. Plus les constellations sont centrées, et plus il sera facile de prendre une décision juste quant aux symboles.
- Nous remarquons qu'on a beaucoup plus de points de constellations pour l'échantillonneur comparé à ce qu'on avait après mapping. En fait, à l'ajout du bruit

### 3 IMPLANTATION DE LA CHAÎNE PASSE-BAS ÉQUIVALENTE À LA CHAÎNE DE TRANSMISSION SUR PORTEUSE

gaussien, chacun des points est alors écarté de sa position initiale. L'importance de cet écart est dû à la valeur de  $E_b/N_0$ . Plus  $E_b/N_0$  est grand, plus l'écart s'affaiblit.

#### 3.5 TEB expérimental et théorique dans une chaîne avec bruit

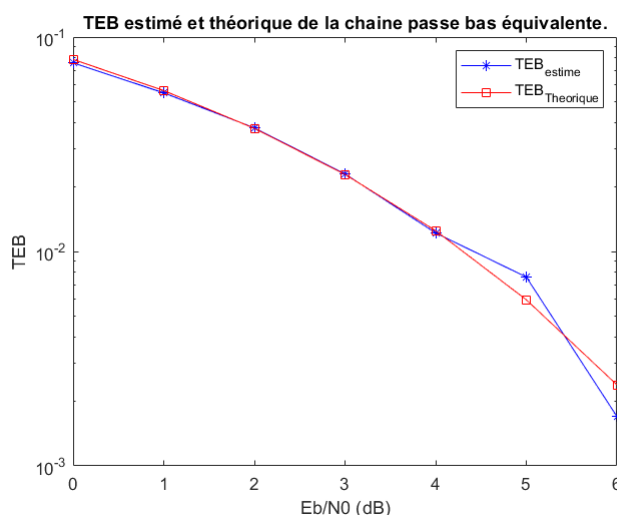


FIGURE 10 – Tracé des TEB pour le passe bas équivalent

#### Taux d'erreur binaire théorique

L'expression du TEB théorique est :

$$TEB = Q\left(2\sqrt{\frac{E_s}{N_0}}\right)$$

Cette fois encore, nous utiliserons les mêmes formules de TEB que précédemment pour calculer le TEB théorique. Nous remarquons que les TEB simulés et théoriques se superposent. Ceci traduit que notre chaîne est fonctionnelle et fonctionne correctement. Nous avons donc réussi à valider le fonctionnement de notre chaîne équivalente en la comparant au TEB théorique.

#### 3.6 Comparaison des TEB dans une chaîne passe-bas équivalente et chaîne avec transposition de fréquence

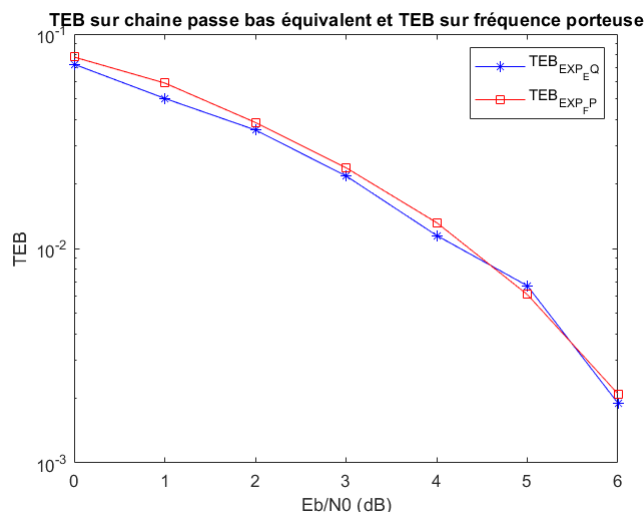


FIGURE 11 – TEB passe bas eq. et TEB fréquence porteuse

Nous remarquons que les tracés des TEB simulés en chaîne passe-bas équivalente (pas de transposition en fréquence) et le TEB de la chaîne en transposition de fréquence sont superposés. Ceci permet de répondre à la question que nous nous sommes posés plus haut. En effet, les TEB coïncident. Cela veut dire que pour différentes valeurs de  $E_b/N_0$  les TEB sont confondus. Donc les deux chaînes ont la même efficacité en puissance.

Cependant, leur efficacité en puissance est différente, car la bande passante occupée n'est pas la même. Pour une chaîne en transposition de fréquence :  $B = \frac{1+\alpha}{2T_p}$  alors que pour une chaîne passe bas équivalente on a  $B = \frac{1+\alpha}{2T_s}$ . Puisque l'efficacité spectrale est :  $\eta = \frac{R_b}{B}$ . On obtient alors  $\eta$  de la chaîne passe bas équivalente est plus grande que celle de la chaîne en transposition de fréquence.

## Calcul de l'efficacité spectrale

On a :

$$\eta = \frac{R_b}{B}$$

Avec B largeur de la bande passante et donc :

$$B = \frac{1+\alpha}{2T}$$

Nous en déduisons pour la chaîne passe-bas :

$$B = \frac{1+\alpha}{2T_s}$$

Et nous en déduisons pour la chaîne de transposition en fréquence :

$$B_p = \frac{1+\alpha}{2T_p}$$

Puisque  $T_p \ll T_s$  on a  $B_p \gg B$  et ainsi :

$$\eta_p < \eta$$

## 4 Modulateur DVB\_S2 ou 8-PSK

Dans cette partie, nous allons implanter une chaîne de transmission avec Mapping 8-PSK, un filtre de mise en forme en racine de cosinus surélevé avec roll-off 0,2. Et l'on utilisera pour cela non pas une transposition en fréquence, mais une chaîne passe bas équivalente.

### 4.1 Constellations

Dans un premier temps l'on va tracer les constellations en sortie du Mapping et quelques une en sortie de l'échantillonneur.

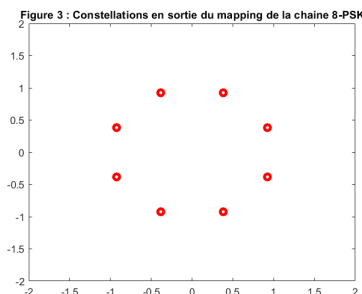


FIGURE 12 – Constellation 8-PSK

#### 4.1.1 En sortie du Mapping

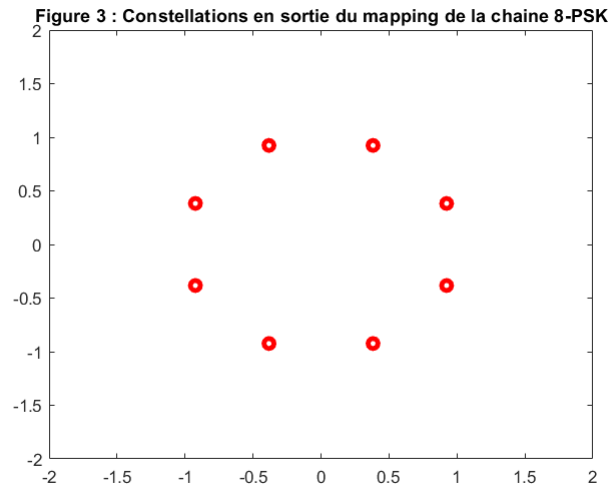


FIGURE 13 – Constellation pour 8-PSK

Le Mapping 8PSK est un mapping qui code 3 bits en 1 symbole. Étant donné l'ordre de Mapping :

$M = 8 = 2^{*3}$  alors le nombre de bits par symbole est : 3.

#### 4.1.2 En sortie de l'échantillonneur

Dans un canal avec bruit, nous allons essayer pour différentes valeurs de  $E_b/N_0$  de tracer les constellations à la sortie de l'échantillonneur dans la partie démodulation.

Pour  $E_b/N_0 = 7$  :

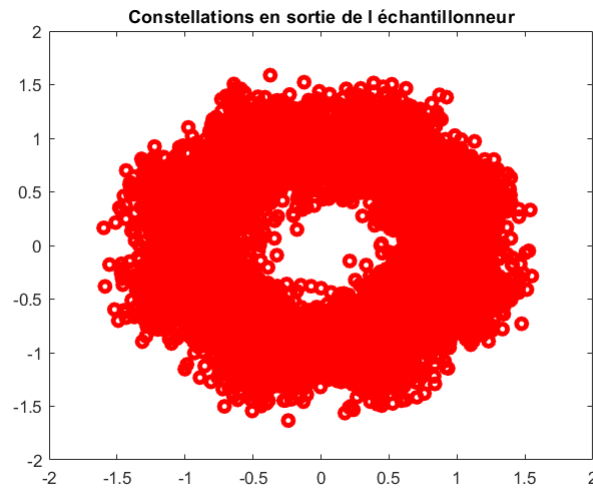


FIGURE 14 – Constellation pour  $E_b/N_0 = 7$

Pour  $E_b/N_0 = 5$  :

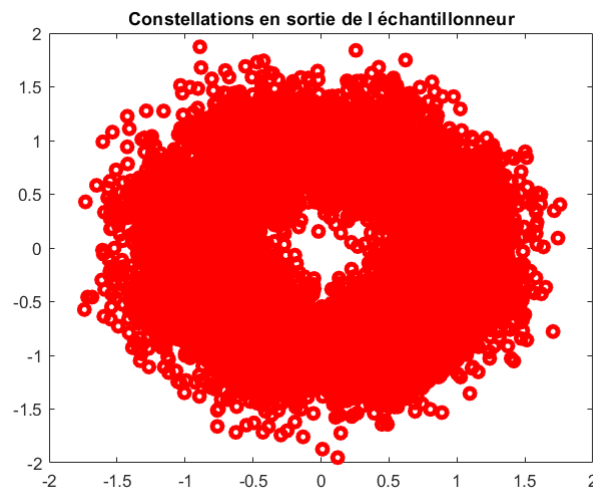


FIGURE 15 – Constellation pour  $E_b/N_0 = 5$

Pour  $E_b/N_0 = 1$  :

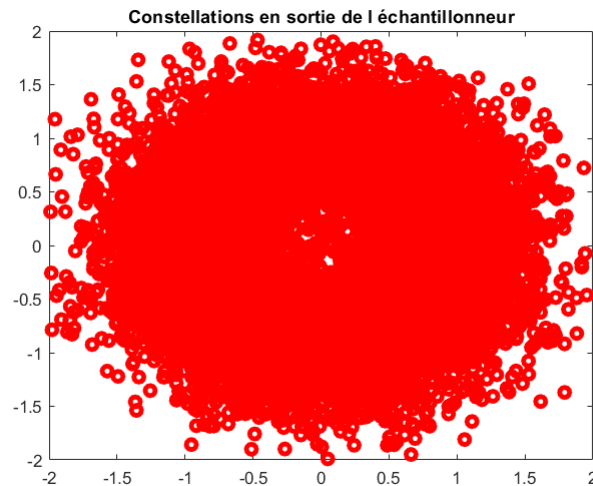


FIGURE 16 – Constellation pour  $E_b/N_0 = 1$

## 4.2 TEB expérimental et théorique dans une chaîne avec bruit

Calcul du taux d'erreur binaire théorique

On a :

$$TES = 2Q \left( \sqrt{\frac{2E_s}{N_0}} \times \sin \left( \frac{\pi}{M} \right) \right)$$

et :

$$TEB = \frac{1}{\log_2(M)} \times TES$$

---

Pour  $M = 8$  nous avons l'expression du TEB théorique :

$$TEB = \frac{2}{3} Q \left( \sqrt{\frac{6E_b}{N_0}} \times \sin \left( \frac{\pi}{8} \right) \right)$$

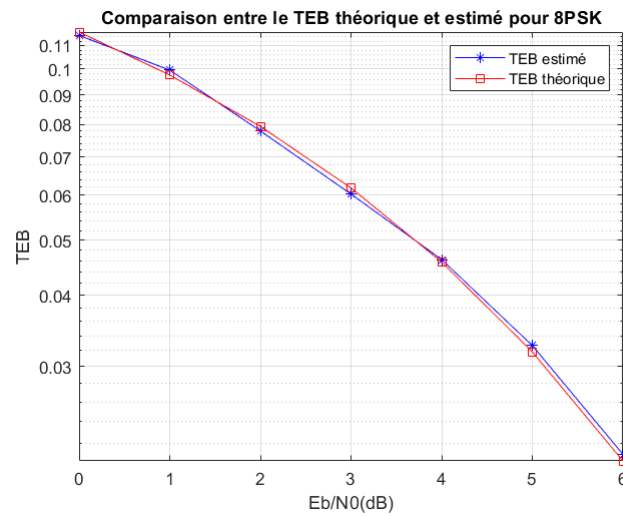


FIGURE 17 – Comparaison des TEB théoriques et estimés pour 8-PSK

On remarque que les 2 TEB coïncident encore une fois. Ceci nous permet de conclure que le critère de Nyquist et du filtrage adapté ont été respectés. Mais aussi, que notre prise de décision a été bonne, et que le seuil utilisé était correcte.



## 5 Comparaison de modulateurs 8-PSK et 4-PSK

Dans cette dernière partie, nous allons essayer de rassembler toutes les données nécessaires pour pouvoir comparer entre modulateur 8-PSK et 4-PSK. Ceci dit, nous comparerons l'efficacité spectrale et en puissance de ces derniers.

### 5.1 Comparaison en efficacité en puissance

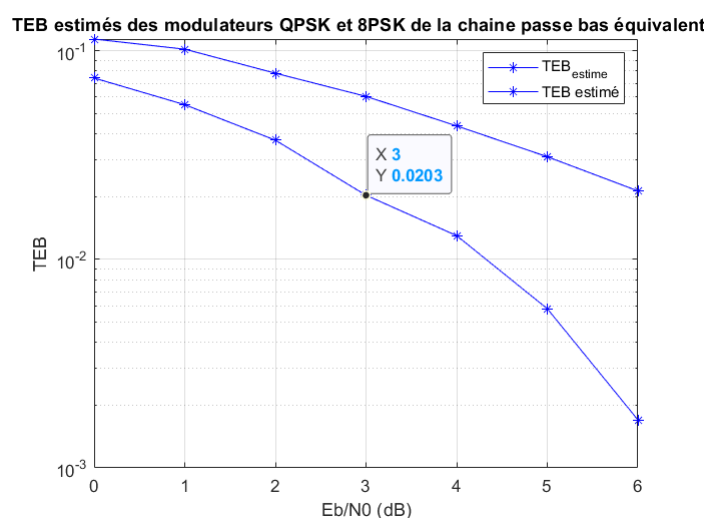


FIGURE 18 – TEB des modulateurs de QPSK et 8-PSK

A la comparaison, des deux modulateurs, nous remarquons que la courbe du TEB du signal 8PSK est au dessus du signal 4PSK. Ceci prouve alors que le modulateur 4PSK a une efficacité en puissance meilleure. En effet, si on choisit par exemple pour :

$$\text{TEB}=0,0203$$

On obtient :

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{8-PSK} = 6$$

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{4-PSK} = 3$$

Nous savons d'après le cours, que le modulateur qui a besoin du plus petit  $E_b/N_0$  pour atteindre un TEB fixé est considéré comme le plus fort en terme d'efficacité en puissance. Ce qui justifie notre décision.

### 5.2 Comparaison en efficacité spectrale

EN terme d'efficacité spectrale, étant donné que la seule différence entre les deux modulateurs se trouve dans l'ordre du modulateur : les mêmes instants d'échantillonnages, les

mêmes filtres utilisés. La seule différence réside dans  $M$ . Avec  $M_{8-PSK} = 8$  et  $M_{4-PSK} = 4$ . Par conséquent, puisque l'efficacité spectrale s'écrit :

#### Comparaison de l'efficacité spectrale entre 4-PSK et 8-PSK

Nous avons :

$$\eta = \frac{R_b}{B} = \frac{\log_2(M)}{k}$$

Alors :

$\eta_{4-PSK}$  : efficacité spectrale associée à 4-PSK

$\eta_{8-PSK}$  : efficacité spectrale associée à 8-PSK

Donc :

$$\begin{aligned}\eta_{4-PSK} &= \frac{\log_2(4)}{k} = \frac{2}{k} \\ \eta_{8-PSK} &= \frac{\log_2(8)}{k} = \frac{3}{k}\end{aligned}$$

---

Alors :

$$\eta_{4-PSK} < \eta_{8-PSK}$$

Nous concluons que l'efficacité spectrale du modulateur 8-PSK est plus grande que l'efficacité spectrale du modulateur 4-PSK.

## 6 Conclusion

À travers cette étude, nous avons découvert comment implanter des modulateurs QPSK et 8-PSK en utilisant des chaînes en transposition de fréquence et une chaîne passe-bas équivalente.

Nous avons pu implanter alors les deux chaînes et visualiser les DSP du signal après modulation que nous avons expliqué. Par la suite, on a essayé de comparer les TEB simulés et théoriques pour chacune des chaînes afin de valider le bon fonctionnement de notre implantation.

Une fois, la chaîne 8-PSK implantée, nous avons comparé entre les deux chaînes 8-PSK et 4-PSK ce qui a mis un terme à cette étude.