

# **RAPPORT TP Télécommunications**

KY Joël Roman

10/05/2019

## **Table des matières**

<b>1</b>	<b>Introduction</b>
<b>2</b>	<b>Etude de chaines de transmission en bande de base sur canal AWGN</b>
2.1	Chaîne 1
2.2	Chaîne 2
2.3	Chaîne 3
2.4	Chaîne 4
2.5	Chaîne 5
2.6	Comparaison efficacité spectrale et efficacité en puissance
<b>3</b>	<b>Etude de chaines de transmission sur fréquence porteuse, sur canal AWGN</b>
3.1	Chaîne de transmission QPSK
3.1.1	Implantation sur fréquence porteuse
3.1.2	Implantation sur chaîne passe-bas équivalente
3.2	Comparaison des modulations BPSK, QPSK, 8-PSK, 16-QAM
3.2.1	Chaîne BPSK
3.2.2	Chaîne 8-PSK
3.2.3	Chaîne 16-QAM
3.2.4	Comparaison efficacité spectrale et efficacité en puissance
<b>4</b>	<b>Conclusion</b>

## 1- Introduction

Les objectifs principaux de ce TP sont les suivants :

1. Être capable d'implanter une chaîne de transmission en bande de base et d'explicitier le rôle des différents éléments la composant,
2. Être capable d'analyser la chaîne de transmission en bande de base implantée pour :
  - déterminer si elle est optimisée ou pas en termes d'efficacité spectrale et d'efficacité en puissance,
  - identifier les éléments qu'il est possible de modifier pour l'optimiser si elle ne l'est pas.
3. Être capable d'implanter une chaîne de transmission sur fréquence porteuse de type PSK ou QAM et d'explicitier le rôle des différents éléments la composant,
4. Être capable de déterminer puis d'implanter la chaîne de transmission passe-bas équivalente à une chaîne de transmission sur fréquence porteuse de type PSK ou QAM,
5. Être capable de 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.

Ce TP fut essentiellement rédigé en **Matlab** et permettre de mettre en application notre cours de Télécommunications Numériques.

## 2- Etude de chaînes de transmission en bande de base

Nous avons implanté des chaînes de transmission en bande de base sur canal AWGN. Chaque chaîne est constitué d'une séquence de bits 0 et 1 équiprobables et indépendants, générés aléatoirement sur Matlab avec la fonction ***randi***. Chaque chaîne est ensuite modulé par un modulateur de type PAM :

- un mapping est réalisé pour générer les symboles ;
- une suite d'impulsions de Dirac espacés de la durée symbole  $T_s$  et pondérés par les symboles ;

- un filtre de mise en forme est ensuite réalisé et appliqué à la suite de Diracs pondérés .

Le canal de transmission ne fait qu'ajouter un bruit blanc et gaussien au signal en sortie du modulateur généré par la fonction **randn** de Matlab avec une moyenne nulle et une puissance  $\sigma^2$  obtenue par :

$$\sigma_n^2 = \frac{P_r N_s}{2 \log_2(M) \frac{E_b}{N_o}}$$

avec  $N_s$  le facteur de suréchantillonnage,  $M$  l'ordre de la modulation,  $P_r$  la puissance du signal reçu.

Le signal bruité est ensuite passé dans un démodulateur :

- un filtre de réception est appliqué au signal canal
- le signal canal est ensuite échantillonné
- un détecteur à seuil permet d'effectuer la décision
- et un démapping est effectué pour récupérer les bits.

## 2.1 Chaîne 1

La chaîne 1 est réalisée avec un Mapping binaire à moyenne nulle Mapping binaire à moyenne nulle (symboles  $a_k \in \{-1, 1\}$ ). La mise en forme est rectangulaire de durée  $T_s$  (forme d'onde du GPS), filtre de réception de réponse impulsionnelle rectangulaire de durée  $T_s$ .

Le tracé du diagramme de l'oeil obtenu sans bruit à la sortie du filtre de réception est le suivant :

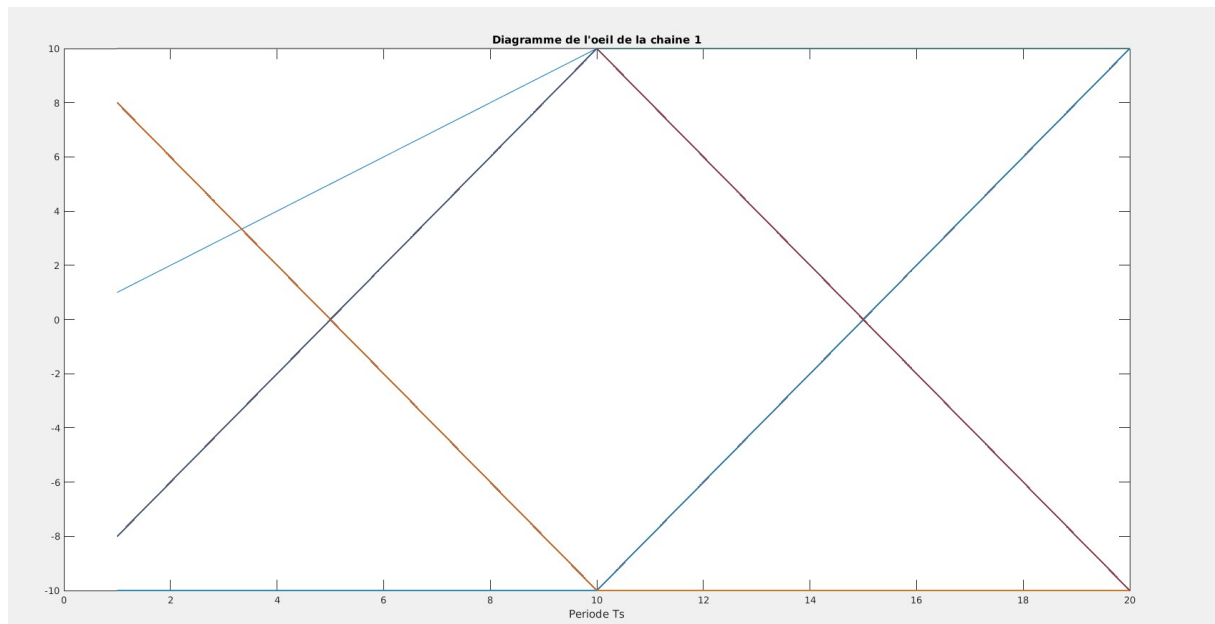


Figure 1 : Tracé du diagramme de l'oeil

L'observation du diagramme de l'oeil nous montre que l'oeil est ouvert à l'instant  $t_o = T_s$ , et que le seuil optimal de détection sera **0** car la probabilité d'erreur est minimisée en ce point. Le TEB sans bruit est bien nul

Le tracé du TEB après rajout du bruit donne le tracé suivant en fonction du rapport signal à bruit à l'entrée du récepteur en décibels.

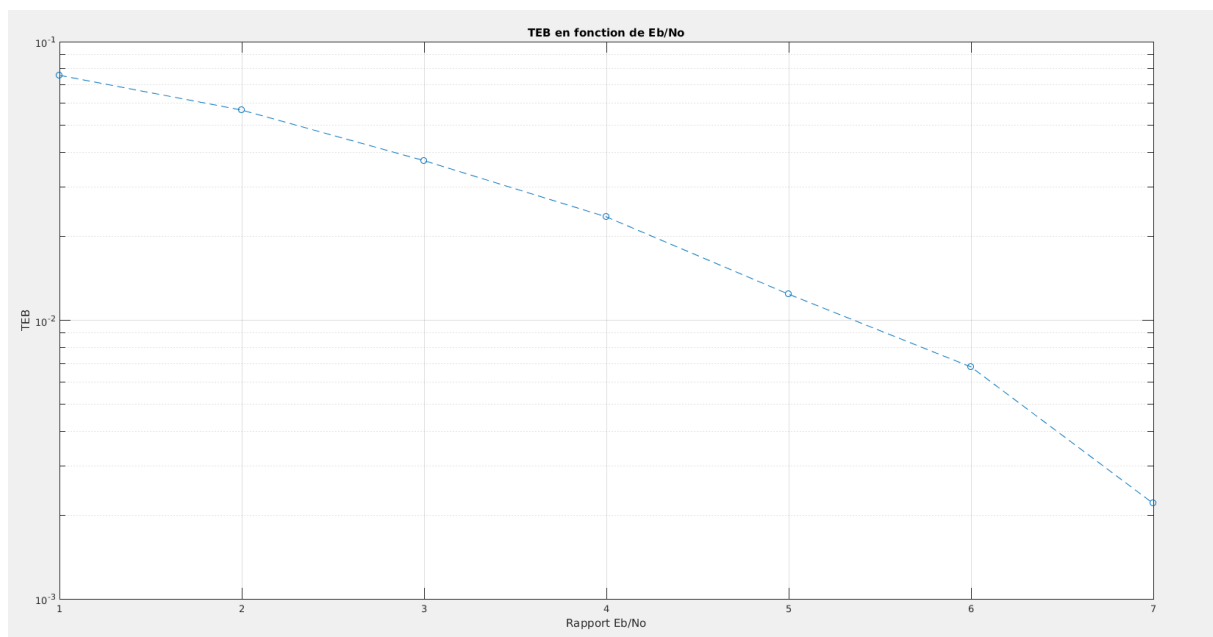


Figure 2 : Tracé du TEB simulé en fonction de  $\frac{E_b}{N_o}$  en Db.

La formule du calcul du TEB théorique de la chaîne est celle donnée par le cours qui est la suivante :

$$TEB \approx TES_{min} = Q\left(\sqrt{2\frac{E_b}{N_o}}\right)$$

En effet la chaîne respecte le critère de Nyquist car l'instant d'échantillonnage est tel qu'on a la suppression des Interférences entre Symboles. Aussi , le seuil de décision est bien en 0. Le filtrage est bien un filtrage adapté car la réponse impulsionnelle du filtre de réception respecte bien la formule  $h_r(t) = \lambda h(t_0 - t)$  où h désigne la réponse impulsionnelle du filtre de mise en forme. Le mapping étant binaire on a bien

$$TEB \approx \frac{TES}{\log_2}(M) \quad .$$

La courbe montrant la superposition entre le TEB théorique et le TEB simulé de la chaîne est la suivante :

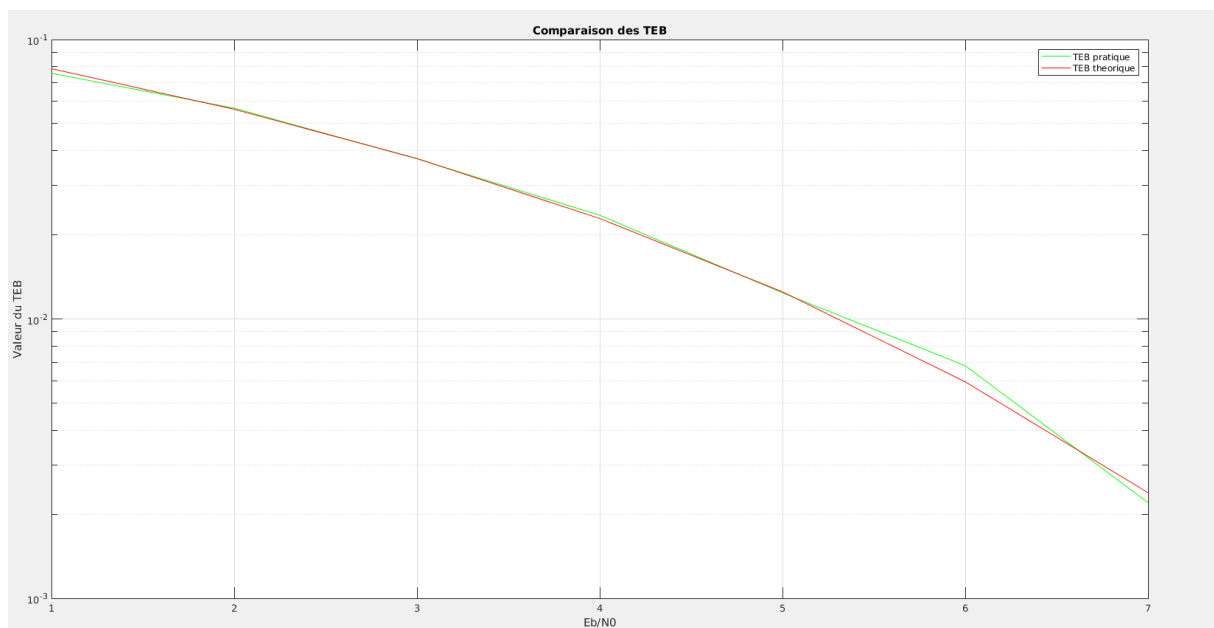


Figure 3 : TEB simulé et TEB théorique

## 2.1 Chaîne 2

La chaîne 2 est réalisé avec un Mapping binaire à moyenne nulle Mapping binaire à moyenne nulle (symboles  $a_k \in \{0, 1\}$ ). La mise en forme est rectangulaire de durée  $T_s$

(forme d'onde du GPS), filtre de réception de réponse impulsionnelle rectangulaire de durée  $T_s$ .

Le tracé du diagramme de l'oeil obtenu sans bruit à la sortie du filtre de reception est le suivant :

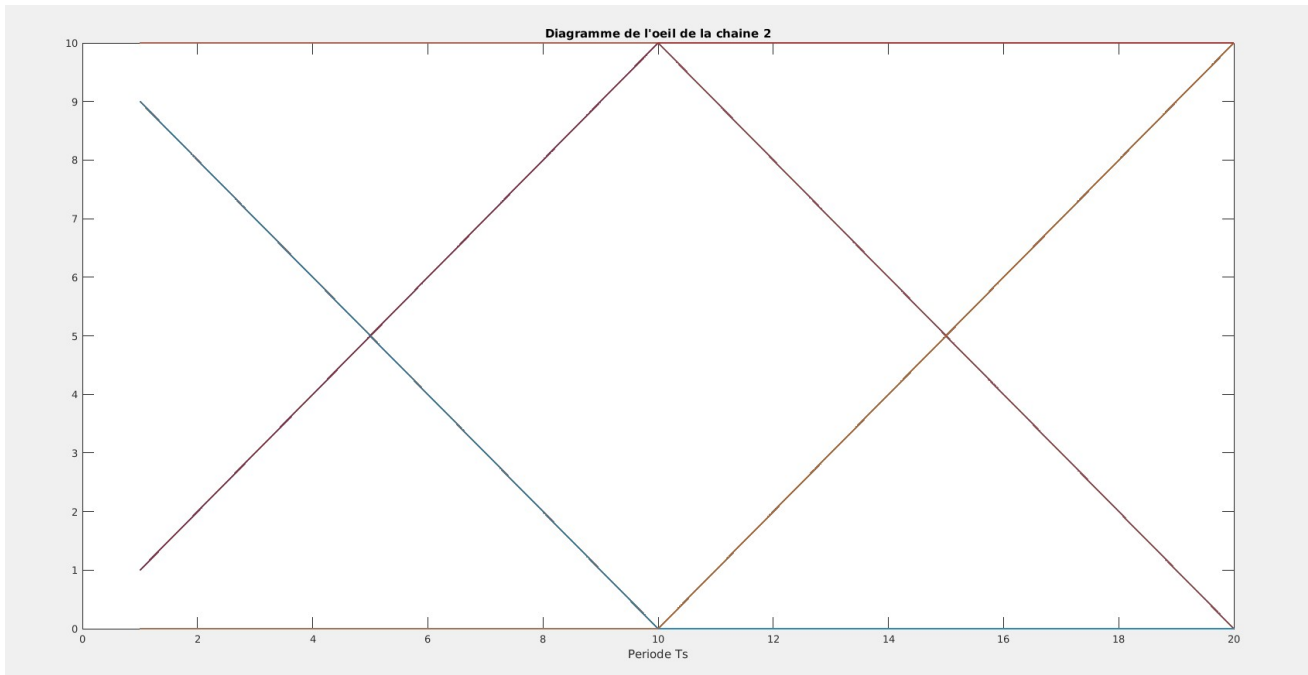
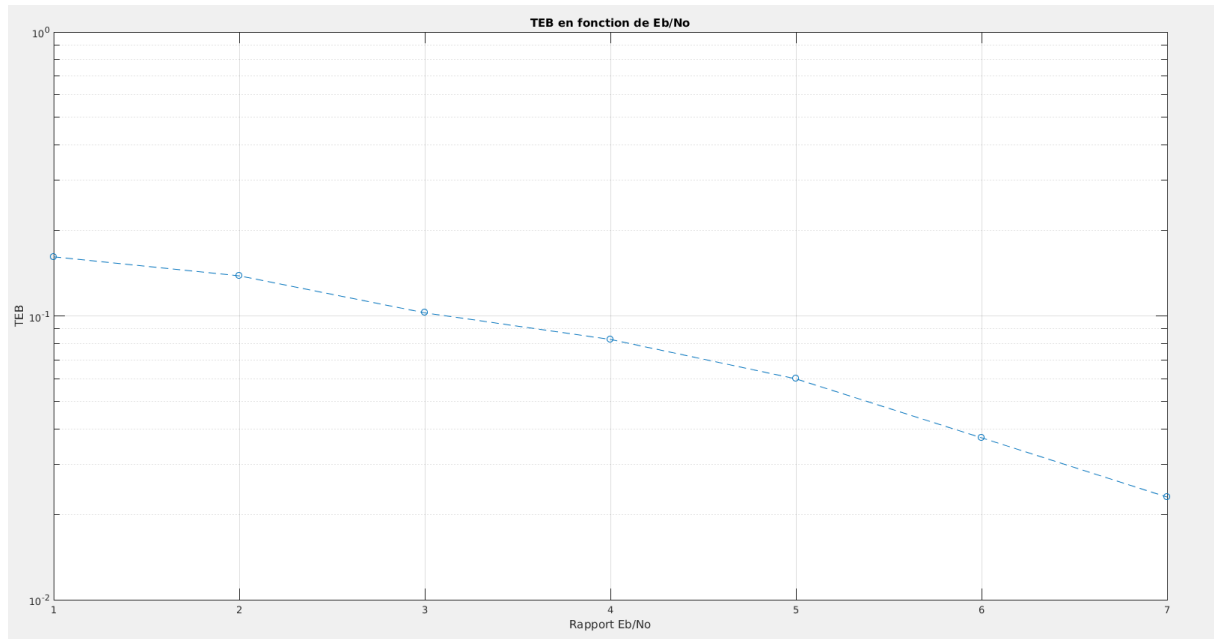


Figure 4 : Tracé du diagramme de l'oeil

L'observation du diagramme de l'oeil nous montre que l'oeil est ouvert à l'instant  $t_o = T_s$ , et que le seuil optimal de détection sera 5 car la probabilité d'erreur est minimisée en ce point. Le TEB sans bruit est bien nul

Le tracé du TEB après rajout du bruit donne le tracé suivant en fonction du rapport signal à bruit à l'entrée du récepteur en décibels.



**Figure 5 :** Tracé du TEB simulé en fonction de  $\frac{E_b}{N_o}$  en Db.

La formule du calcul du TEB théorique de la chaîne n'est pas donnée par le cours. Elle est obtenue de la façon suivante :

$$TES_{min} = Q\left(\frac{D_{min}}{2\sigma}\right) = Q\left(\frac{Vg(t_o)}{2\sigma}\right)$$

Or  $V=1$  et  $g(t_o)=T_s$  d'où  $TES_{min} = Q\left(\frac{T_s}{2\sigma}\right)$

Mais comme  $E_s = P_s T_s$  avec  $P_s = E[|x(t)|^2] = 1$  on a alors  $E_s = T_s$

$$\text{De plus } \sigma^2 = \int S_x(f) df = \frac{N_o}{2} \int |h(t)|^2 dt = N_o \frac{T_s}{4}$$

$$\text{d'où } TES_{min} = Q\left(\sqrt{\frac{T_s}{N_o}}\right)$$

En effet la chaîne respecte le critère de Nyquist car l'instant d'échantillonnage est tel qu'on a la suppression des Interférences entre Symboles. Aussi, le seuil de décision est bien en 0. Le filtrage est bien un filtrage adapté car la réponse impulsionnelle du filtre de réception respecte bien la formule  $h_r(t) = \lambda h(t_0 - t)$  où  $h$  désigne la réponse impulsionnelle du filtre de mise en forme. Le mapping étant binaire on a bien

$$\text{Et vu que } E_s = 2^n E_b \text{ avec } n = \log_2(M) \text{ on a alors } TES = Q\left(\sqrt{\frac{Eb}{\sigma}}\right)$$

$$TEB \approx \frac{TES}{\log_2(M)} = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}}\right) .$$

La courbe montrant la superposition entre le TEB théorique et le TEB simulé de la chaîne est la suivante :

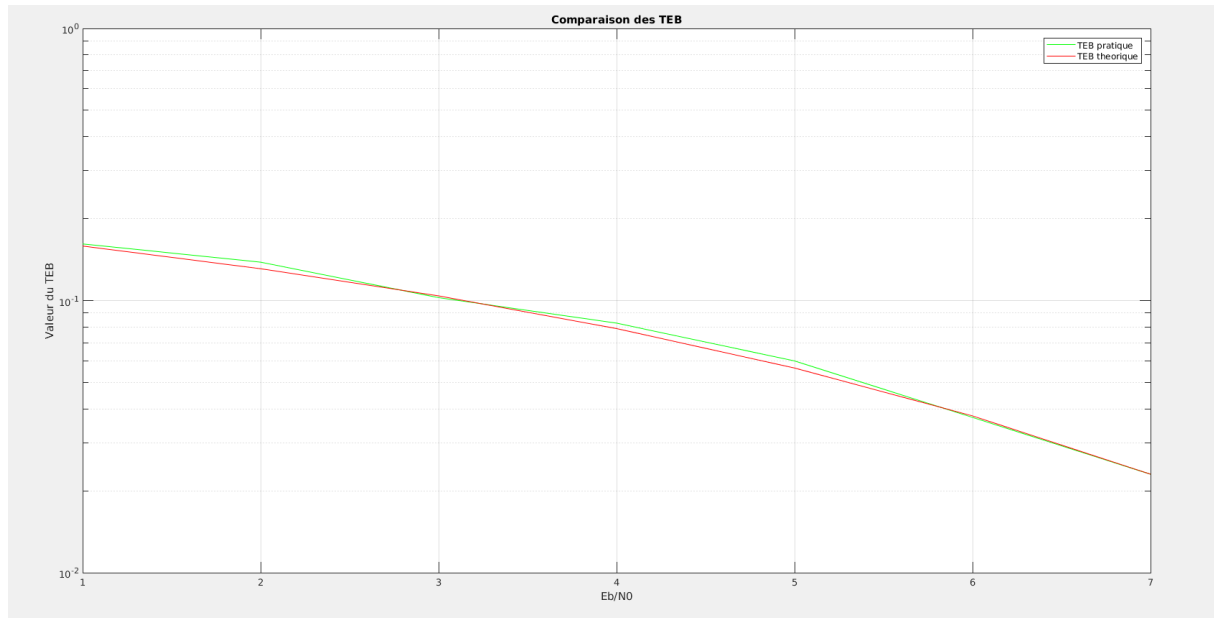


Figure 6 : TEB simulé et TEB théorique

### 2.3 Chaîne 3

La chaîne 3 est réalisée avec un Mapping binaire à moyenne nulle Mapping binaire à moyenne nulle (symboles  $a_k \in \{-1, 1\}$ ). La mise en forme est rectangulaire de durée  $T_s$  (forme d'onde du GPS), mais le filtre de réception est rectangulaire de durée  $T_s/2$ .

Le tracé du diagramme de l'oeil obtenu sans bruit à la sortie du filtre de réception est le suivant :



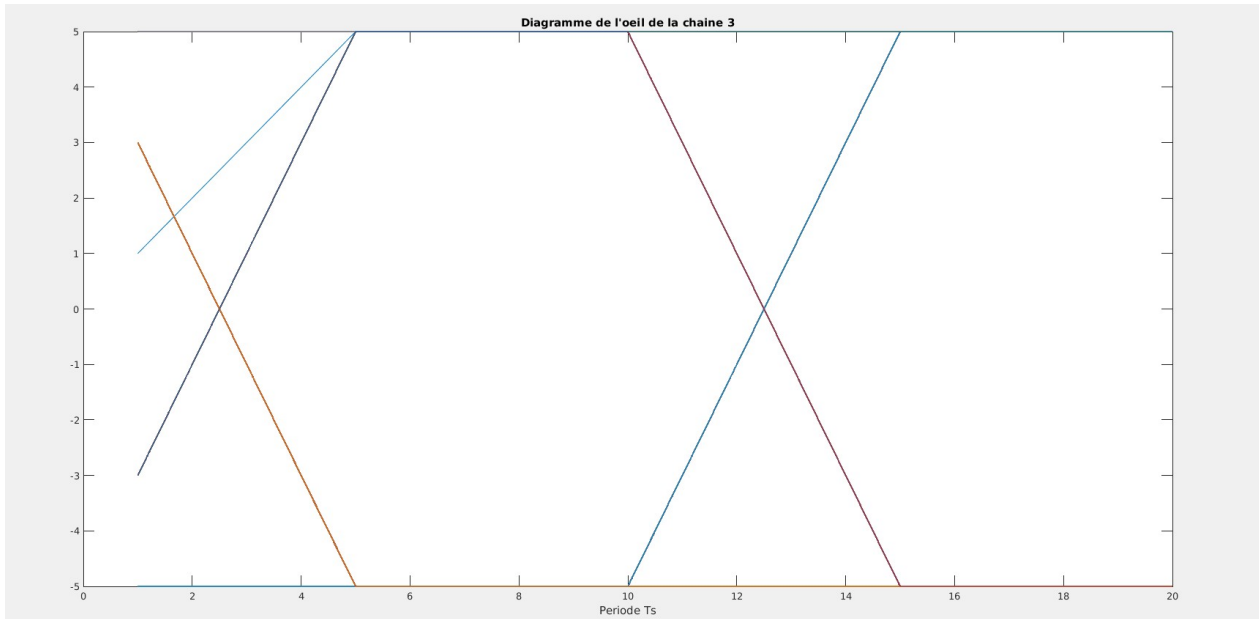


Figure 7: Tracé du diagramme de l'oeil

L'observation du diagramme de l'oeil nous montre que l'oeil est ouvert à l'instant

$t_o \in [\frac{T_s}{2}; T_s]$ , mais nous choisirons  $t_o = \frac{3T_s}{4}$ , et que le seuil optimal de détection sera **0** car la probabilité d'erreur est minimisée en ce point. Le TEB sans bruit est bien nul

Le tracé du TEB après rajout du bruit donne le tracé suivant en fonction du rapport signal à bruit à l'entrée du récepteur en décibels.

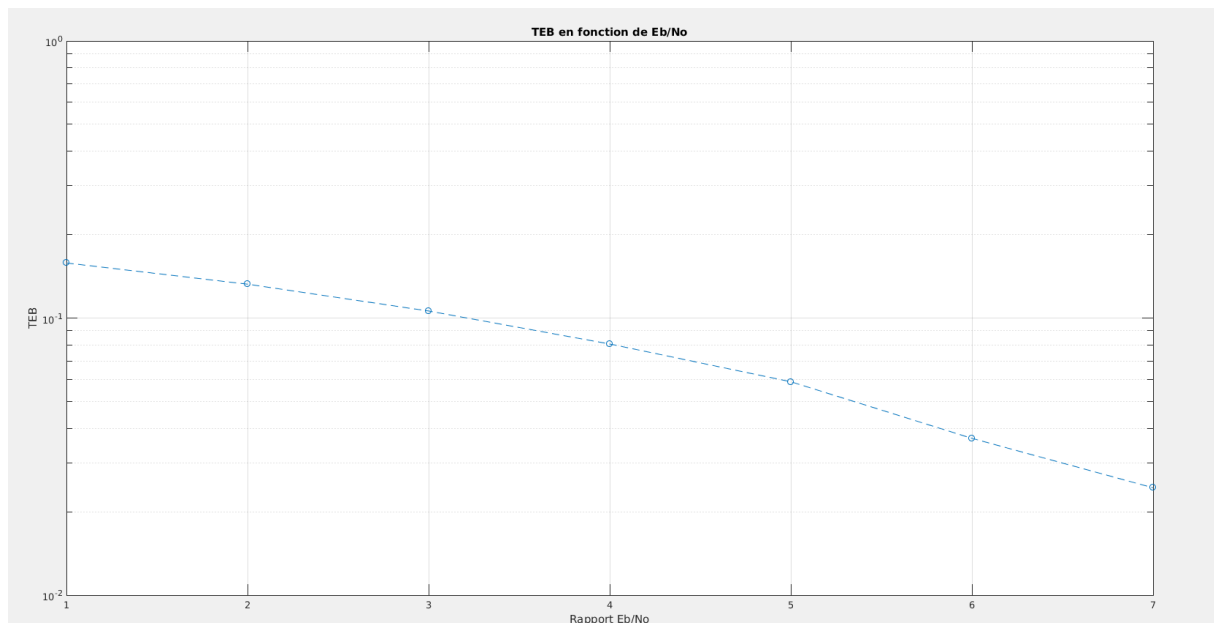


Figure 8 : Tracé du TEB simulé en fonction de  $\frac{E_b}{N_o}$  en Db.

La formule du calcul du TEB théorique de la chaîne est celle donnée par le cours qui est la suivante :

$$TEB \approx TES_{min} \approx Q\left(\sqrt{2\frac{E_b}{N_o}}\right)$$

En effet la chaîne respecte le critère de Nyquist car l'instant d'échantillonnage est tel qu'on a la suppression des Interférences entre Symboles. Aussi , le seuil de décision est bien en 0. Cependant, le filtrage de réception n'est pas adapté et donc la valeur du TES est approchée.

. Le mapping étant binaire on a bien  $TEB \approx \frac{TES}{\log_2(M)}$  .

La courbe montrant la superposition entre le TEB théorique et le TEB simulé de la chaîne est la suivante :

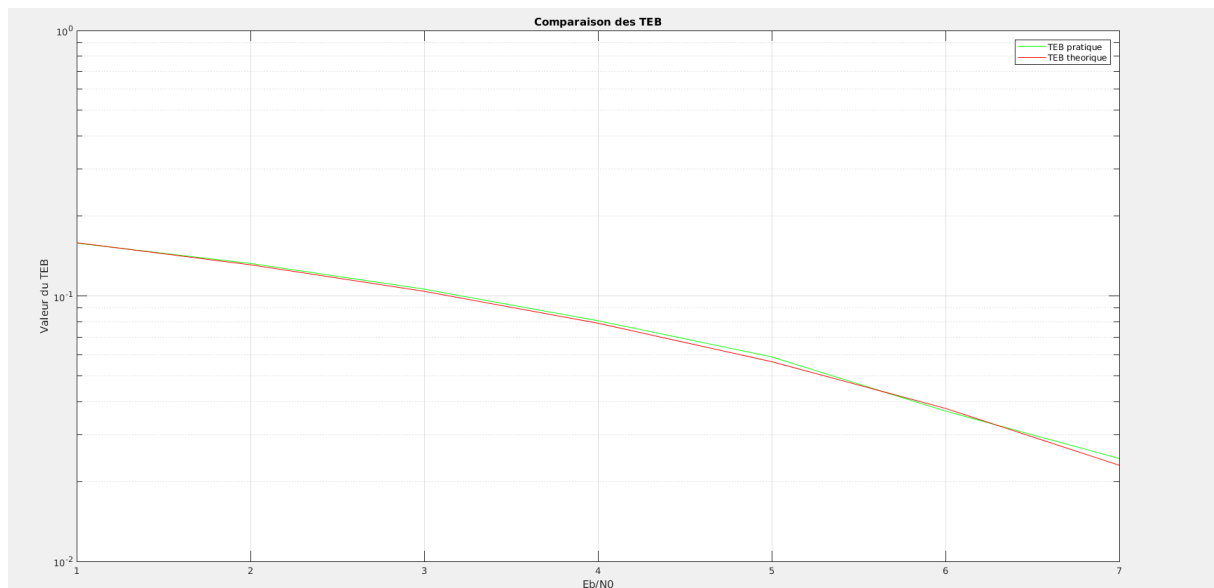


Figure 9 : TEB simulé et TEB théorique

## 2.4 Chaîne 4

La chaîne 4 est réalisée avec un Mapping binaire à moyenne nulle Mapping binaire à moyenne nulle (symboles  $a_k \in \{-1, 1\}$ ). La mise en forme est rectangulaire de durée  $T_s$  (forme d'onde du GPS), filtre de réception est adapté à la forme d'onde reçue.

Le tracé du diagramme de l'oeil obtenu sans bruit à la sortie du filtre de reception est le suivant :

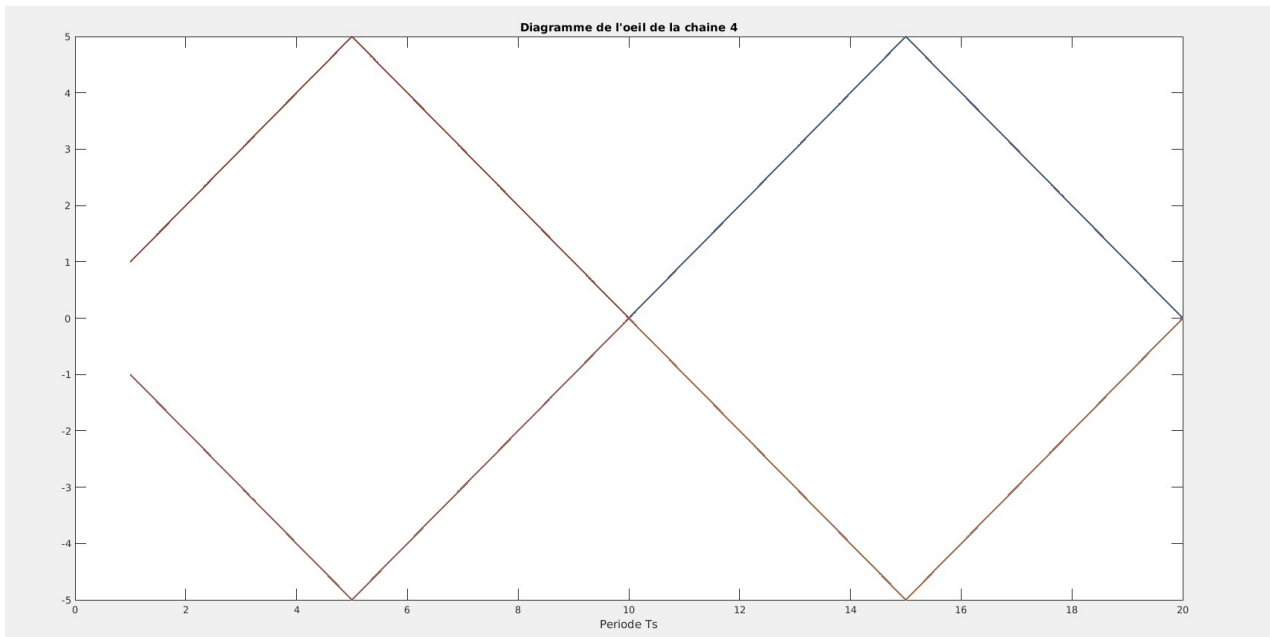


Figure 10 : Tracé du diagramme de l'oeil

L'observation du diagramme de l'oeil nous montre que l'oeil est ouvert à l'instant

$$t_o = \frac{T_s}{2}, \text{ et que le seuil optimal de détection sera } \mathbf{0} \text{ car la probabilité d'erreur est}$$

minimisé en ce point. Le TEB sans bruit est bien nul

Le tracé du TEB après rajout du bruit donne le tracé suivant en fonction du rapport signal à bruit à l'entrée du récepteur en décibels.

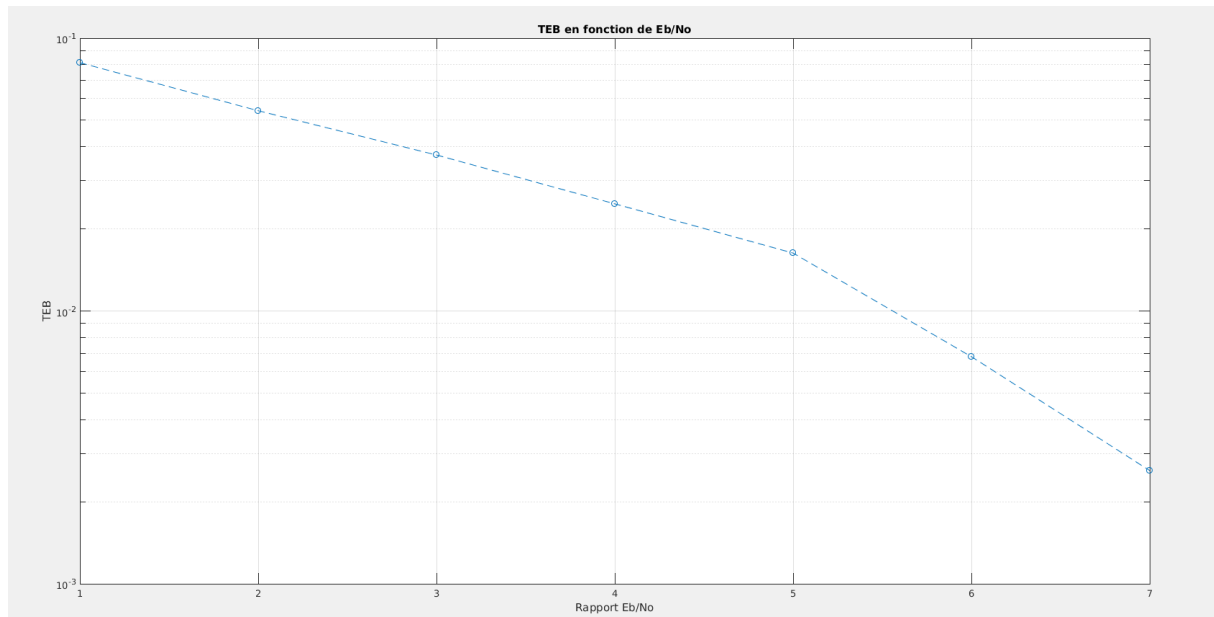


Figure 11 : Tracé du TEB simulé en fonction de  $\frac{E_b}{N_o}$  en Db

La formule du calcul du TEB théorique de la chaîne est celle donnée par le cours qui est la suivante :

$$TEB \approx TES_{min} = Q\left(\sqrt{2 \frac{E_b}{N_o}}\right)$$

En effet la chaîne respecte le critère de Nyquist car l'instant d'échantillonnage est tel qu'on a la suppression des Interférences entre Symboles. Aussi , le seuil de décision est bien en 0. Le filtrage est bien un filtrage adapté car la réponse impulsionnelle du filtre de réception respecte bien la formule  $h_r(t) = \lambda h(t_0 - t)$  où h désigne la réponse impulsionnelle du filtre de mise en forme. Le mapping étant binaire on a bien

$$TEB \approx \frac{TES}{\log_2}(M) \quad .$$

La courbe montrant la superposition entre le TEB théorique et le TEB simulé de la chaîne est la suivante :

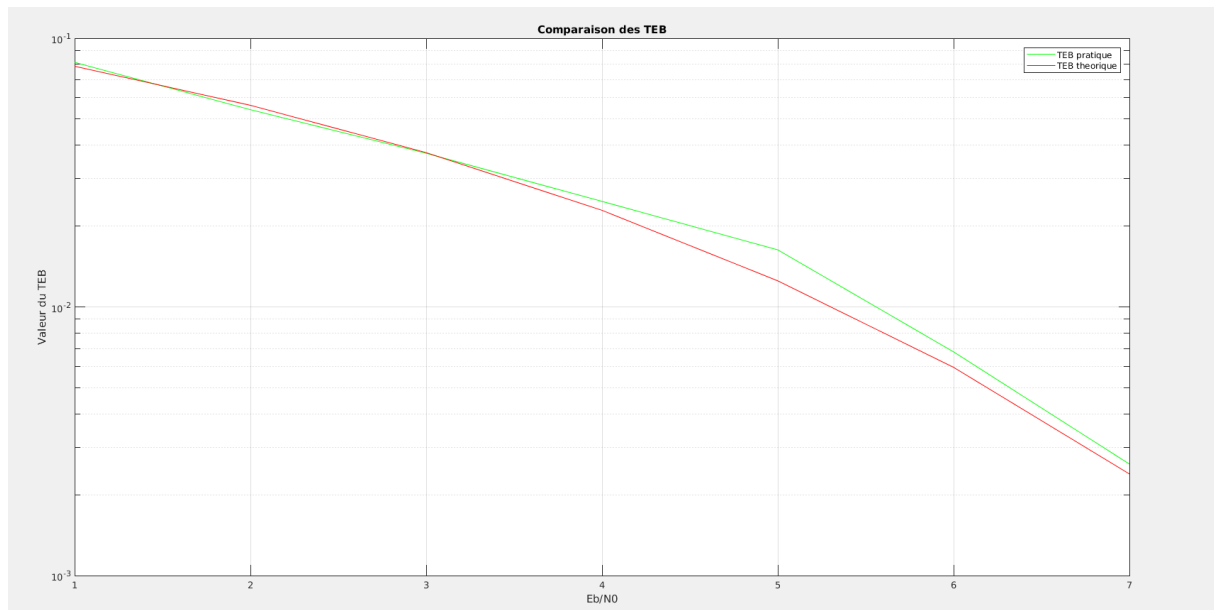


Figure 12 : TEB simulé et TEB théorique

## 2.5 Chaîne 5

La chaîne 5 est réalisée avec un Mapping binaire à moyenne nulle Mapping binaire à moyenne nulle (symboles  $a_k \in \{-1, 1\}$ ). La mise en forme est un filtre en racine de cosinus surélevé de roll off 0,35 (forme d'onde du DVB-S), le filtre de réception est adapté à la forme d'onde reçue.

Le tracé du diagramme de l'oeil obtenu sans bruit à la sortie du filtre de réception est le suivant :

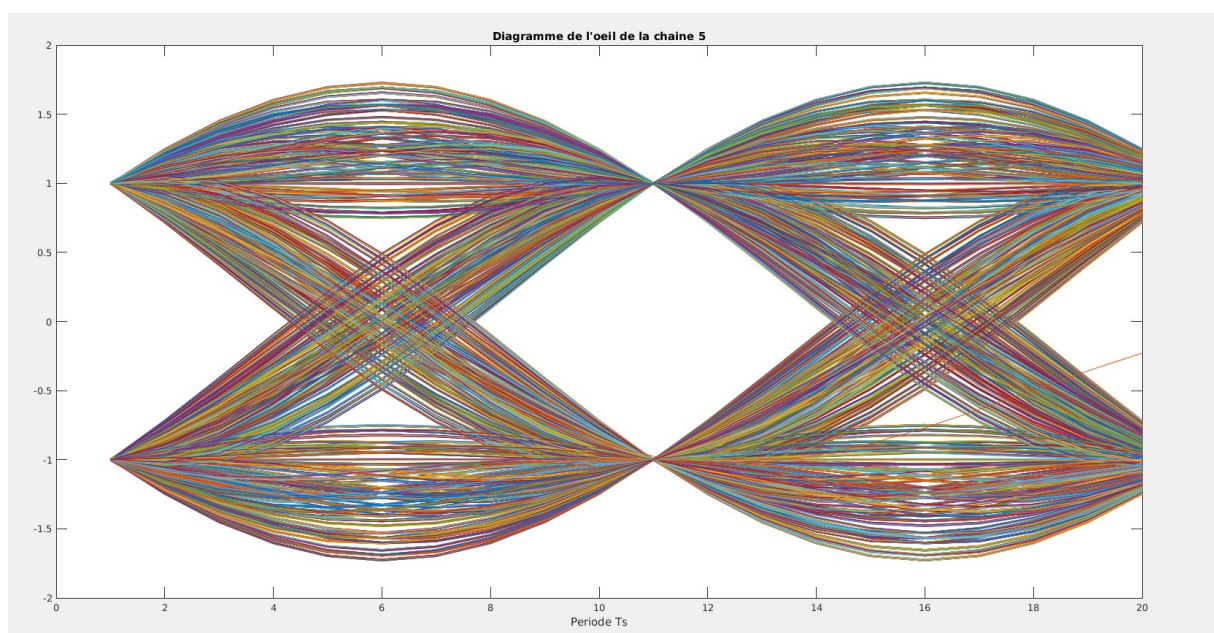


Figure 13 : Tracé du diagramme de l'oeil

L'observation du diagramme de l'oeil nous montre que l'oeil est ouvert à l'instant  $t_o = 1$ , et que le seuil optimal de détection sera **0** car la probabilité d'erreur est minimisée en ce point. Le TEB sans bruit est bien nul

Le tracé du TEB après rajout du bruit donne le tracé suivant en fonction du rapport signal à bruit à l'entrée du récepteur en décibels.

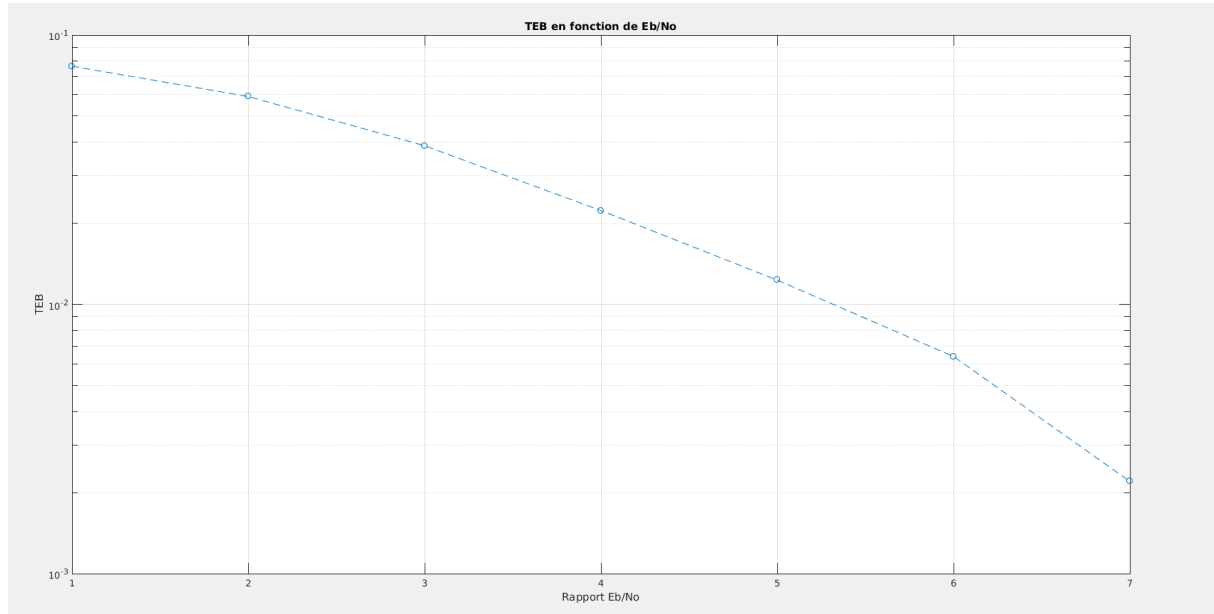


Figure 14 : Tracé du TEB simulé en fonction de  $\frac{E_b}{N_o}$  en Db

La formule du calcul du TEB théorique de la chaîne est celle donnée par le cours qui est la suivante :

$$TEB \approx TES_{min} = Q\left(\sqrt{2 \frac{E_b}{N_o}}\right)$$

En effet la chaîne respecte le critère de Nyquist car l'instant d'échantillonnage est tel qu'on a la suppression des Interférences entre Symboles. Aussi, le seuil de décision est bien en 0. Le filtrage est bien un filtrage adapté car la réponse impulsionnelle du filtre de réception respecte bien la formule  $h_r(t) = \lambda h(t_0 - t)$  où  $h$  désigne la réponse impulsionnelle du filtre de mise en forme. Le mapping étant binaire on a bien

$$TEB \approx \frac{TES}{\log_2}(M) \text{ .}$$

La courbe montrant la superposition entre le TEB théorique et le TEB simulé de la chaîne est la suivante :

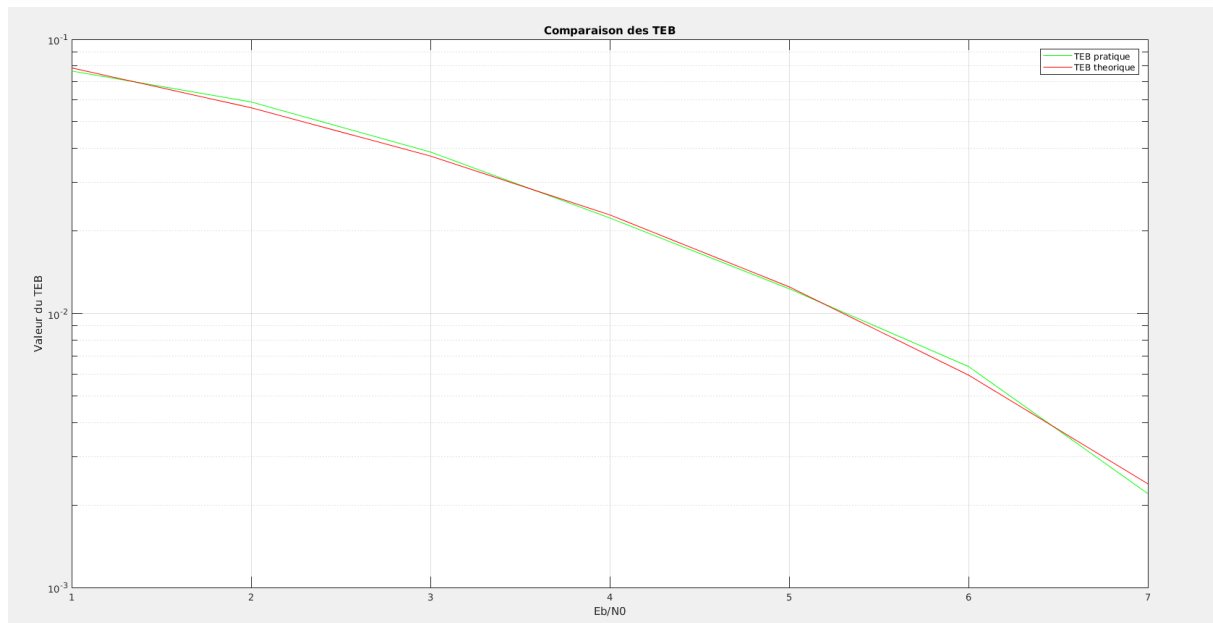


Figure 15 : TEB simulé et TEB théorique

## 2.6- Comparaison efficacité spectrale – efficacité en puissance

Pour la comparaison en efficacité spectrale  $\eta$ , on sait que l'efficacité spectral d'un signal est lié à la bande occupée par ce signal. Or cette bande est proportionnelle au débit symbole  $R_s$  et d'un coefficient de proportionnalité  $k$  dépendant du filtre de mise en forme utilisé.

Or on a :  $R_s = \frac{R_b}{\log_2(M)}$  d'où  $R_b = R_s * \log_2(M)$

L'efficacité spectrale est définie comme étant le rapport entre le débit binaire et la bande occupée par le signal  $B$ .

$$B = k * R_s \text{ avec } k \text{ coefficient de proportionnalité d'où } \eta = \frac{R_b}{B} = \frac{\log_2(M)}{k}$$

Dans les chaines étudiées ci-dessus nous avons toujours  $M = 2$

Donc, l'efficacité spectrale  $\eta$  sera d'autant plus grande que le coefficient de proportionnalité  $k$  est petit.

Or, un filtre de mise en forme rectangulaire a une bande théoriquement infinie, tandis qu'un filtre en racine de cosinus surélevé possède un coefficient

$$k = \frac{(1+\alpha)}{2T_s} \text{ avec } \alpha \text{ coefficient de roll off}$$

Donc la chaîne la plus performante en termes d'efficacité spectrale est bien la **chaîne 5**.

La figure suivante représente la superposition des TEB simulés des différentes chaînes de transmission implantées.

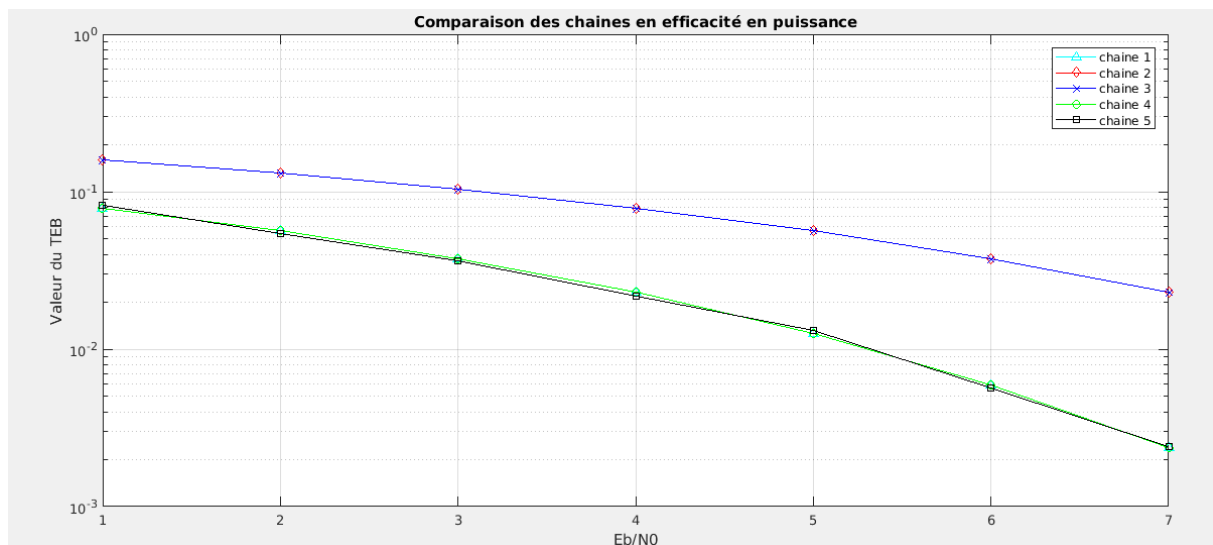


Figure 16 : Comparaison efficacité en puissance

Et donc il ressort que pour une valeur de  $\frac{E_b}{N_o}$  fixée, les chaînes qui présentent le TEB le plus bas sont les **chaînes 1, 4 et 5**. Ce sont donc les chaînes les plus performantes en termes de puissance.

Et donc la chaîne la plus efficace en termes de puissance et de bande spectrale est bien la **chaîne 5**.

### 3- Chaîne de transmission sur fréquence porteuse, sur canal AWGN

#### 3.1- Chaîne de transmission QPSK

##### 3.1.1- Implantation sur fréquence porteuse

L'implantation sur fréquence porteuse de la chaîne QPSK a été réalisée comme le montre la figure ci-dessous, avec un mapping de Gray, facteur de suréchantillonnage de sorte à respecter le critère de Shannon. La mise en forme est un filtre en racine de



cosinus surélevé de roll off 0,35, le canal de transmission est supposé AWGN et le récepteur optimal.

Une transposition de fréquence est de plus réalisée avant l'ajout du canal de transmission, et ensuite un retour en bande de base est effectué avant la démodulation qui est identique que celle réalisée en bande de base.

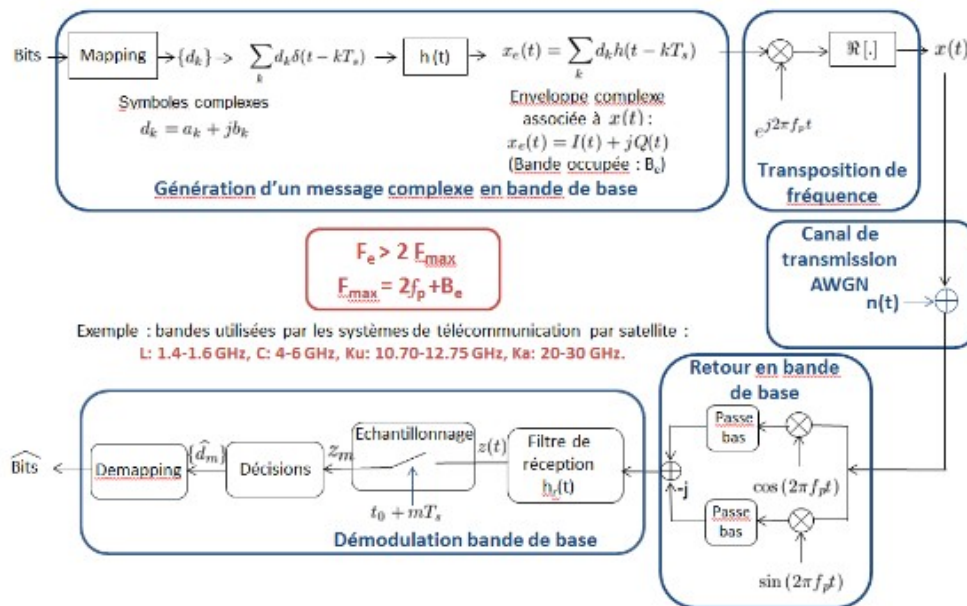


Figure 1: Chaîne de transmission sur porteuse

Le mapping de la chaîne QPSK est de type  $\{00; 01; 11; 10\}$ . La mise en forme est un filtre en racine de cosinus surélevé et celui de réception est adapté au filtre de mise en forme.

Le tracé des signaux générés sur les voies en phase et en quadrature est donné par la figure ci-après :

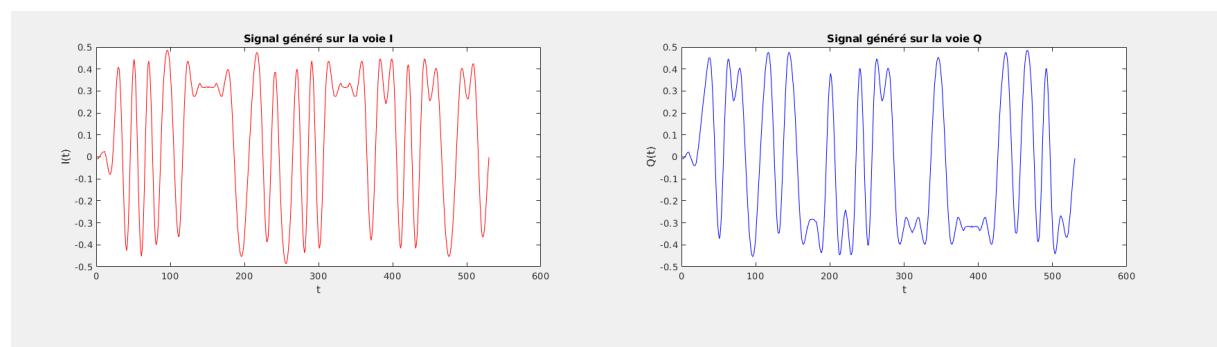


Figure 17 : Signaux générés sur les voies en phase et en quadrature

Le tracé du signal transmis à la porteuse est donné par la figure suivante :

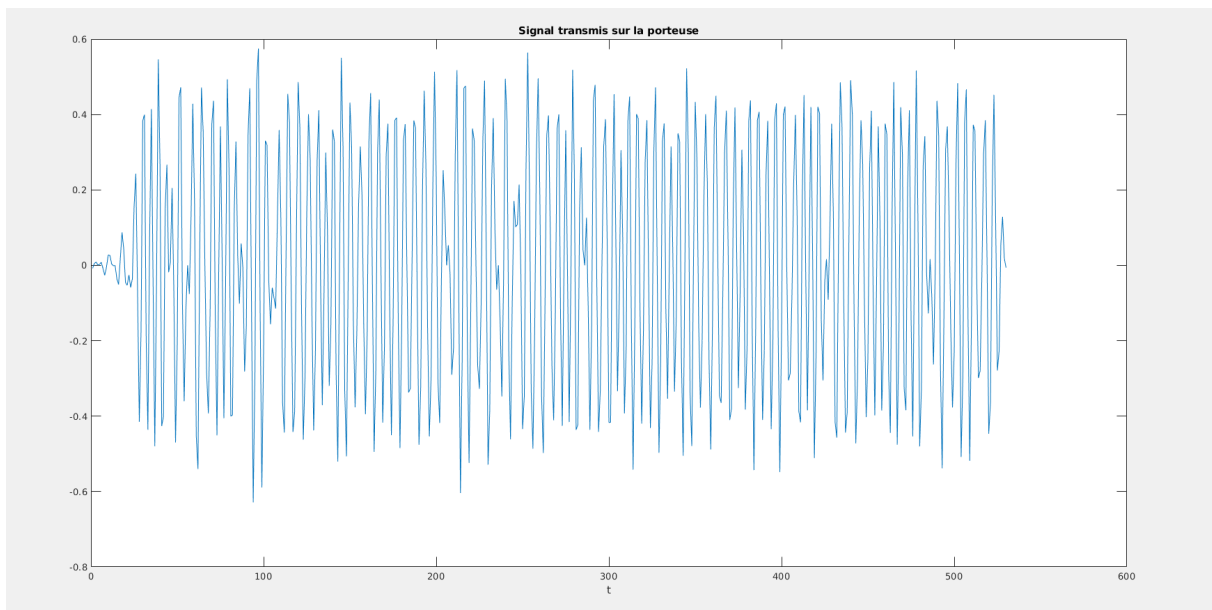


Figure 18 : Signal transmis à la porteuse

Le tracé de la densité spectrale de puissance, effectué par la méthode du périodogramme, est donné par la figure suivante :

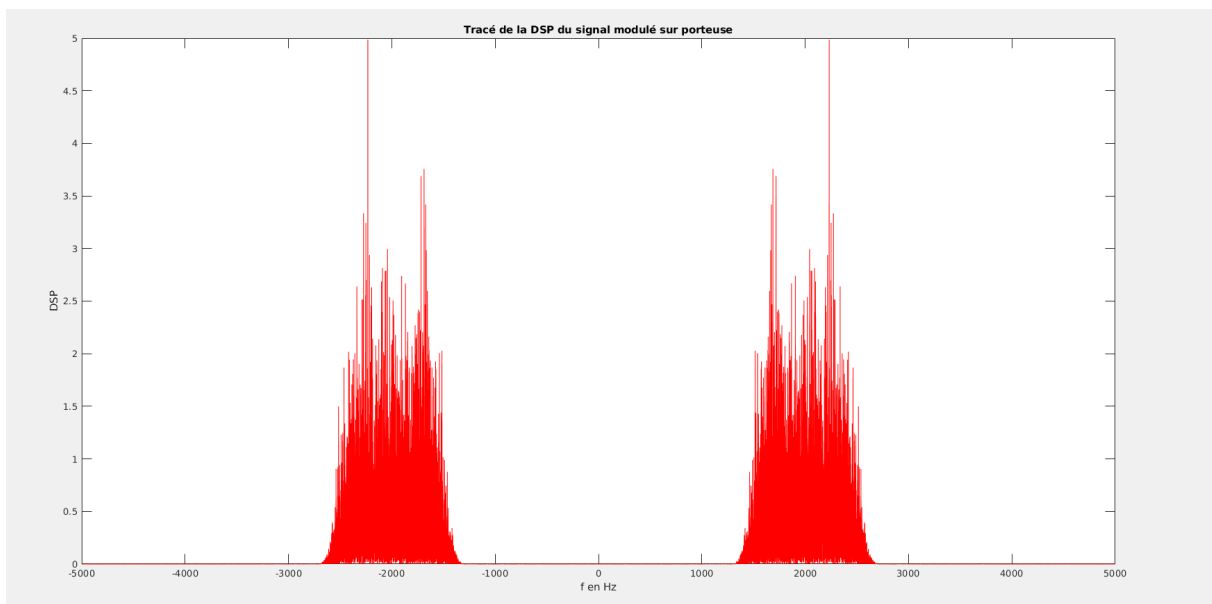


Figure 19 : Tracé de la DSP du signal

Le tracé du diagramme de l'oeil des voies I et Q de la chaine est donné ci-après :

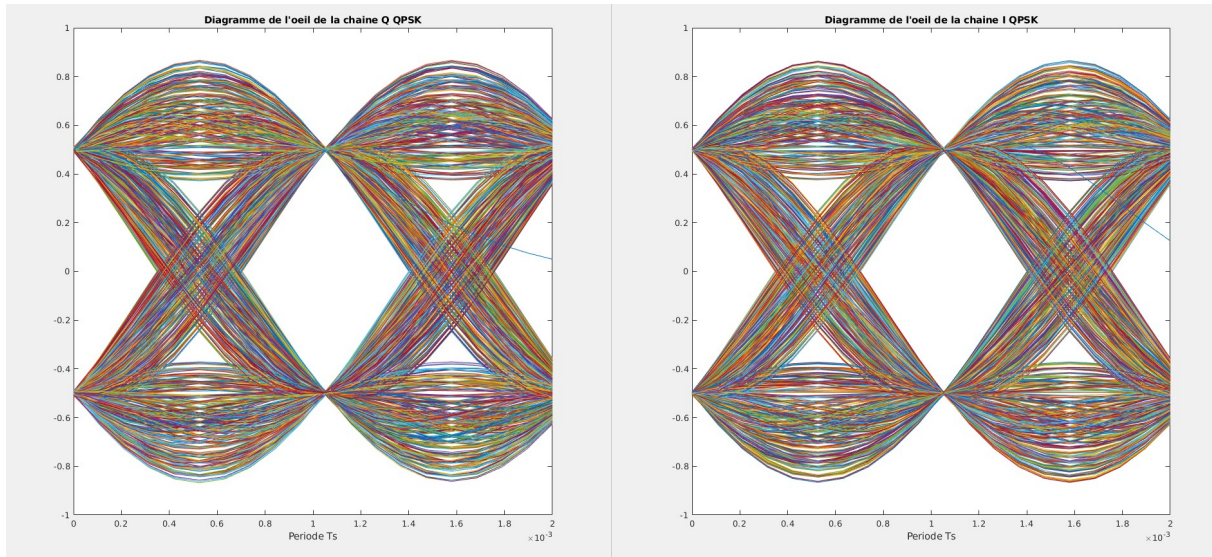


Figure 20 : Tracé des diagrammes de l'oeil des chaines I et Q

L'observation des diagrammes de l'oeil nous montre que l'oeil est ouvert à l'instant  $t_o = T_s$ , et que le seuil optimal de détection sera **0** car la probabilité d'erreur est minimisée en ce point. Le TEB sans bruit est bien nul

Le tracé du TEB après rajout du bruit donne le tracé suivant en fonction du rapport signal à bruit à l'entrée du récepteur en décibel est le suivant :

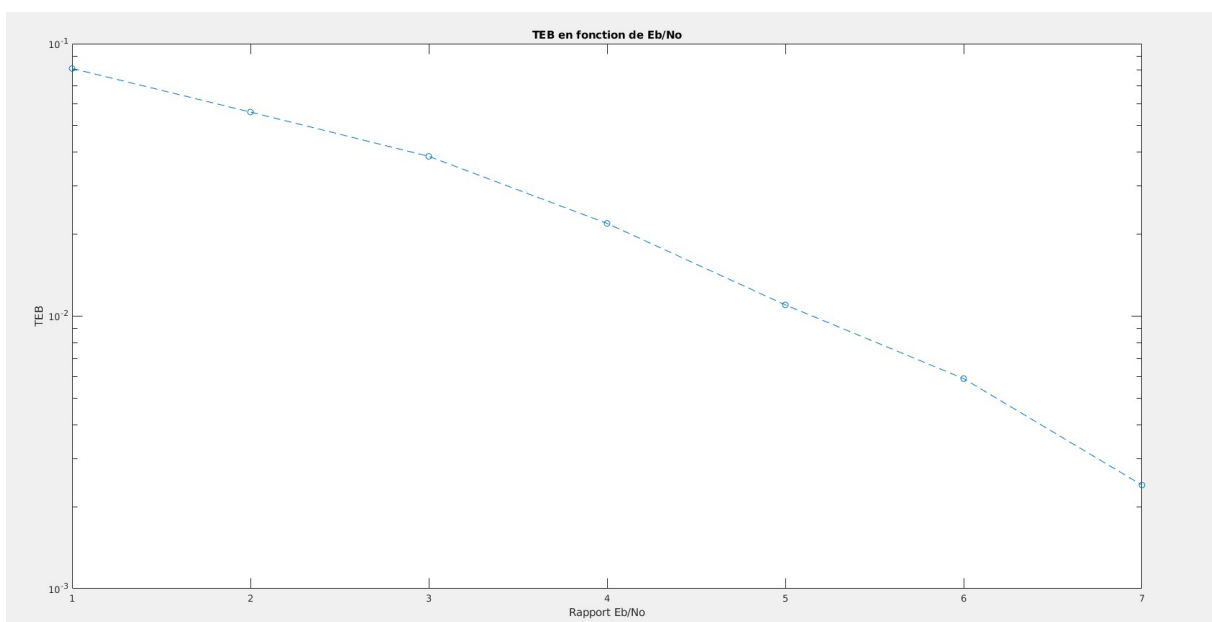


Figure 21 : Tracé du TEB simulé

La formule du calcul du TEB théorique de la chaîne QPSK est celle donnée par le cours qui est la suivante :

$$TEB \approx TES_{min} = 4 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q \left( \sqrt{\frac{3 \log_2(M) E_b}{(M-1) N_o}} \right)$$

En effet la chaîne respecte le critère de Nyquist car l'instant d'échantillonnage est tel qu'on a la suppression des Interférences entre Symboles. Aussi , le seuil de décision est bien en 0. Le filtrage est bien un filtrage adapté car la réponse impulsionnelle du filtre de réception respecte bien la formule  $h_r(t) = \lambda h(t_0 - t)$  où  $h$  désigne la réponse impulsionnelle du filtre de mise en forme. Le mapping étant de Gray on a bien

$$TEB \approx \frac{TES}{\log_2}(M) \text{ .}$$

La courbe montrant la superposition entre le TEB théorique et le TEB simulé de la chaîne est la suivante :

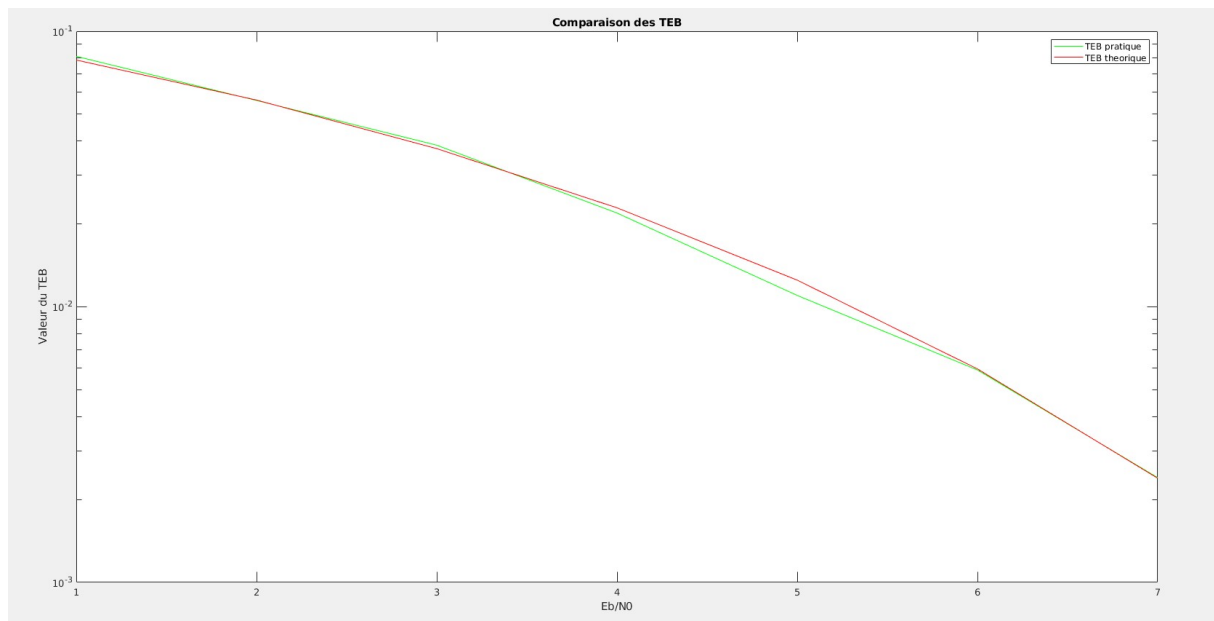


Figure 22 : Tracé de la superposition du TEB simulé et du TEB théorique

### 3.1.2- Implantation sur chaîne passe-bas équivalente

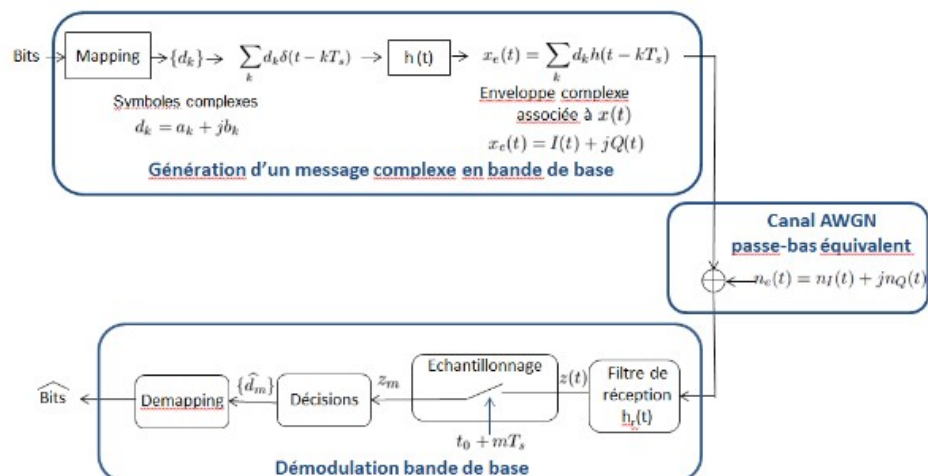
L'implantation sur chaîne passe-bas équivalente de la chaîne QPSK a été réalisée comme le montre la figure ci-dessous. Elle est identique à celle sur fréquence porteuse, sauf que on supprime la transposition en fréquence et le retour en bande de base et on remplace le canal de transmission par un bruit complexe de la forme

$n_e(t) = n_I(t) + jn_Q(t)$  où  $n_I$  et  $n_Q$  représentent le bruit associé aux voies I et Q.

Ces bruits possèdent une même puissance qui est calculée  $\sigma^2$  en fonction du rapport signal à bruit à l'entrée du récepteur.

$$\sigma_I^2 = \sigma_Q^2 = \frac{P_r N_s}{2 \log_2(M) \frac{E_b}{N_o}}$$

Le mapping de la chaîne QPSK est de type {00 ; 01 ; 11 ; 10}. La mise en forme est un filtre en racine de cosinus surélevé et celui de réception est adapté au filtre de mise en forme.



Le tracé des signaux générés sur les voies en phase et en quadrature est donné par la figure ci-après :

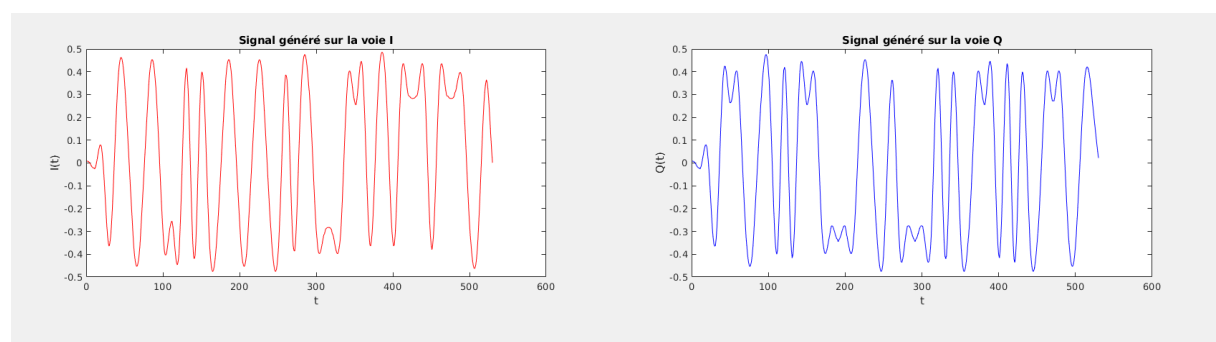


Figure 23 : Signaux générés sur les voies en phase et en quadrature

Le tracé de la densité spectrale de puissance, effectué par la méthode du périodogramme, est donné par la figure suivante.

On remarque que comparé à celui effectué sur porteuse la DSP est centrée en 0 tandis que celle obtenue sur simulation avec porteuse est centrée autour des valeurs

$$f_p \text{ et } -f_p \text{ .}$$

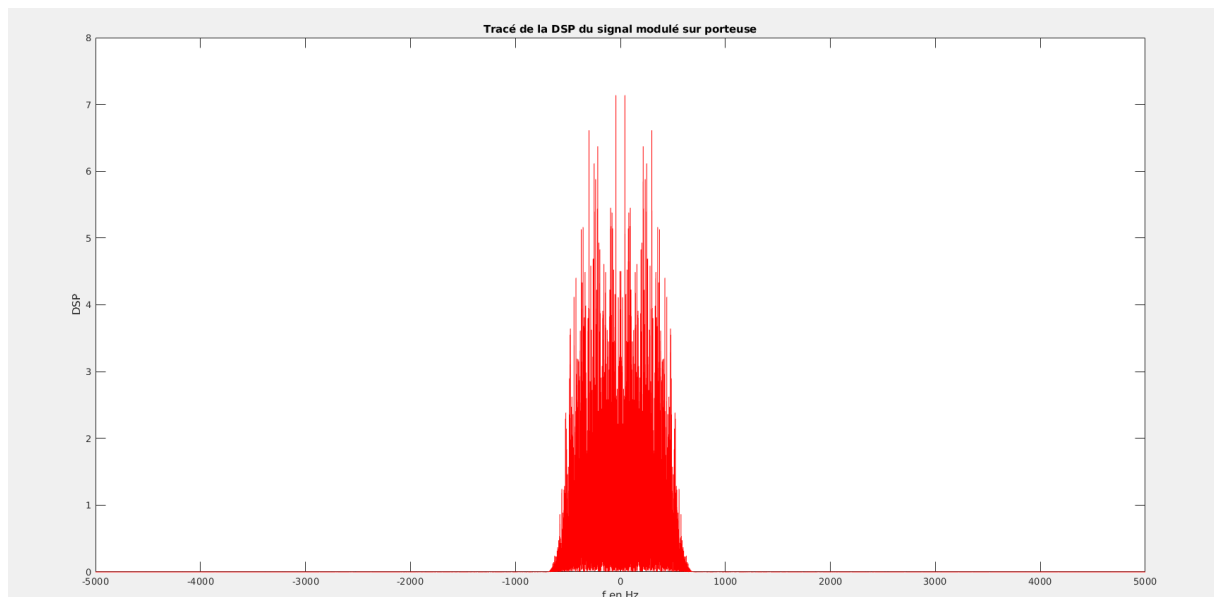


Figure 24 : Tracé de la DSP du signal

Le tracé des constellations de la chaine QPSK en sortie du mapping est le suivant :

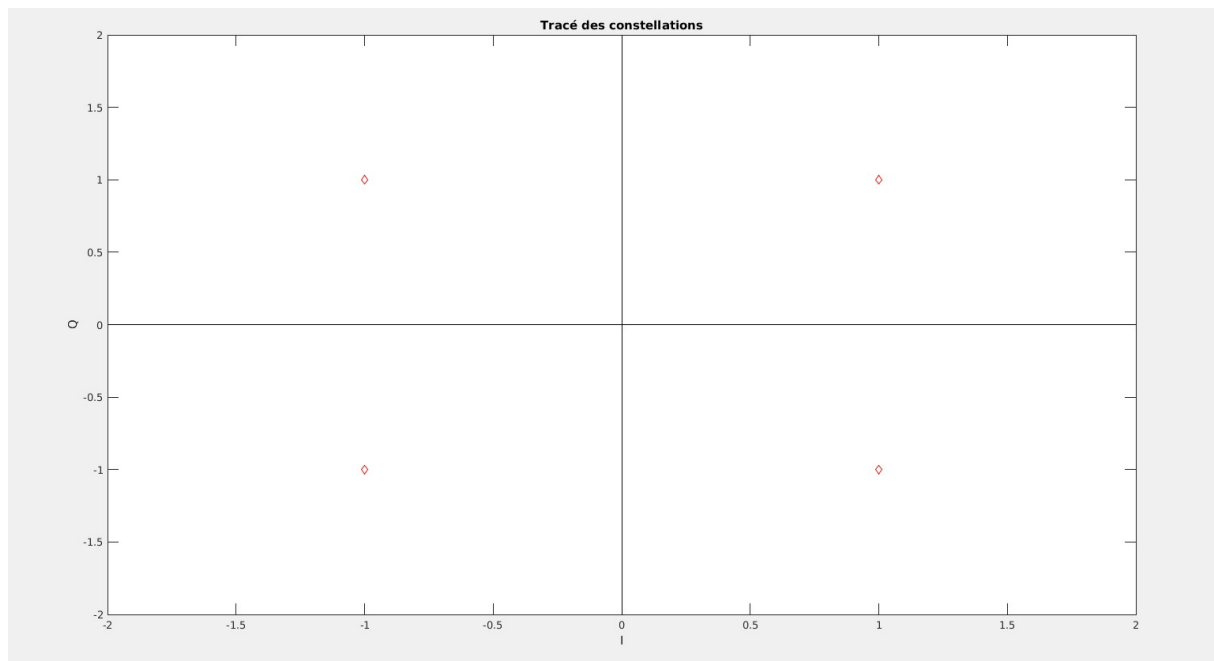


Figure 25 : Tracé des constellations en sortie du mapping du signal

Le tracé des constellations pour différentes valeurs du rapport  $\frac{E_b}{N_o}$  est le suivant :

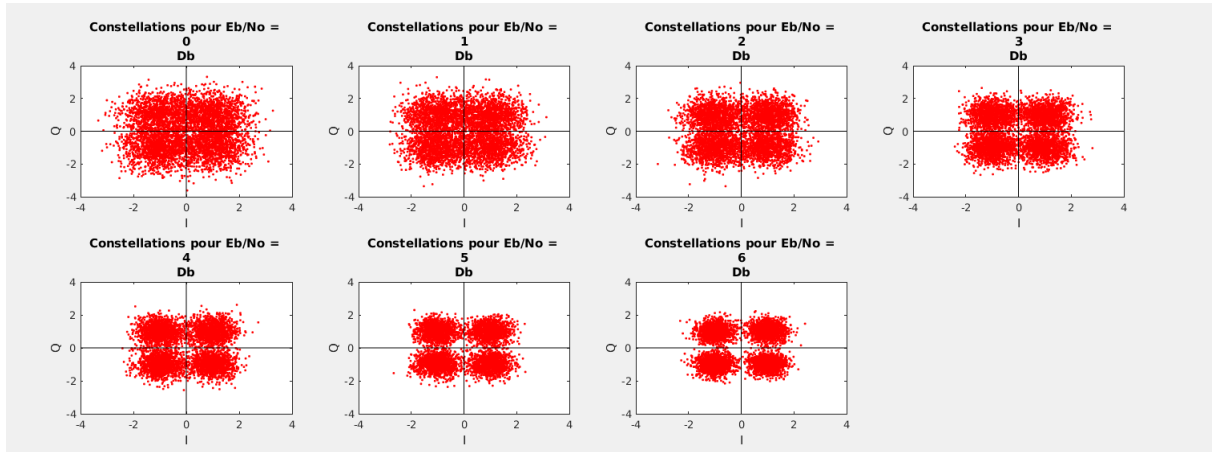


Figure 25 : Tracé des constellations en sortie de l'échantillonneur du signal

Le tracé du diagramme de l'oeil des voies I et Q de la chaîne est donné ci-après :

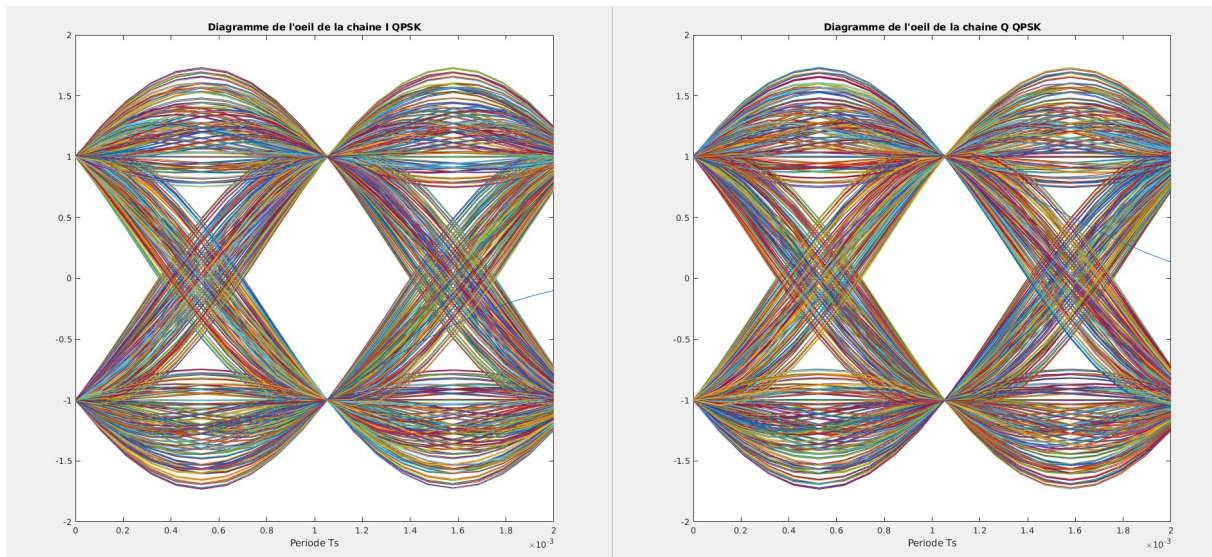


Figure 27 : Tracé des diagrammes de l'oeil des chaines I et Q

L'observation des diagrammes de l'oeil nous montre que l'oeil est ouvert à l'instant  $t_o = T_s$ , et que le seuil optimal de détection sera **0** car la probabilité d'erreur est minimisée en ce point. Le TEB sans bruit est bien nul

Le tracé du TEB après rajout du bruit donne le tracé suivant en fonction du rapport signal à bruit à l'entrée du récepteur en décibel est le suivant :

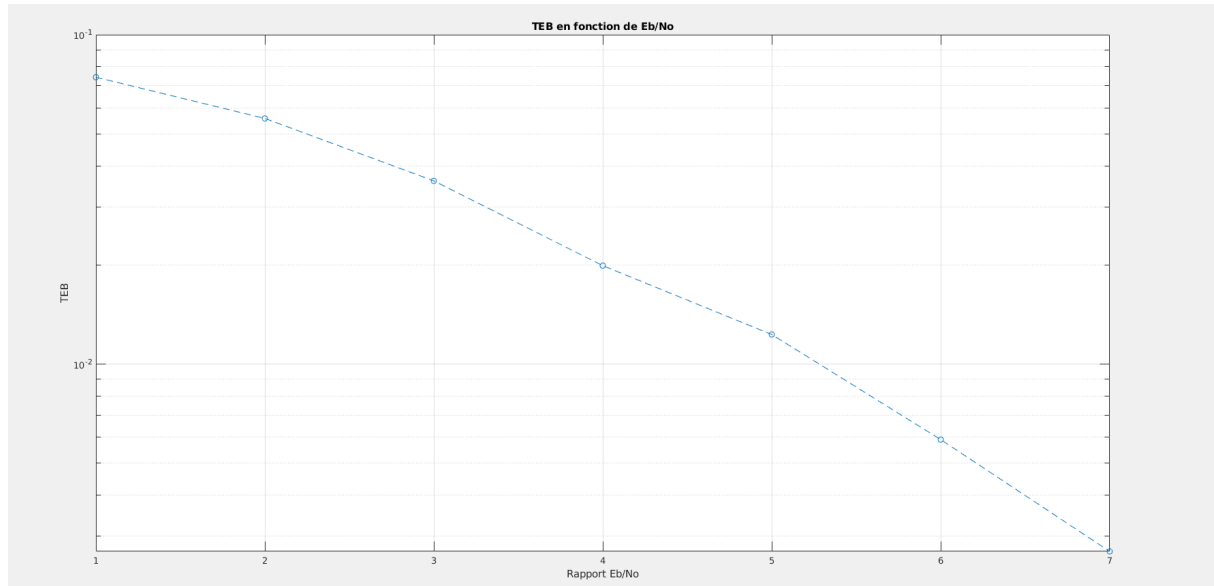


Figure 28 : Tracé du TEB simulé

La formule du calcul du TEB théorique de la chaîne QPSK est celle donnée par le cours qui est la suivante :

$$TEB \approx TES_{min} = 4 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q\left(\sqrt{\frac{3 \log_2(M) E_b}{(M-1) N_o}}\right) \text{ avec } M=4$$

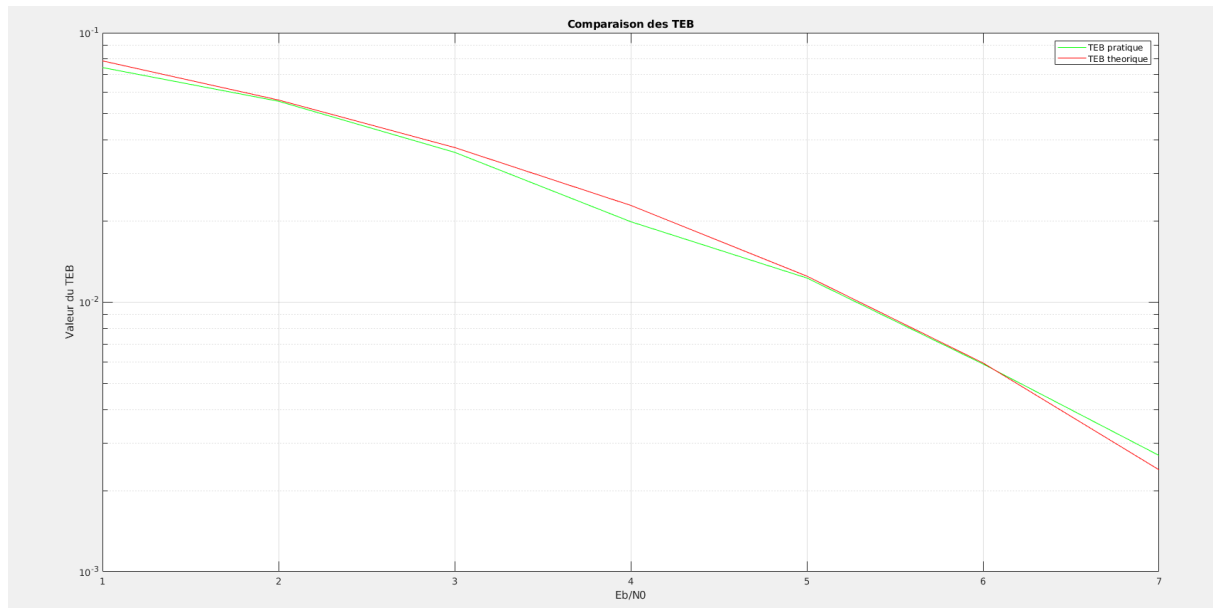
On a utilisé ici la formule de la 4-QAM, les deux chaînes étant les mêmes.

En effet la chaîne respecte le critère de Nyquist car l'instant d'échantillonnage est tel qu'on a la suppression des Interférences entre Symboles. Aussi, le seuil de décision est bien en 0. Le filtrage est bien un filtrage adapté car la réponse impulsionnelle du filtre de réception respecte bien la formule  $h_r(t) = \lambda h(t_0 - t)$  où  $h$  désigne la réponse impulsionnelle du filtre de mise en forme. Le mapping étant de Gray on a bien

$$TEB \approx \frac{TES}{\log_2(M)}.$$

La courbe montrant la superposition entre le TEB théorique et le TEB simulé de la chaîne est la suivante :





**Figure 29 :** Tracé de la superposition du TEB simulé et du TEB théorique

### 3.2- Comparaison des modulations BPSK, QPSK, 8-PSK et 16-QAM

L'implantation de ces chaînes sera effectuée sur chaîne passe-bas équivalente. Elle se fera donc comme précédemment avec un mapping de Gray, un facteur de suréchantillonnage de sorte à respecter le critère de Shannon. La mise en forme est un filtre en racine de cosinus surélevé de roll off 0,35, le récepteur optimal et le canal de transmission est représenté par un bruit complexe de la forme

$$n_e(t) = n_I(t) + jn_Q(t) \text{ où } n_I \text{ et } n_Q \text{ représentent le bruit associé aux voies I et Q.}$$

Ces bruits possèdent une même puissance qui est calculée  $\sigma^2$  en fonction du rapport signal à bruit à l'entrée du récepteur.

$$\sigma_I^2 = \sigma_Q^2 = \frac{P_r N_s}{2 \log_2(M) \frac{E_b}{N_o}}$$

#### 3.2.1- Chaîne BPSK

Le mapping de la chaîne BPSK est de type  $\{0; 1\}$ . La mise en forme est un filtre en racine de cosinus surélevé et celui de réception est adapté au filtre de mise en forme.

Le tracé des constellations de la chaîne BPSK en sortie du mapping est le suivant :

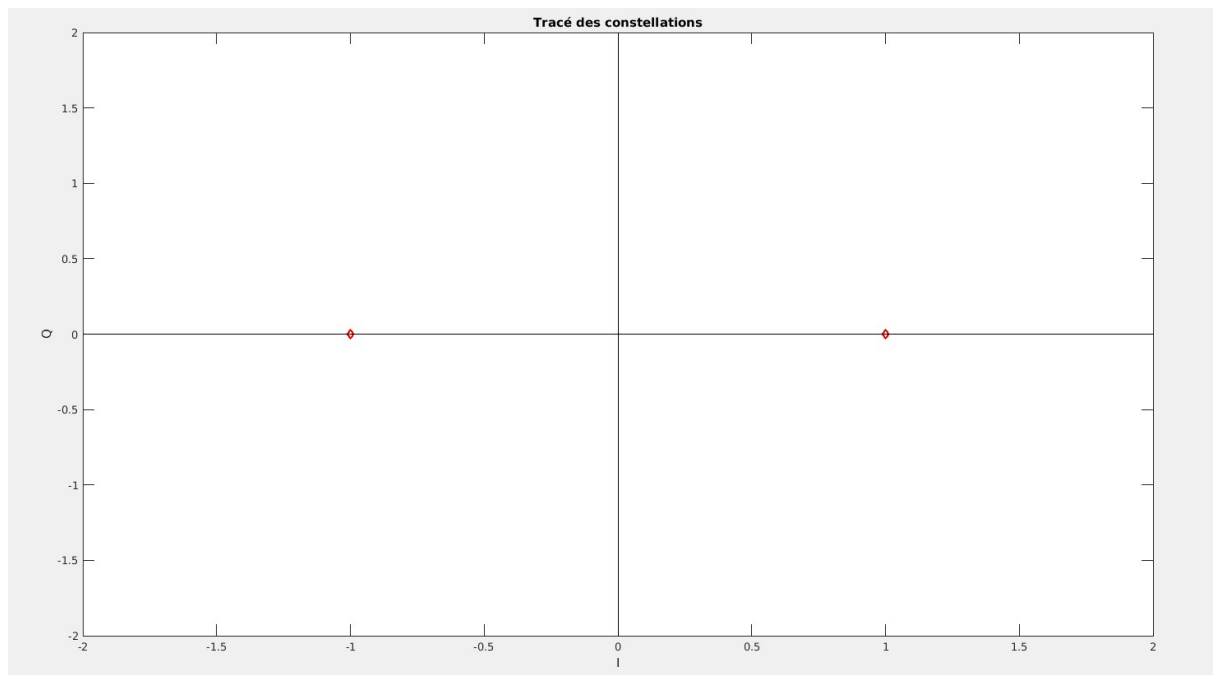


Figure 30 : Tracé des constellations en sortie du mapping du signal

Le tracé des constellations pour différentes valeurs du rapport  $\frac{E_b}{N_o}$  est le suivant :

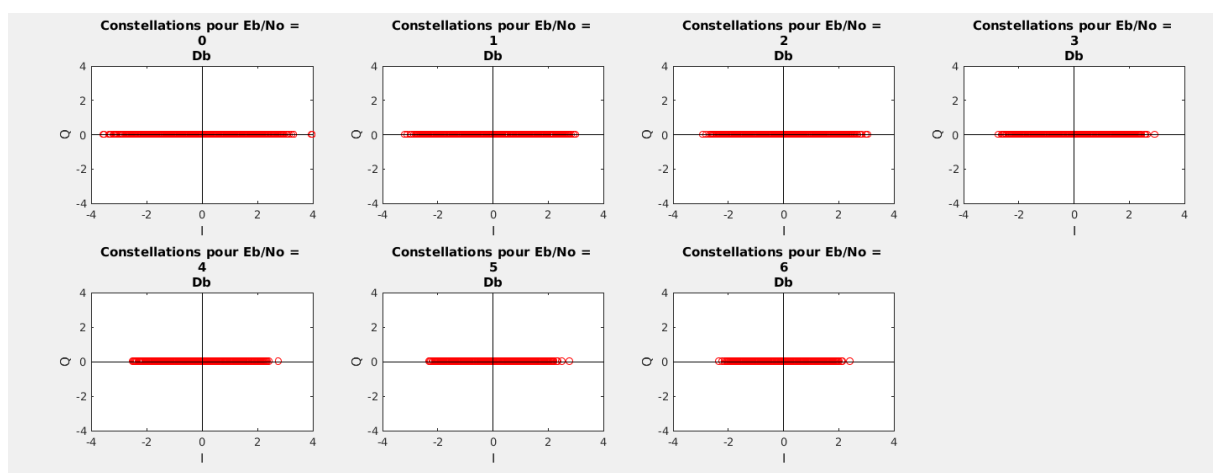


Figure 31 : Tracé des constellations en sortie de l'échantillonneur du signal

L'observation des diagrammes de l'oeil nous montre que l'oeil est ouvert à l'instant  $t_o = T_s$ , et que le seuil optimal de détection sera **0** car la probabilité d'erreur est minimisée en ce point. Le TEB sans bruit est bien nul

Le tracé du TEB après rajout du bruit donne le tracé suivant en fonction du rapport signal à bruit à l'entrée du récepteur en décibel est le suivant :

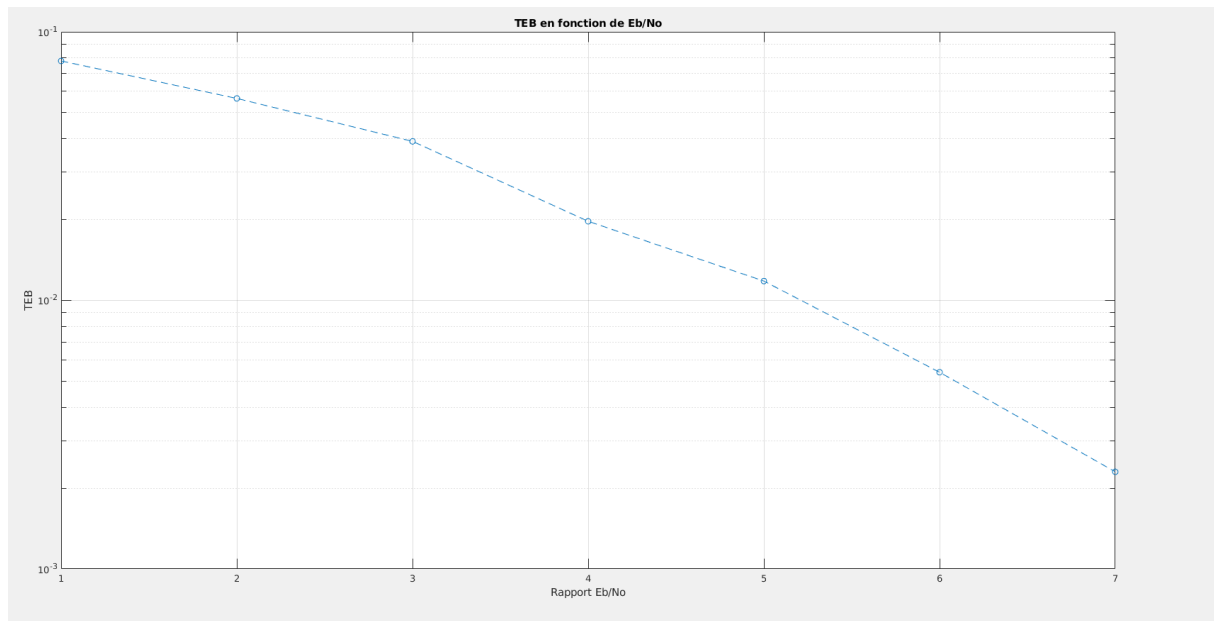


Figure 32 : Tracé du TEB simulé

La formule du calcul du TEB théorique de la chaîne QPSK est celle donnée par le cours qui est la suivante :

$$TEB \approx TES_{min} = Q\left(\sqrt{2 \frac{E_s}{N_o}} \sin\left(\frac{\pi}{M}\right)\right) \text{ avec } M=2$$

En effet la chaîne respecte le critère de Nyquist car l'instant d'échantillonnage est tel qu'on a la suppression des Interférences entre Symboles. Aussi, le seuil de décision est bien en 0. Le filtrage est bien un filtrage adapté car la réponse impulsionnelle du filtre de réception respecte bien la formule  $h_r(t) = \lambda h(t_0 - t)$  où  $h$  désigne la réponse impulsionnelle du filtre de mise en forme. Le mapping étant de Gray on a bien

$$TEB \approx \frac{TES}{\log_2}(M) \quad .$$

La courbe montrant la superposition entre le TEB théorique et le TEB simulé de la chaîne est la suivante :

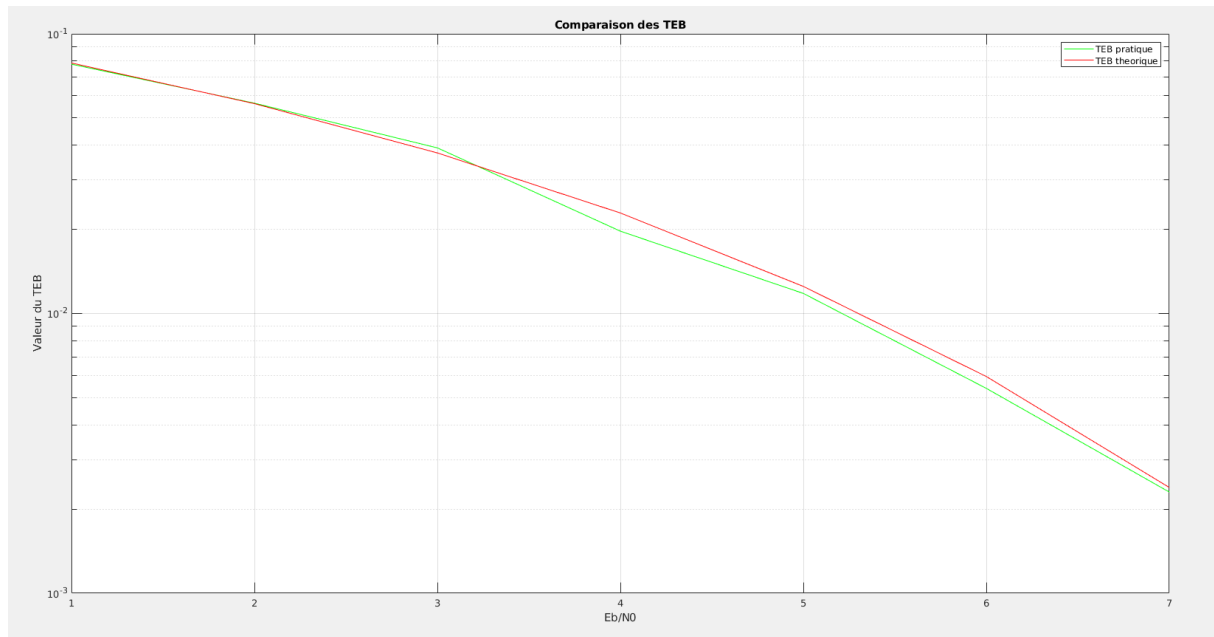


Figure 33 : Tracé de la superposition du TEB simulé et du TEB théorique

### 3.2.2- Chaîne 8-PSK

Le mapping de la chaîne 8-PSK est réalisé avec la fonction *pskmod* de Matlab et le démapping par la fonction *pskdemod*. La mise en forme est un filtre en racine de cosinus surélevé et celui de réception est adapté au filtre de mise en forme.

Le tracé des constellations de la chaîne BPSK en sortie du mapping est le suivant :

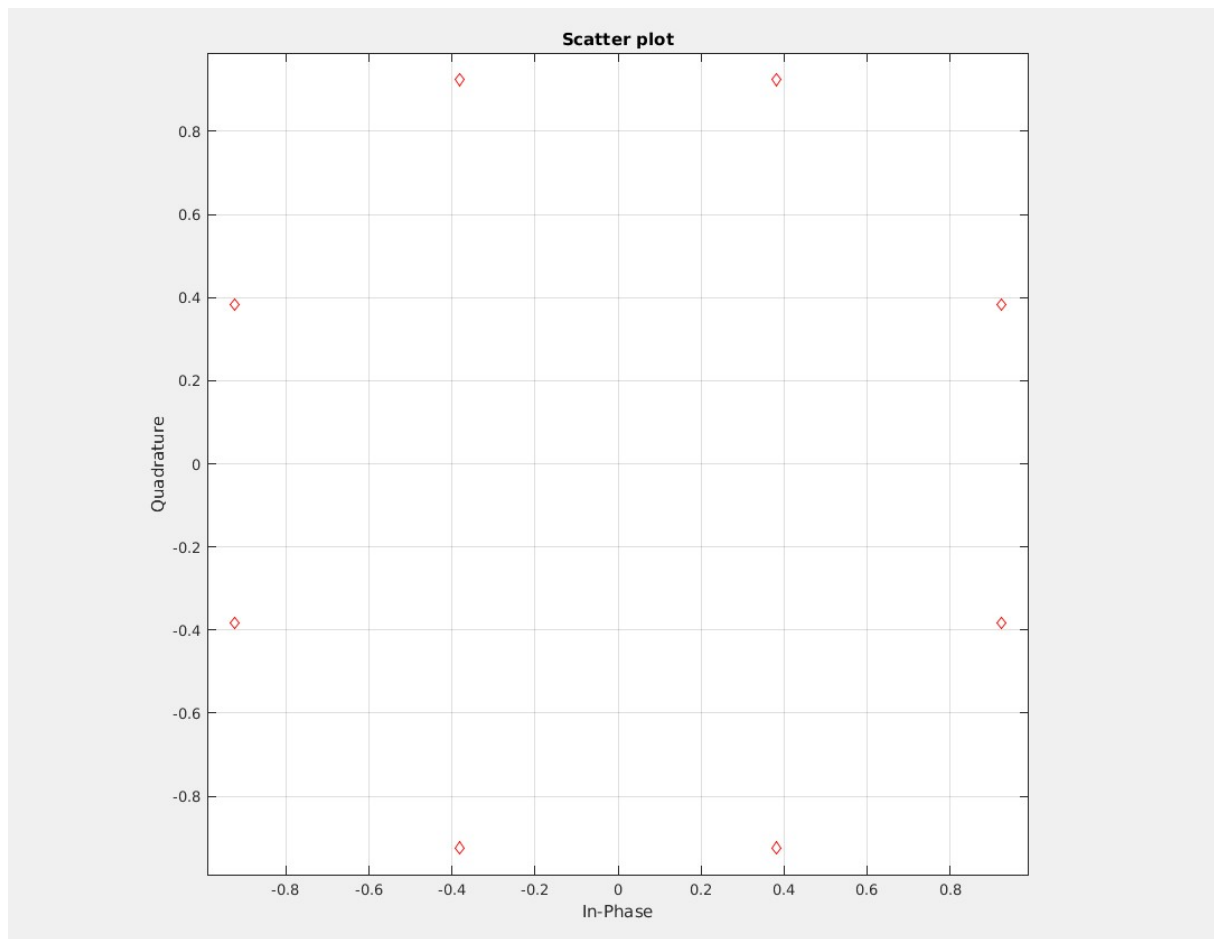


Figure 34 : Tracé des constellations en sortie du mapping du signal

Le tracé des constellations pour différentes valeurs du rapport  $\frac{E_b}{N_o}$  est le suivant :

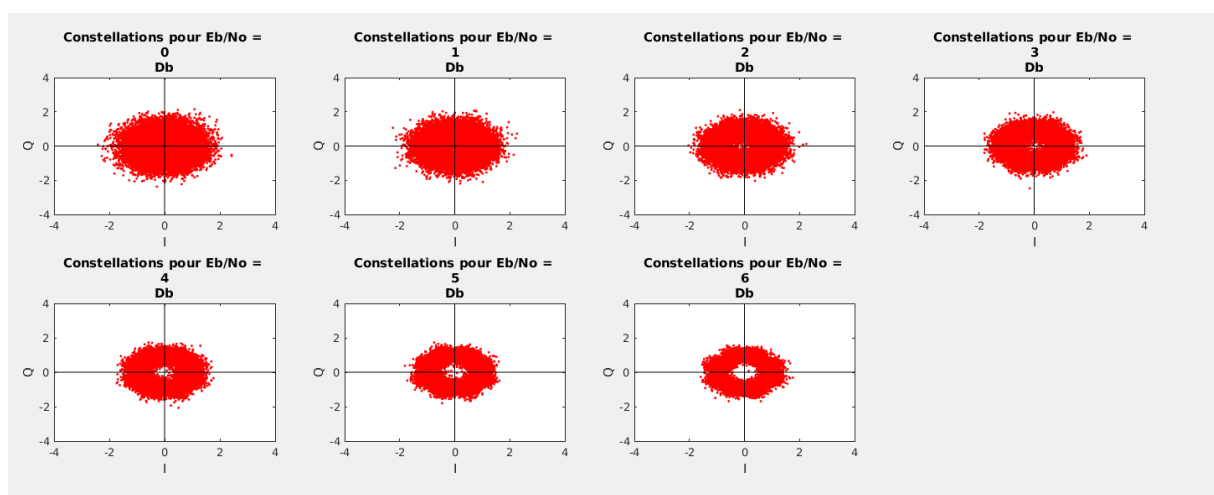
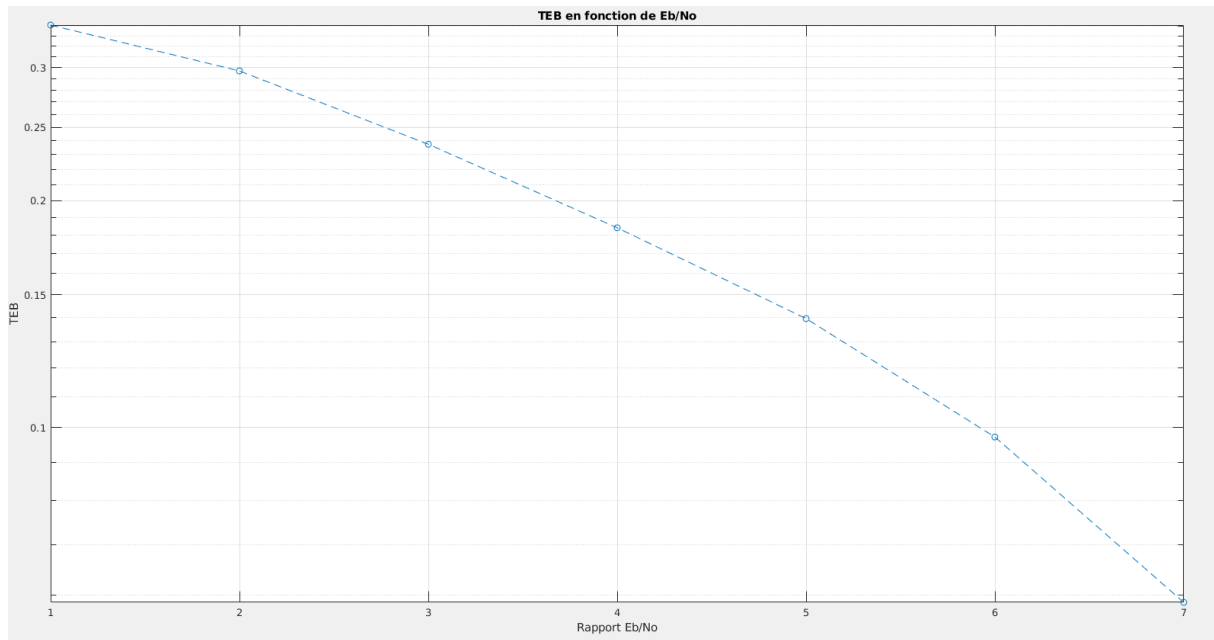


Figure 35 : Tracé des constellations en sortie de l'échantillonneur du signal

L'observation des diagrammes de l'oeil nous montre que l'oeil est ouvert à l'instant  $t_o = T_s$ . Le diagramme montre plusieurs seuils de détection et on utilisera la fonction *pskdemod* pour effectuer la prise de décision et récupérer le signal.

Le TEB sans bruit est bien nul

Le tracé du TEB après rajout du bruit donne le tracé suivant en fonction du rapport signal à bruit à l'entrée du récepteur en décibel est le suivant :



**Figure 36 : Tracé du TEB simulé**

La formule du calcul du TEB théorique de la chaîne 8-PSK est celle donnée par le cours qui est la suivante :

$$TEB \approx TES_{min} = 2Q\left(\sqrt{2 \frac{E_s}{N_o}} \sin\left(\frac{\pi}{M}\right)\right) \text{ avec } M=8$$

En effet la chaîne respecte le critère de Nyquist car l'instant d'échantillonnage est tel qu'on a la suppression des Interférences entre Symboles. Aussi, le seuil de décision est bien en 0. Le filtrage est bien un filtrage adapté car la réponse impulsionnelle du filtre de réception respecte bien la formule  $h_r(t) = \lambda h(t_0 - t)$  où  $h$  désigne la réponse impulsionnelle du filtre de mise en forme. Le mapping étant de Gray on a bien

$$TEB \approx \frac{TES}{\log_2}(M) .$$

La courbe montrant la superposition entre le TEB théorique et le TEB simulé de la chaîne est la suivante :

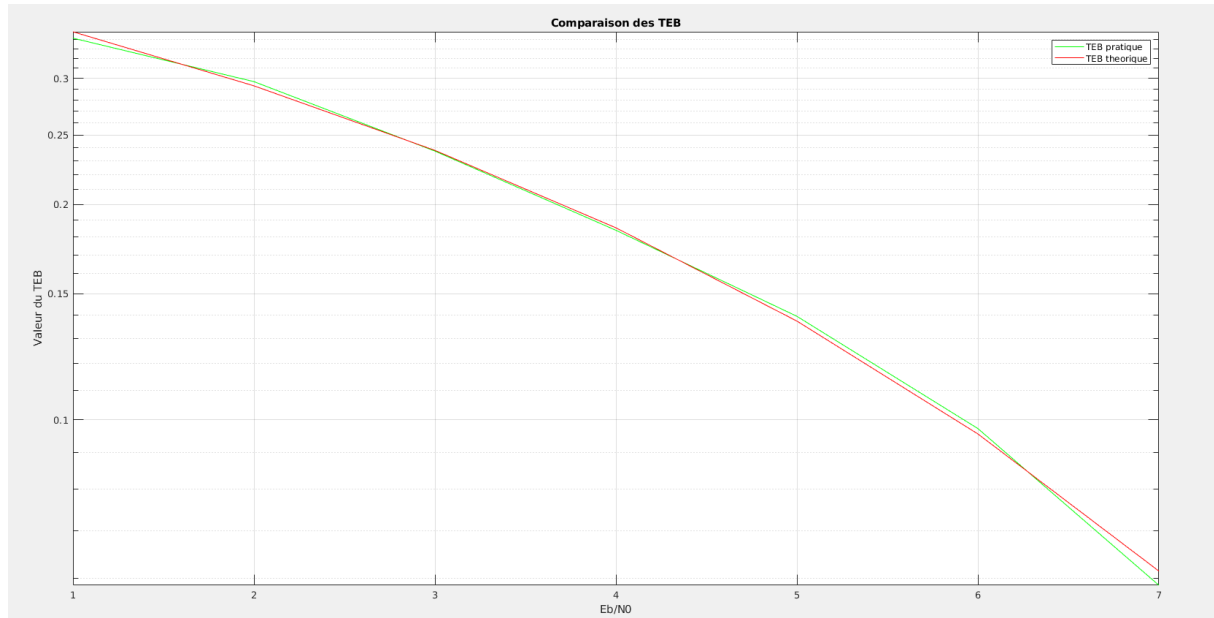
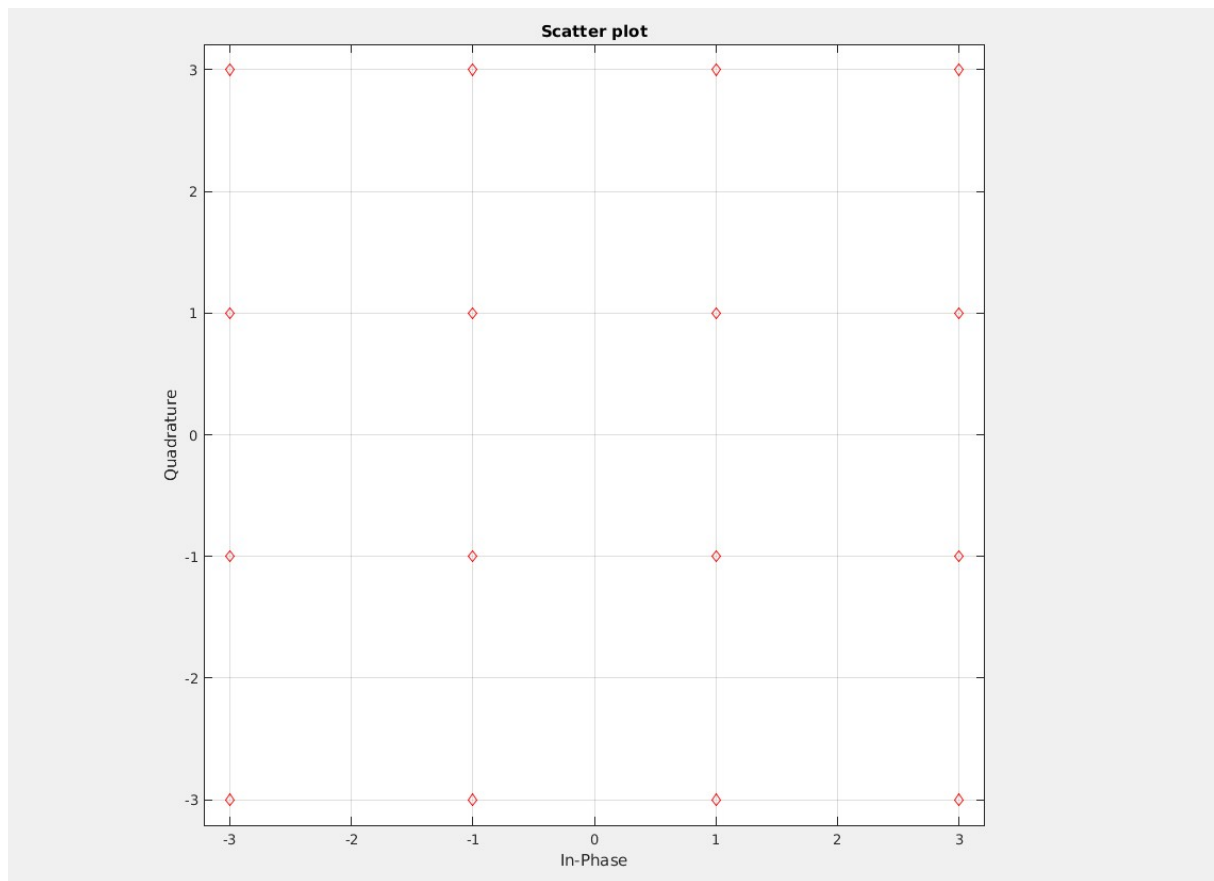


Figure 37 : Tracé de la superposition du TEB simulé et du TEB théorique

### 3.2.3- Chaîne 16-QAM

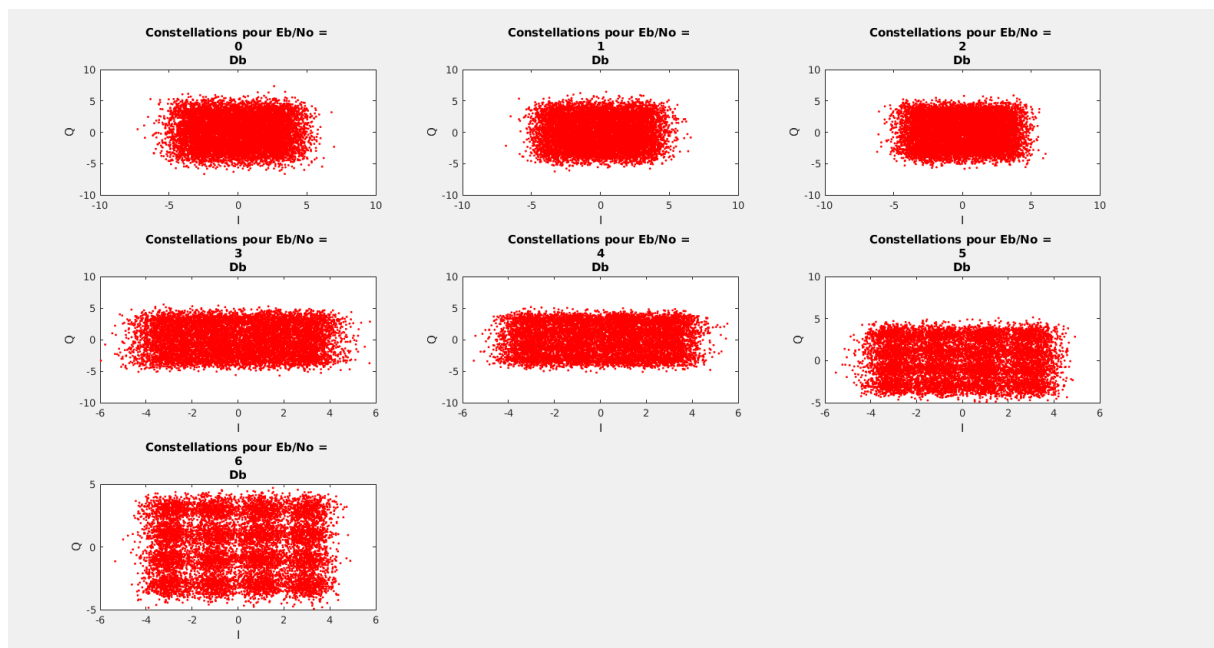
Le mapping de la chaîne 16-QAM est réalisé avec la fonction *qammod* de Matlab et le démapping par la fonction *qamdemod*. La mise en forme est un filtre en racine de cosinus surélevé et celui de réception est adapté au filtre de mise en forme.

Le tracé des constellations de la chaîne BPSK en sortie du mapping est le suivant :



**Figure 38 :** Tracé des constellations en sortie du mapping du signal

Le tracé des constellations pour différentes valeurs du rapport  $\frac{E_b}{N_o}$  est le suivant :



**Figure 39 :** Tracé des constellations en sortie de l'échantillonneur du signal



L'observation des diagrammes de l'oeil nous montre que l'oeil est ouvert à l'instant  $t_o = T_s$ . Le diagramme montre plusieurs seuils de détection et on utilisera la fonction *qamdemod* pour effectuer la prise de décision et récupérer le signal.

Le TEB sans bruit est bien nul

Le tracé du TEB après rajout du bruit donne le tracé suivant en fonction du rapport signal à bruit à l'entrée du récepteur en décibel est le suivant :

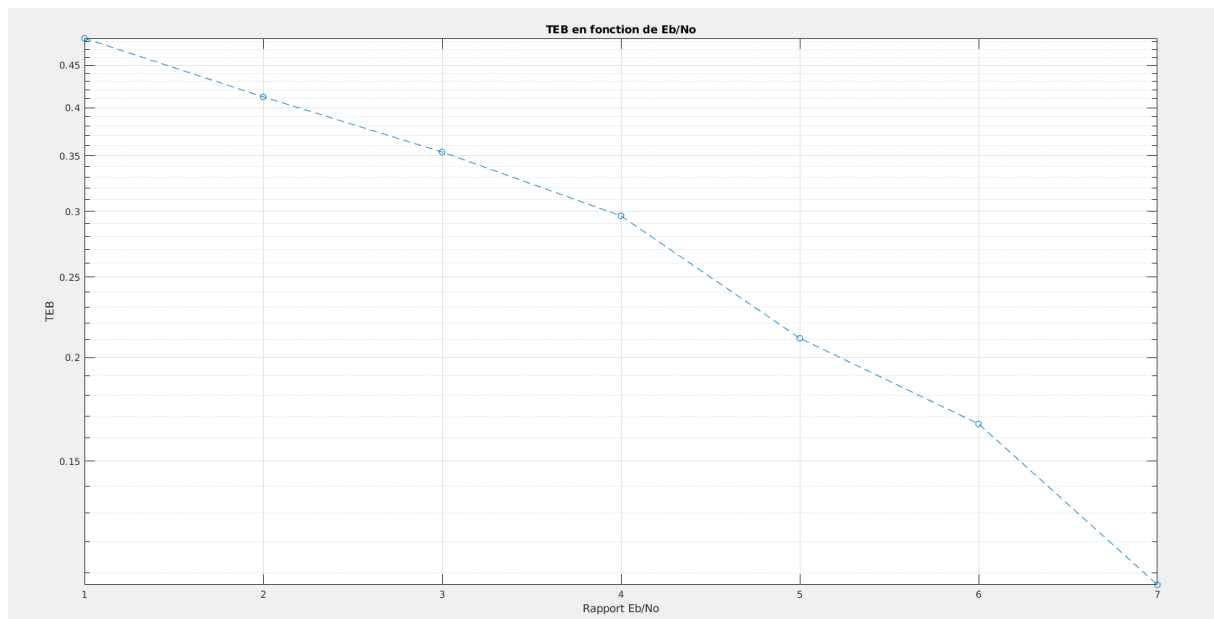


Figure 40 : Tracé du TEB simulé

La formule du calcul du TEB théorique de la chaîne 16-QAM est celle donnée par le cours qui est la suivante :

$$TEB \approx TES_{min} = 4 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) Q \left( \sqrt{\frac{3 \log_2(M) E_b}{(M-1) N_o}} \right) \text{ avec } M=16$$

En effet la chaîne respecte le critère de Nyquist car l'instant d'échantillonnage est tel qu'on a la suppression des Interférences entre Symboles. Aussi, le seuil de décision est bien en 0. Le filtrage est bien un filtrage adapté car la réponse impulsionnelle du filtre de réception respecte bien la formule  $h_r(t) = \lambda h(t_0 - t)$  où  $h$  désigne la réponse impulsionnelle du filtre de mise en forme. Le mapping étant de Gray on a bien

$$TEB \approx \frac{TES}{\log_2(M)}.$$

La courbe montrant la superposition entre le TEB théorique et le TEB simulé de la chaîne est la suivante :

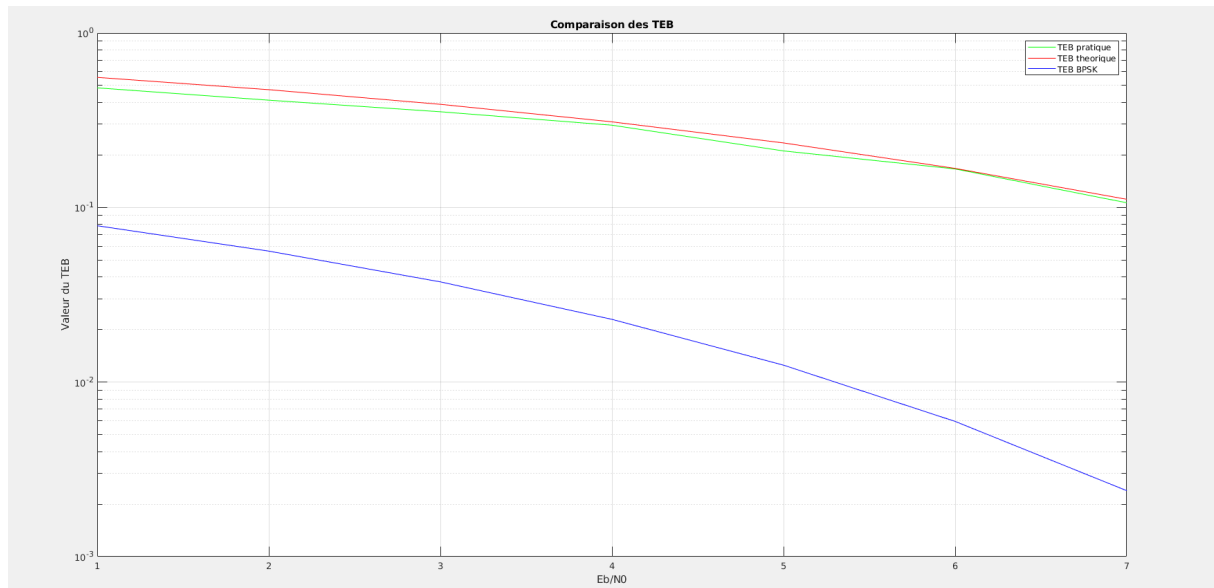


Figure 41 : Tracé de la superposition du TEB simulé et du TEB théorique

### 3.2.4- Comparaison efficacité spectrale – efficacité en puissance

Comme montré précédemment l'efficacité spectrale dépend du débit binaire et de la bande occupée par le signal

$$\eta = \frac{R_b}{B} = \frac{\log_2(M)}{k} \text{ avec } k \text{ coefficient de proportionnalité}$$

Or k qui dépend de la nature du filtre est le même pour toutes les différentes modulations. En effet chacune de ses modulations utilisent un filtre en racine de cosinus surélevé avec un même coefficient de roll-off.

D'où la modulation la plus efficace en terme de bande spectrale est celle qui possède un nombre de symboles M le plus élevé.

D'où la modulation la plus performante en terme de bande spectrale est **la modulation BPSK qui a un nombre M = 2.**

La figure suivante représente la superposition des TEB simulés des différentes chaînes de transmission implantées.

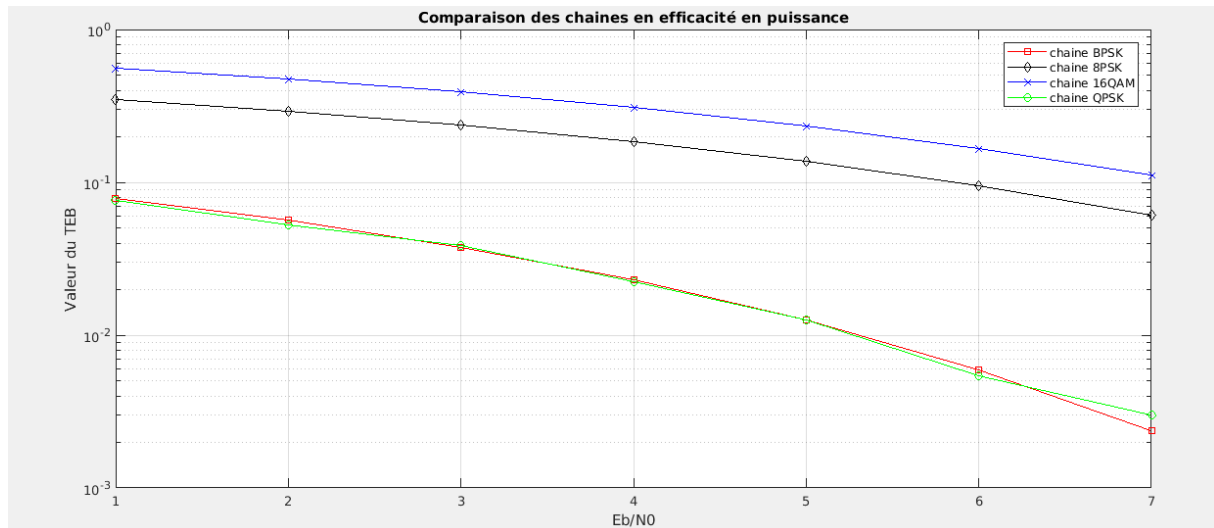


Figure 42 : Comparaison efficacité en puissance

Et donc il ressort que pour une valeur de  $\frac{E_b}{N_o}$  fixée, les modulations qui présentent le TEB le plus bas sont les **modulations BPSK et QPSK**. Ce sont donc les chaînes les plus performantes en termes de puissance.

Et donc la modulation la plus efficace en termes de puissance et de bande spectrale est bien la **modulation BPSK**.

## 4- Conclusion

Il ressort de ce TP que pour avoir une transmission optimale, aussi bien en bande de base que sur fréquence porteuse, il est nécessaire que la chaîne :

- possède un mapping de Gray pour limiter les erreurs de détection
- possède un facteur de suréchantillonnage afin de respecter le critère de Shannon
- respecte le critère de Nyquist
- possède un filtrage adapté
- possède des instants d'échantillonnages optimaux et un détecteur à seuil avec seuils optimaux.

Les chaînes les plus efficaces en puissance et en occupation spectrale sont celles qui possèdent un nombre de symbole  $M$  petit et utilisent un filtre en racine de cosinus surélevé.

Pour ce qui est des transmissions sur fréquence porteuse, l'utilisation d'une chaîne passe-bas équivalente plutôt qu'une transmission sur fréquence porteuse permet d'avoir une densité spectrale de puissance centrée en 0. Les modulations QPSK et BPSK sont celles qui sont les plus performantes en termes de puissance mais la modulation BPSK est celle la plus efficace spectralement.

## Bibliographie

- ***Cours d'introduction aux Télécommunications*, Nathalie Thomas,**  
<http://thomas.perso.enseeiht.fr/teaching.html>
- ***Travaux Dirigés 1ère année SN*, Nathalie Thomas,**  
<http://thomas.perso.enseeiht.fr/teaching.html>