



# Télécommunication - TPs

## Étude de transmission en bande de base

Auteur : Adam Bouam

Département Sciences du Numérique - Première année  
2021-2022

## Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Étude de modulateurs bande de base</b>	<b>4</b>
2.1	Introduction . . . . .	4
2.2	Modulateurs à étudier et comparer . . . . .	4
2.3	Étude réalisée . . . . .	4
2.3.1	Modulateur 1 . . . . .	4
2.3.2	Modulateur 2 . . . . .	5
2.3.3	Modulateur 3 . . . . .	6
2.3.4	Comparaison des modulateurs implantés en termes d'efficacité spectrale . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Étude des interférences entre symbole et du critère de Nyquist</b>	<b>9</b>
3.1	Introduction . . . . .	9
3.2	Étude sans canal de propagation . . . . .	9
3.3	Étude avec canal de propagation sans bruit . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Étude de l'impact du bruit, filtrage adapté, taux d'erreur binaire, efficacité en puissance</b>	<b>16</b>
4.1	Introduction . . . . .	16
4.2	Chaîne de référence . . . . .	16
4.3	Première chaîne à étudier, implanter et comparer à la chaîne de référence . . . . .	18
4.3.1	Implantation de la chaîne sans bruit . . . . .	19
4.3.2	Implantation de la chaîne avec bruit . . . . .	20
4.4	Deuxième chaîne à étudier, implanter et comparer à la chaîne de référence . . . . .	22
4.5	Implantation de la chaîne sans bruit . . . . .	22
4.6	Implantation de la chaîne avec bruit . . . . .	23

## List of Figures

1	Signal transmis par le modulateur 1. . . . .	5
2	DSPs du premier modulateur. . . . .	5
3	Signal transmis par le modulateur 2. . . . .	6
4	Signal transmis par le modulateur 3. . . . .	7
5	DSPs du troisième modulateur. . . . .	7
6	DSPs superposées. . . . .	8
7	Classement des modulateurs selon leurs efficacités spectrales. . . . .	8
8	Signal en sortie du filtre de réception. . . . .	9
9	Réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission sans canal . . . . .	10
10	Diagramme de l'œil du signal précédemment tracé . . . . .	11
11	Les différents TEBs calculés . . . . .	11

12	Réponse impulsionnelle de la chaîne avec canal BW = 8000Hz . .	12
13	Diagramme de l'œil à la sortie du filtre de réception avec canal BW = 8000Hz . . . . .	13
14	Représentations fréquentielles avec canal BW = 8000Hz . . . . .	14
15	Réponse impulsionnelle de la chaîne avec canal BW = 1000 Hz .	14
16	Diagramme de l'œil à la sortie du filtre de réception avec canal BW = 1000Hz . . . . .	15
17	Représentations fréquentielles avec canal BW = 8000Hz . . . . .	16
18	Diagramme de l'œil pour différents SNR . . . . .	17
19	Réponses impulsionnelles des filtres d'émission et de réception. .	19
20	Produit de convolution entre $h(t)$ et $h_r(t)$ . . . . .	19
21	Diagramme de l'œil pour différents SNR . . . . .	20

# 1 Introduction

L'objectif du travail présenté dans ce rapport était de faire l'étude de quelques exemples de transmissions en bande de base.

## 2 Étude de modulateurs bande de base

### 2.1 Introduction

Ce premier travail va être dédié à l'étude des modulateurs bande de base et, en particulier, à l'identification des éléments ayant un impact sur l'efficacité spectrale obtenue pour la transmission.

### 2.2 Modulateurs à étudier et comparer

Les modulateurs suivants ont été étudiés et comparés en termes d'efficacité spectrale :

- Modulateur 1:
  - Mapping : symboles binaires à moyenne nulle.
  - Filtre de mise en forme : rectangulaire de durée  $T_{s_1} = N_{s_1}T_e$  et de hauteur 1.
- Modulateur 2:
  - Mapping : symboles 4-aires à moyenne nulle.
  - Filtre de mise en forme : rectangulaire de durée  $T_{s_2} = N_{s_2}T_e$  et de hauteur 1.
- Modulateur 3:
  - Mapping : symboles binaires à moyenne nulle.
  - Filtre de mise en forme : racine de cosinus surélevé.

### 2.3 Étude réalisée

Les modulateurs précédemment décrits ont été implantés sous Matlab avec une fréquence d'échantillonnage  $F_e = 24000$  Hz pour transmettre un même débit binaire  $R_b = \frac{1}{T_b} = 3000$  bits par seconde.

#### 2.3.1 Modulateur 1

On trouve dans les figures suivantes les tracées du signal transmis par le premier modulateur (cf. Fig.1), et de la DSP correspondante (théorique et simulée) cf. Fig.2.

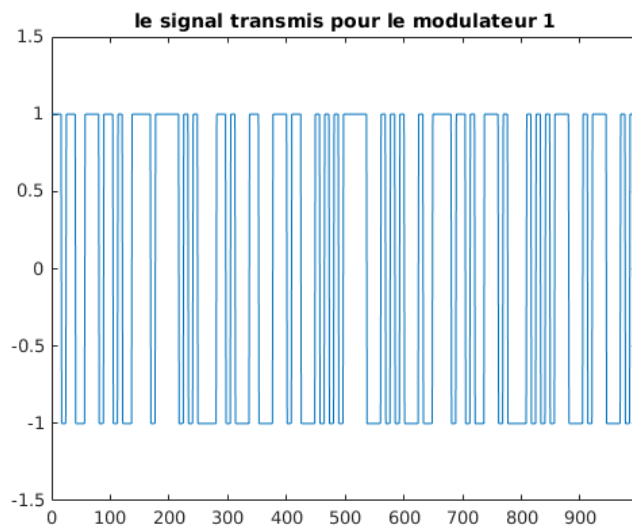


Figure 1: Signal transmis par le modulateur 1.

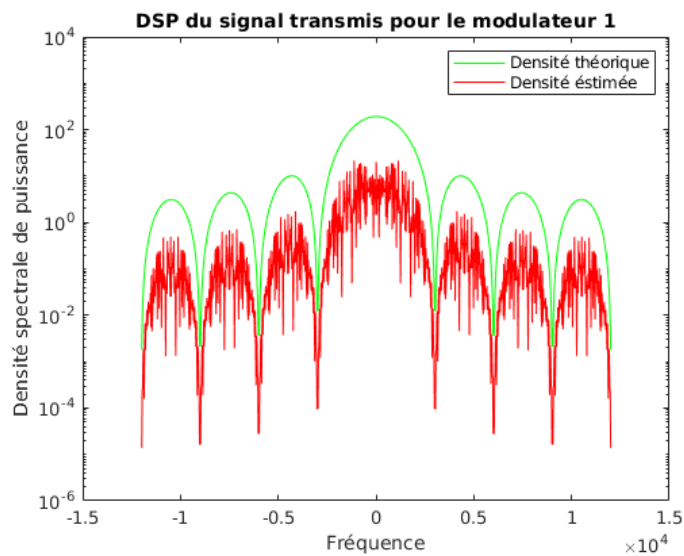


Figure 2: DSPs du premier modulateur.

### 2.3.2 Modulateur 2

On trouve dans les figures suivantes les tracées du signal transmis par le deuxième modulateur (cf. Fig.3), et de la DSP correspondante (théorique et simulée) cf.

Fig.??.

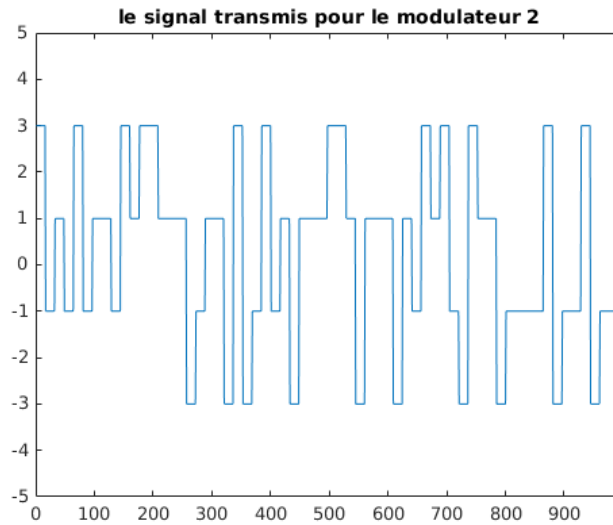


Figure 3: Signal transmis par le modulateur 2.

### 2.3.3 Modulateur 3

On trouve dans les figures suivantes les tracées du signal transmis par le troisième modulateur (cf. Fig.4), et de la DSP correspondante (théorique et simulée) cf. Fig.5.

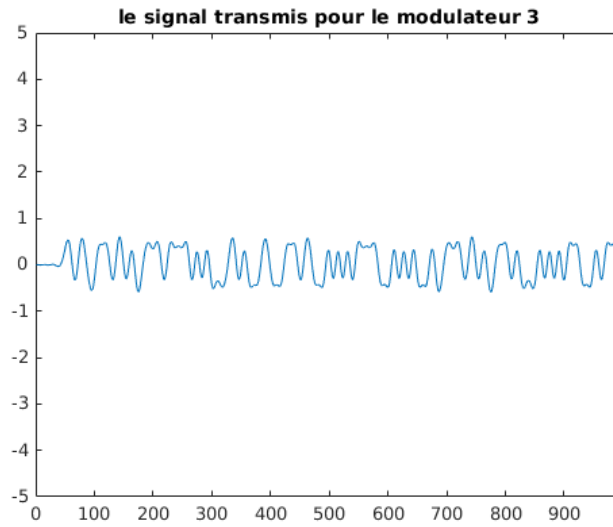


Figure 4: Signal transmis par le modulateur 3.

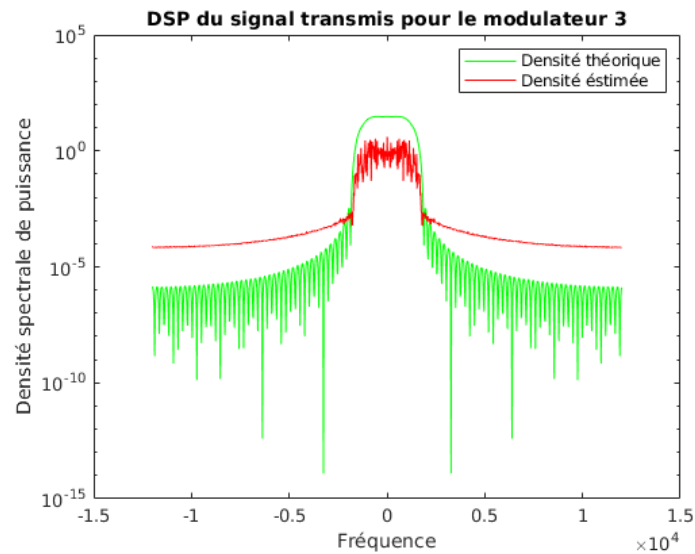


Figure 5: DSPs du troisième modulateur.

#### 2.3.4 Comparaison des modulateurs implantés en termes d'efficacité spectrale

On trouve dans la figure suivante (cf. Fig.6) les différents DSPs pour les trois modulateurs implantés précédemment.

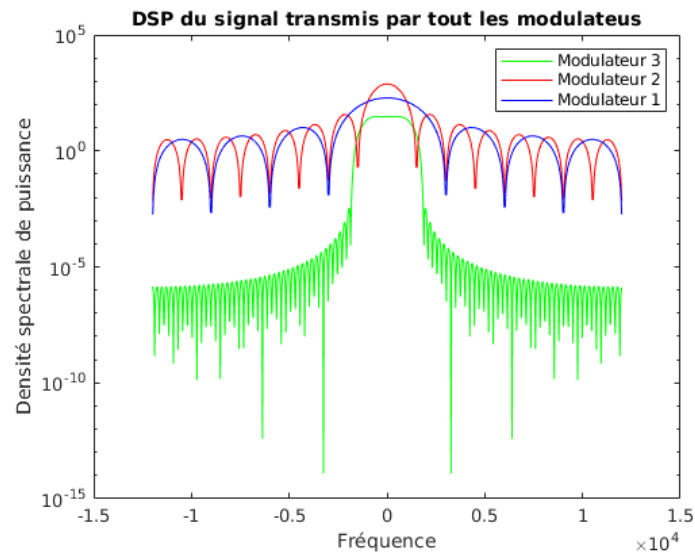


Figure 6: DSPs superposées.

On remarque que pour le troisieme modulateur la bande est la plus large. En termes d'efficacité spectrale on peut voir, après calcul, que le classement des modulateurs est comme ceci.

```
-----
Efficacite spectrale pour le modulateur 1 : 6.072874e+00
Efficacite spectrale pour le modulateur 2 : 5.928854e+00
Efficacite spectrale pour le modulateur 3 : 4.285714e+01
-----
Le classement des modulateurs du plus efficace au moins efficace :
Modulateur 3
Modulateur 1
Modulateur 2
```

Figure 7: Classement des modulateurs selon leurs efficacités spectrales.



### 3 Étude des interférences entre symbole et du critère de Nyquist

#### 3.1 Introduction

Cette partie va être dédiée à l'étude des interférences entre symboles dans une chaîne de transmission et à l'intérêt d'y respecter le critère de Nyquist. La chaîne de transmission a été implantée avec une fréquence d'échantillonnage  $F_e = 24000$  Hz pour transmettre un débit binaire  $R_b = \frac{1}{T_b} = 3000$  bits par seconde. On a considéré un mapping binaire à moyenne nulle, un filtre de mise en forme et un filtre de réception de même réponse impulsionnelle rectangulaire de durée  $T_s$  et de hauteur 1.

#### 3.2 Étude sans canal de propagation

On trouve dans la figure 8 le tracé du signal en sortie du filtre de réception. Ce signal étant filtré par deux filtres rectangulaire de largeur 1 il donne résultat à un signal de forme triangulaire avec le mapping 0  $\rightarrow$  -1 et 1  $\rightarrow$  +1.

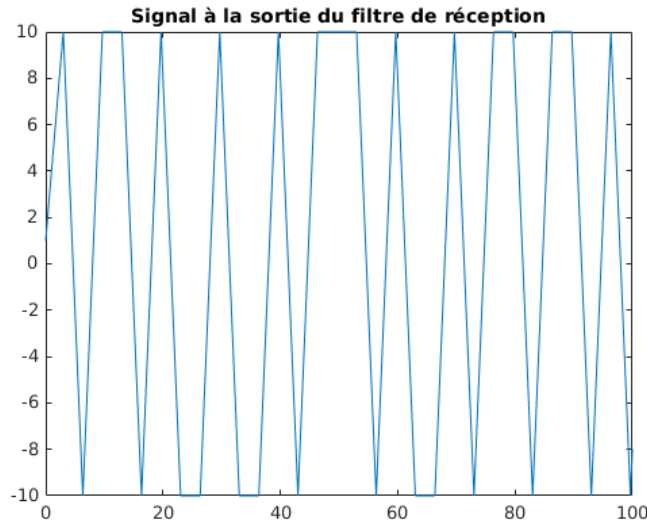


Figure 8: Signal en sortie du filtre de réception.

Dans la figure suivante on trouve le tracé de la réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission,  $g$ , on confirme le résultat de la question précédente (filtre global  $g$  de forme triangulaire).

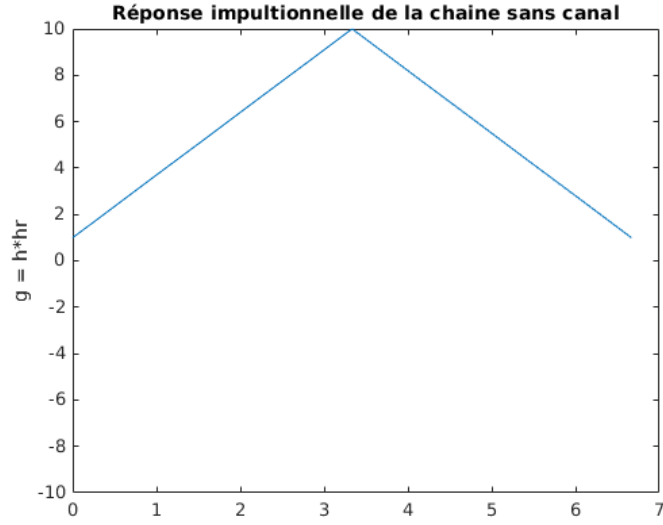


Figure 9: Réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission sans canal

En utilisant la réponse impulsionnelle de  $g$  et le critère de Nyquist ie.

$$g(n_0) \neq 0 \text{ et } g(n_0 + mN_s) = 0 \quad \forall m \in \mathbb{Z}^*$$

On trouve que  $n_0 = N_s$  sachant que la largeur de  $g$  est  $2N_s$  (produit de convolution de deux filtres rectangulaire de durée  $N_s$ ).

On trouve dans la figure suivante le diagramme de l'œil obtenu de cette première chaîne. Il est bien conforme à ce qui a été attendue du signal de la figure 8

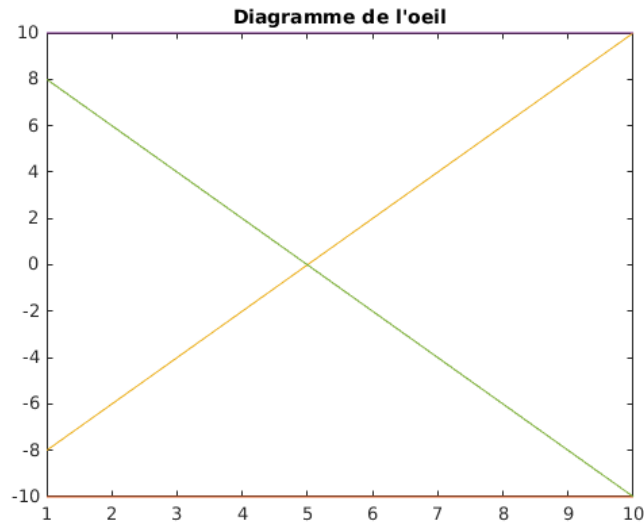


Figure 10: Diagramme de l'œil du signal précédemment tracé

On confirme le résultat de la question précédente que  $n_0 = N_s$  on voit bien sur le diagramme que c'est l'instant où il y'a pas d'interférences (2 symboles à la fois car mapping d'ordre 2).

Lorsque on choisit d'échantillonner avec  $n_0 = N_s$  (instant optimal) le TEB est nul contrairement à lorsque on échantillonne à  $n_0 = 3$  on trouve un TEB non nul. (voir Fig. 11 )

```
-----Le TEB pour l'instant optimal d'échantillonnage n0 = Ns-----
TEB = 0

-----Le TEB pour l'instant d'échantillonnage no = 3 (non optimal)-----
TEB = 5.210000e-01

-----Le TEB avec canal pour l'instant d'échantillonnage optimal et BW = 8000 Hz-----
TEB = 3.670000e-01
```

Figure 11: Les différents TEBs calculés

### 3.3 Étude avec canal de propagation sans bruit

On ajoute à la chaîne précédente un canal de propagation à bande limitée  $BW$  mais qui n'introduit pas de bruit, en considérant un échantillonnage aux instants optimaux.

Pour  $BW = 8000$  Hz :  
On va tracer la réponse impulsionnelle de la chaîne globale cf. Fig 12

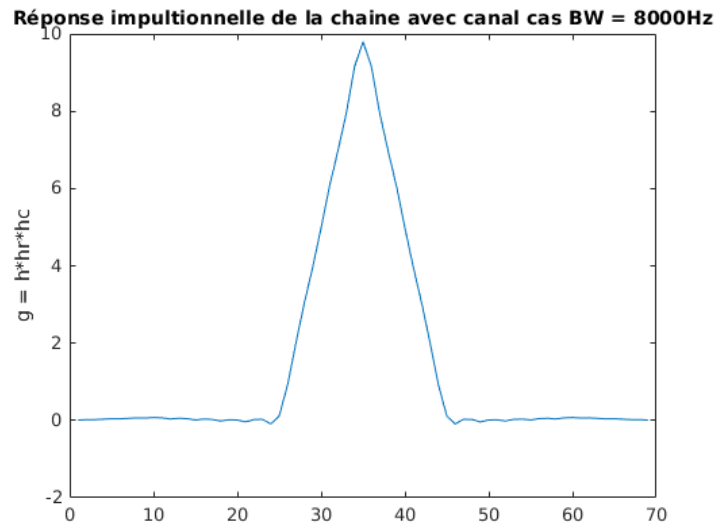


Figure 12: Réponse impulsionnelle de la chaîne avec canal  $BW = 8000$ Hz

Sur la figure suivante on trouve le diagramme de l'oeil à la sortie du filtre de réception. Fig 13

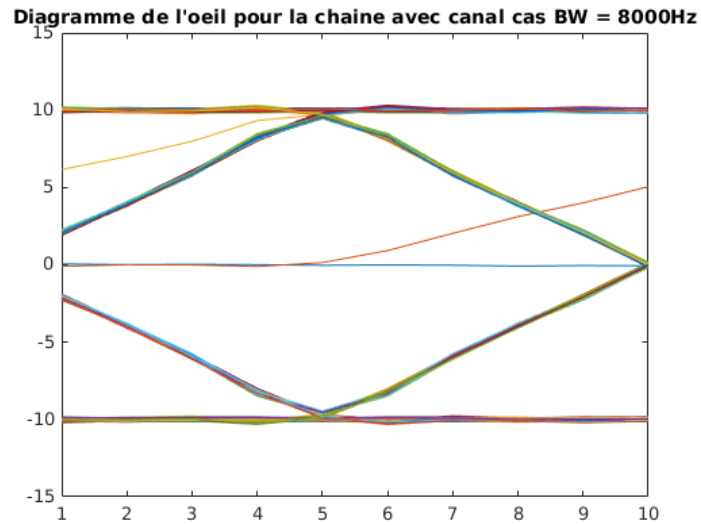


Figure 13: Diagramme de l'oeil à la sortie du filtre de réception avec canal BW = 8000Hz

On remarque que le diagramme de l'oeil est clair et que les instants optimaux d'échantillonnage sont visibles.

Sur la figure suivante on voit la réponse impulsionnelle en fréquence des deux fonctions  $|H(f)H_r(f)|$  et  $|H_c(f)|$ . On remarque que la bande de  $|H_c(f)|$  est plus large que celle de  $|H(f)H_r(f)|$  et donc le critère de Nyquist dans le domaine fréquentielle est vérifié.

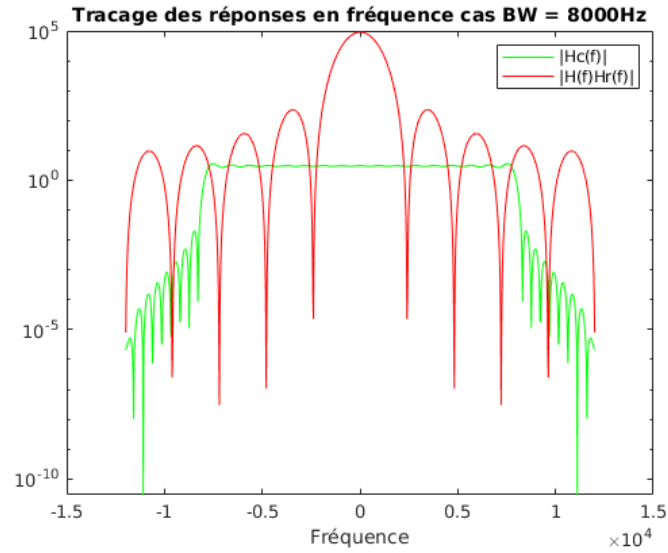


Figure 14: Représentations fréquentielles avec canal  $BW = 8000\text{Hz}$

**Conclusion :** Le critère de Nyquist est vérifié pour un canal de bande  $BW = 8000\text{Hz}$  et donc pas d'interférences, on minimise le TEB.

Pour  $BW = 1000\text{ Hz}$  :  
On va tracer la réponse impulsionnelle de la chaîne globale cf. Fig 15

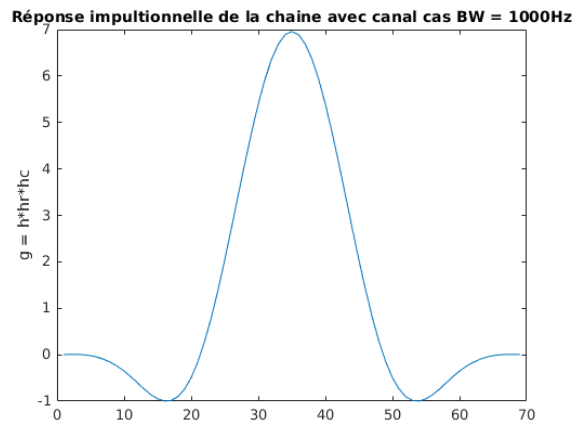


Figure 15: Réponse impulsionnelle de la chaîne avec canal  $BW = 1000\text{ Hz}$

Sur la figure suivante on trouve le diagramme de l'oeil à la sortie du filtre

de réception. Fig 16

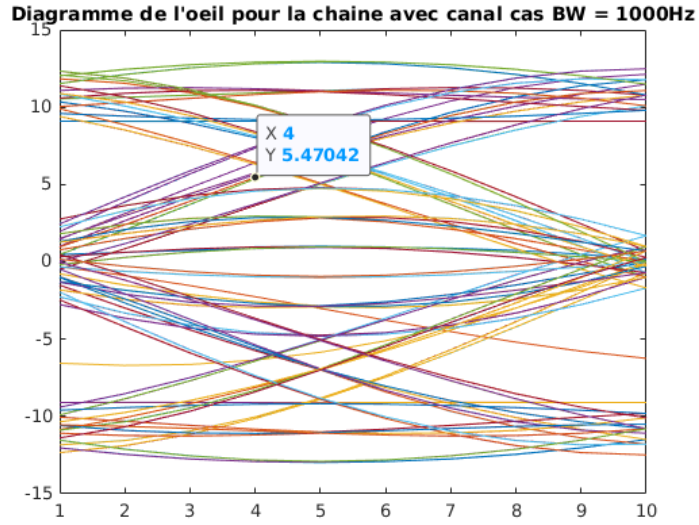


Figure 16: Diagramme de l'oeil à la sortie du filtre de réception avec canal BW = 1000Hz

On remarque que le diagramme de l'oeil n'est pas clair et que les instants optimaux d'échantillonnage ne sont pas visibles.

Sur la figure suivante on voit la réponse impulsionnelle en fréquence des deux fonctions  $|H(f)H_r(f)|$  et  $|H_c(f)|$ . On remarque que la bande de  $|H_c(f)|$  est plus étroite que celle de  $|H(f)H_r(f)|$  et donc le critère de Nyquist dans le domaine fréquentielle n'est pas vérifié.

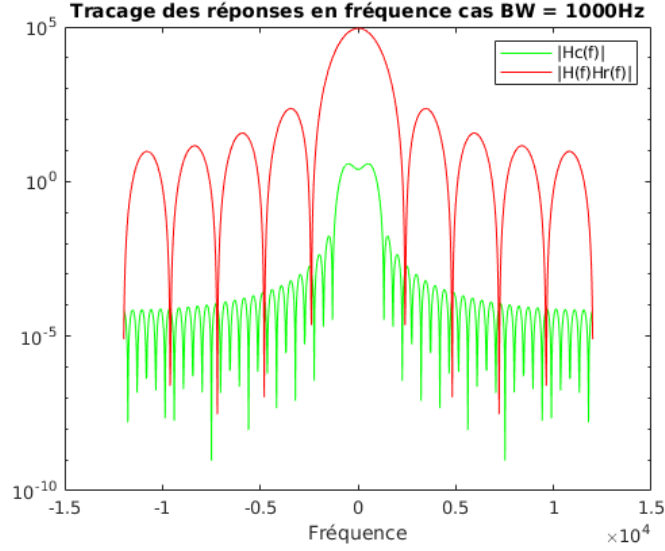


Figure 17: Représentations fréquentielles avec canal  $BW = 8000\text{Hz}$

**Conclusion :** Le critère de Nyquist n'est vérifié pour un canal de bande  $BW = 1000\text{Hz}$  et donc existence des interférences, On remarque par ailleurs que  $TEB_{1000\text{Hz}} > TEB_{8000\text{Hz}}$  (voir le code *Matlab*).

## 4 Étude de l'impact du bruit, filtrage adapté, taux d'erreur binaire, efficacité en puissance

### 4.1 Introduction

Cette dernière partie est dédiée à l'étude du bruit dans la chaîne de transmission numérique : impact du bruit introduit par le canal sur la transmission, influence du filtrage adapté, calcul et estimation du taux d'erreur binaire (TEB). Pour cela, nous avons implanté sous Matlab différentes chaînes de transmission afin de les analyser et de les comparer en nous focalisant, cette fois, sur leur efficacité en puissance.

### 4.2 Chaîne de référence

Fréquence d'échantillonnage  $F_e = 24000\text{ Hz}$ , débit binaire  $R_b = 3000\text{ bits par seconde}$ , mapping binaire à moyenne nulle, réponses impulsionnelles des filtres de mise en forme et de réception,  $h$  et  $h_r$ , rectangulaires de durée  $T_s$  et de hauteur 1, échantillonnage aux instants  $n_0 + mN_s$  optimaux, détecteur à seuil,



avec seuil en 0, pour prendre les décisions sur les symboles et demapping adapté au mapping réalisé.

1. On trace le diagramme de l'œil pour différentes valeurs de  $E_b/N_0$  afin de visualiser l'impact du bruit:

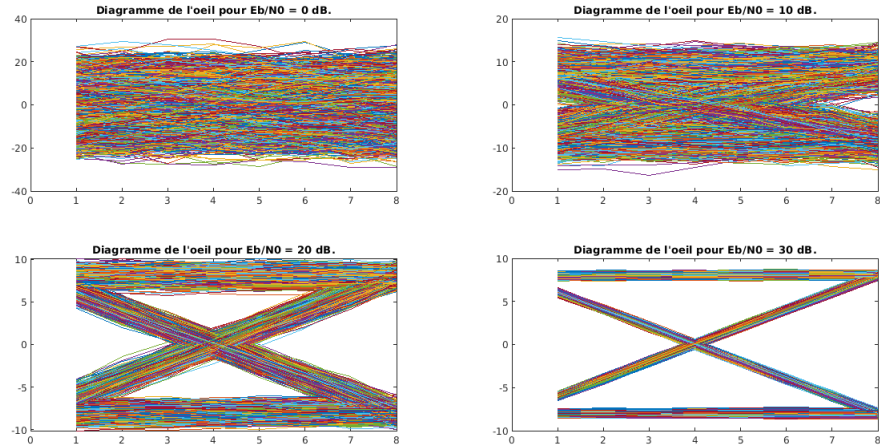
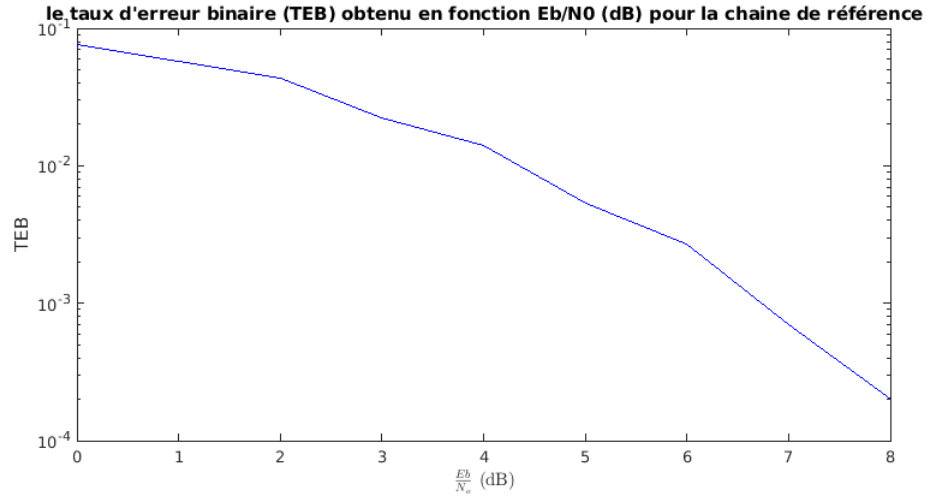


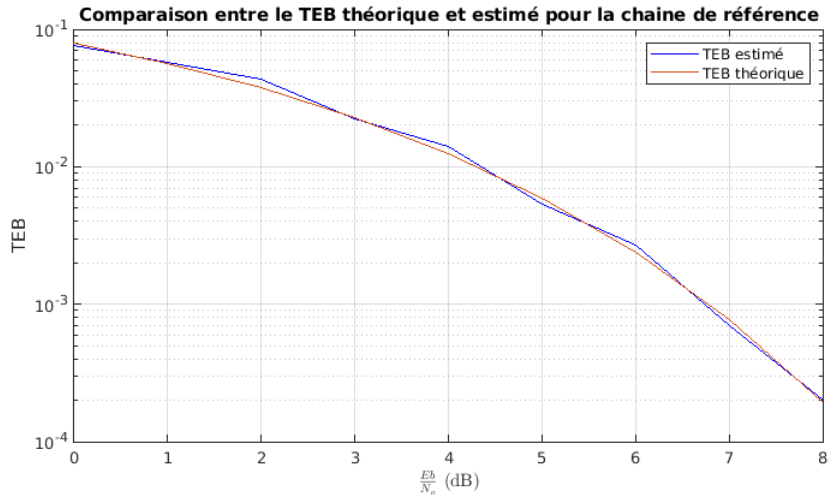
Figure 18: Diagramme de l'œil pour différents SNR

On remarque que plus le SNR est important les interférences sont faibles, et plus le bruit est dominant sur le signal le diagramme de l'œil n'est pas clair ce qui est dû aux interférences.

2. On trace le taux d'erreur binaire obtenu en fonction du rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur ( $E_b/N_0$ ) en décibels pour des valeurs allant de 0 à 8 dB:



3. On compare le TEB simulé au TEB théorique de la chaine étudiée (tracé superposés sur une même figure).



Ce tracé permet de valider le bon fonctionnement de notre chaine de transmission puisque les deux courbes sont à peu près les mêmes.

### 4.3 Première chaine à étudier, implanter et comparer à la chaine de référence

Fréquence d'échantillonnage  $F_e = 24000$  Hz, débit binaire  $R_b = 3000$  bits par seconde, mapping binaire à moyenne nulle, réponses impulsionnelles des filtres

de mise en forme et de réception,  $h$  et  $h_r$ , données par la figure 19.

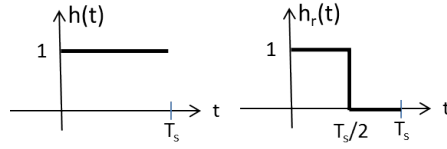


Figure 19: Réponses impulsionnelles des filtres d'émission et de réception.

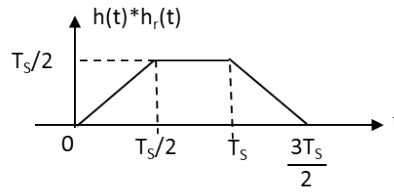
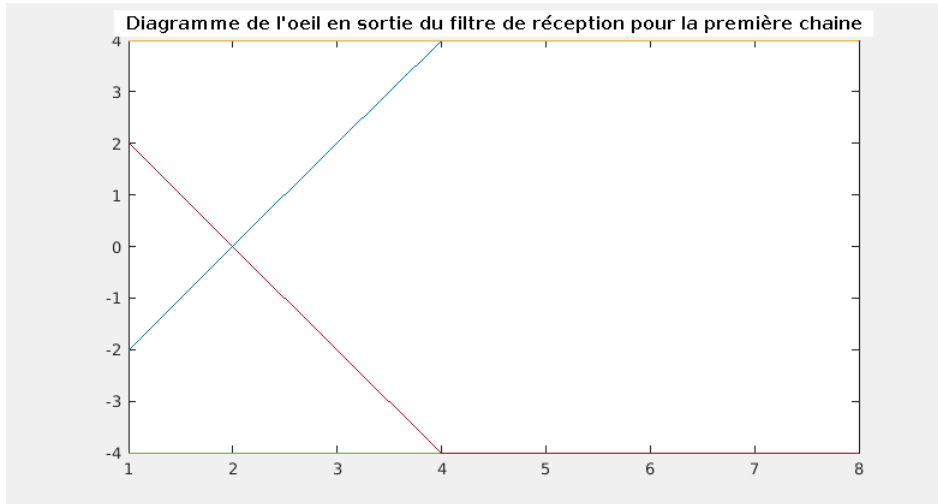


Figure 20: Produit de convolution entre  $h(t)$  et  $h_r(t)$ .

#### 4.3.1 Implantation de la chaîne sans bruit

On trace un diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception sur la durée  $T_s$  :



On déduit du diagramme de l'oeil que  $n_o = N_s/2$ . On voit bien sur le diagramme que c'est l'instant où il y'a pas d'interférences (2 symboles à la fois

car mapping d'ordre 2).

On calcul TEB et on obtient  $TEB = 0$

TEB obtenu sans bruit pour la première chaîne est : 0.000000

#### 4.3.2 Implantation de la chaîne avec bruit

1. On trace le diagramme de l'oeil pour différentes valeurs de  $E_b/N_0$  afin de visualiser l'impact du bruit:

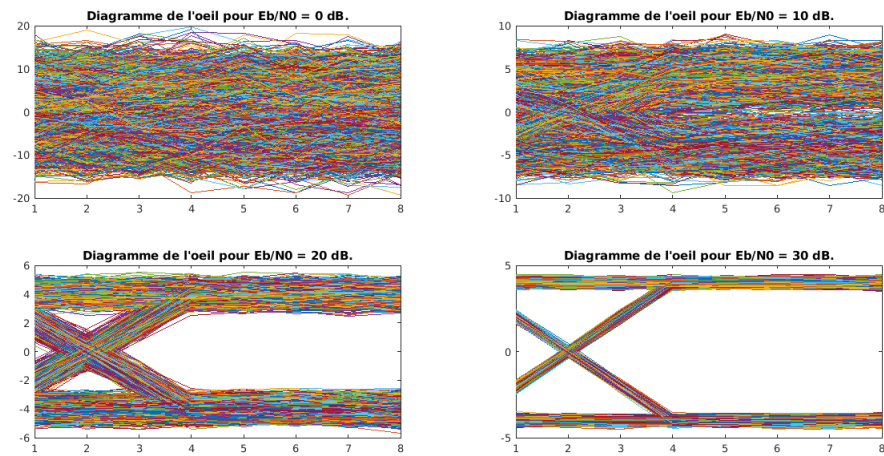
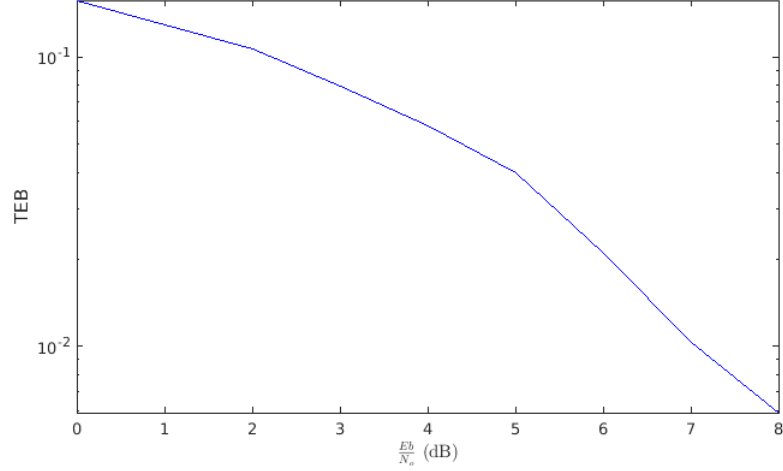


Figure 21: Diagramme de l'œil pour différents SNR

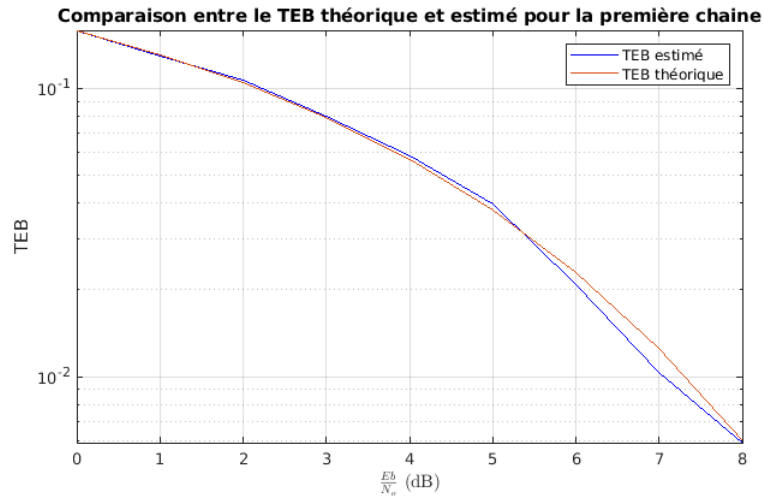
On remarque que plus le SNR est important les interférences sont faibles, et plus le bruit est dominant sur le signal le diagramme de l'œil n'est pas clair ce qui est dû aux interférences.

2. On trace le taux d'erreur binaire obtenu en fonction du rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur ( $E_b/N_0$ ) en décibels pour des valeurs allant de 0 à 8 dB:

**le taux d'erreur binaire (TEB) obtenu en fonction  $E_b/N_0$  (dB) pour la première chaine**

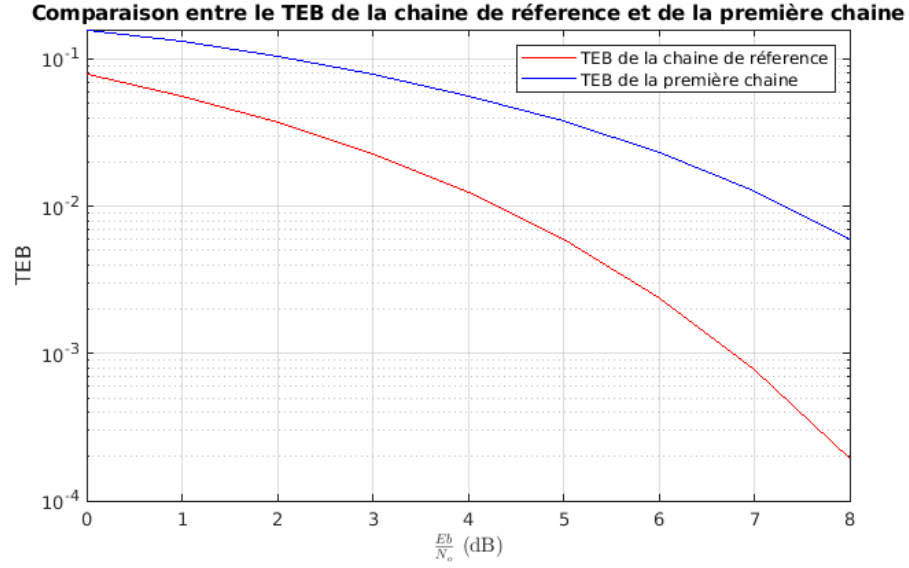


- On compare le TEB simulé au TEB théorique de la chaine étudiée (tracé superposés sur une même figure).



Ce tracé permet de valider le bon fonctionnement de notre chaine de transmission puisque les deux courbes sont à peu près les mêmes.

- On compare le TEB obtenu par simulation pour la chaine de transmission étudiée au TEB théorique de la chaine de référence (comparaison en termes d'efficacité en puissance).



La chaîne de référence est plus efficace en puissance car pour atteindre le même TEB il faut un SNR moins que la première chaîne

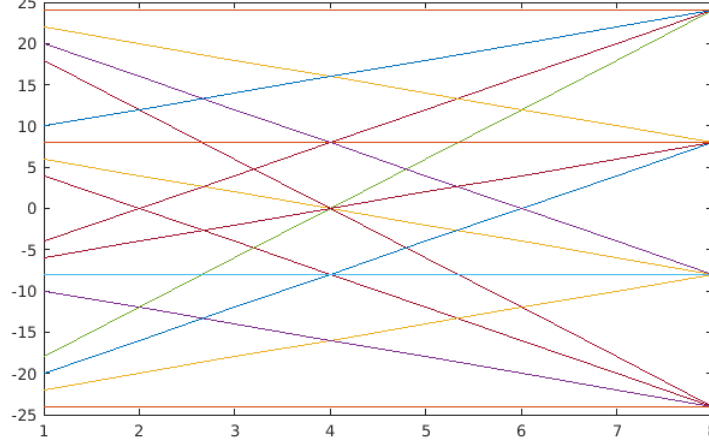
#### 4.4 Deuxième chaîne à étudier, implanter et comparer à la chaîne de référence

Fréquence d'échantillonnage  $F_e = 24000$  Hz, débit binaire  $R_b = 3000$  bits par seconde, mapping 4-aire à moyenne nulle (symboles  $a_k \in \{-3, -1, 1, 3\}$ ), réponses impulsionnelles des filtres de mise en forme et de réception,  $h$  et  $h_r$ , rectangulaires de hauteur 1 et de durée  $T_s$ .

#### 4.5 Implantation de la chaîne sans bruit

On trace un diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception sur la durée  $T_s$  :

**Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception pour la deuxième chaine**



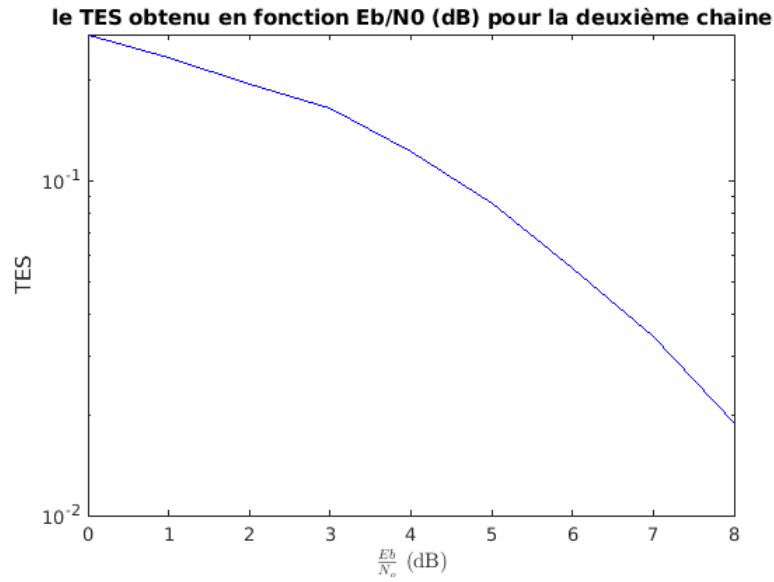
On déduit du diagramme de l'oeil que  $n_o = N_s/2$ , On voit bien sur le diagramme que c'est l'instant où il y'a pas d'interférences (2 symboles à la fois car mapping d'ordre 2).

On calcul le Taux d'Erreur Binaire, et on obtient  $TEB = 0$ .

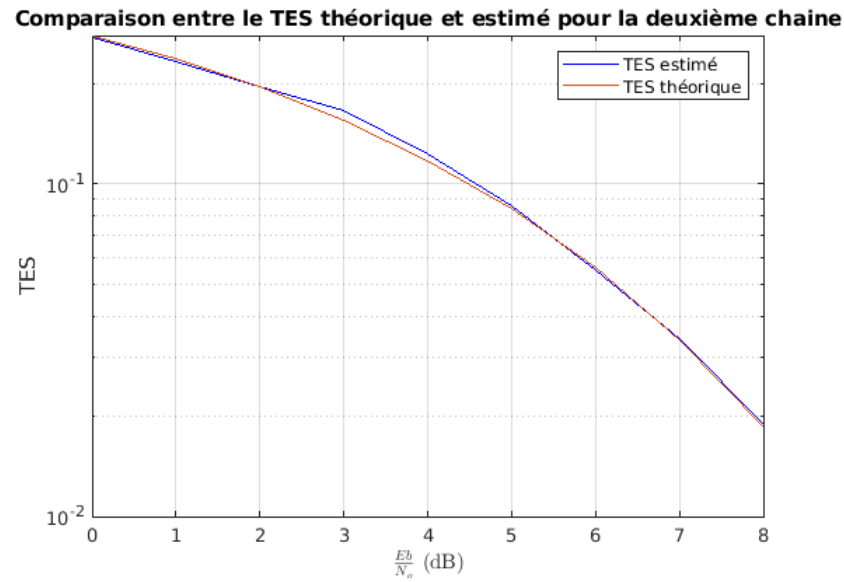
TEB obtenu sans bruit pour la deuxième chaine est : 0.000000

#### 4.6 Implantation de la chaine avec bruit

1. On rajoute le bruit et on trace le taux d'erreur symbole (TES) obtenu en fonction du rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur ( $E_b/N_0$ ) en décibels. On prendra des valeurs de ( $E_b/N_0$ ) dB allant de 0 à 8 dB:



2. On compare le TES obtenu par simulation sur la chaine implantée au TES donné pour la chaine étudiée dans l'étude théorique.

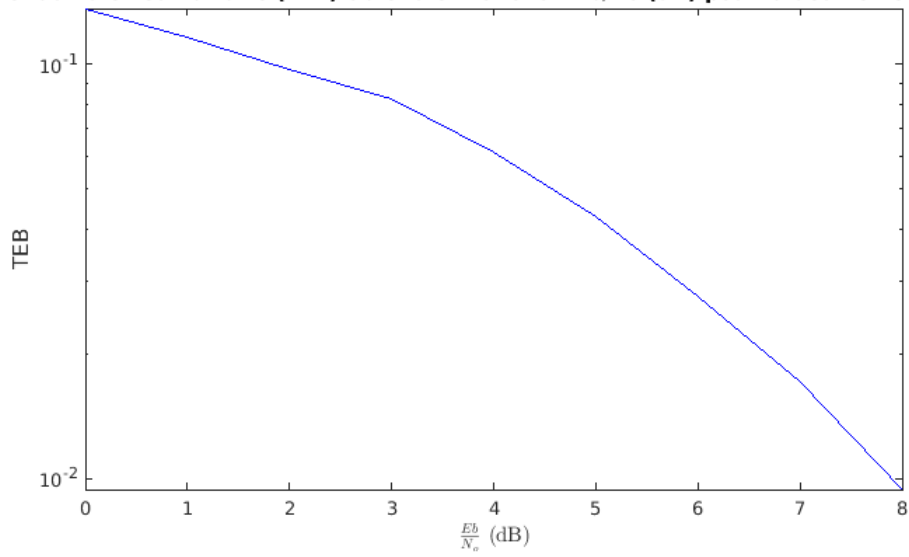


Ce tracé permet de valider le bon fonctionnement de notre chaine de transmission puisque les deux courbes sont à peu près les mêmes.



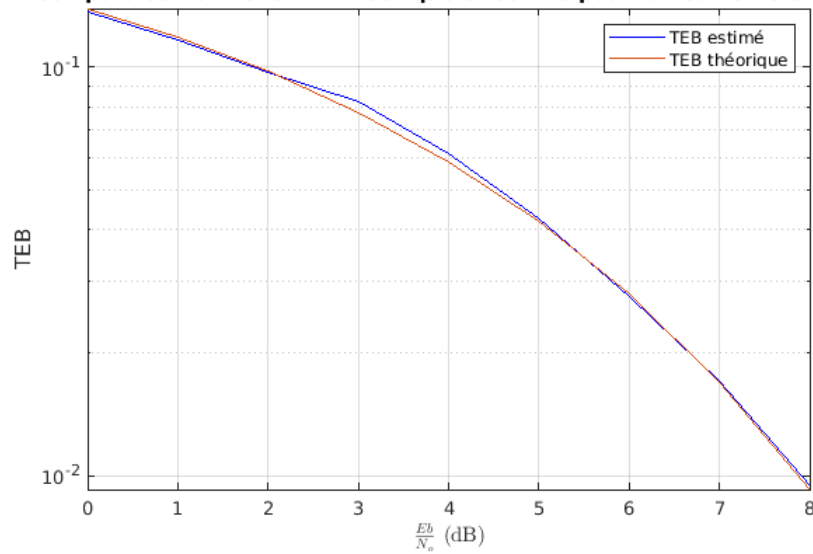
3. On trace le taux d'erreur binaire (TEB) obtenu en fonction du rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur ( $E_b/N_0$ ) en décibels. On prendra des valeurs de ( $E_b/N_0$ ) dB allant de 0 à 8 dB.

**le taux d'erreur binaire (TEB) obtenu en fonction  $E_b/N_0$  (dB) pour la deuxième chaine**



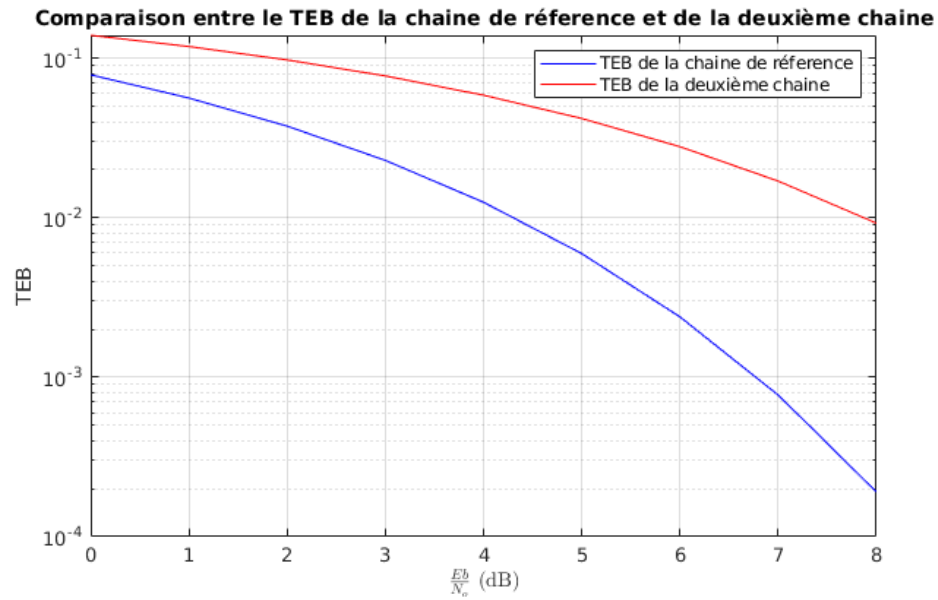
4. On compare le TEB obtenu par simulation sur la chaine implantée au TEB donné pour la chaine étudiée dans l'étude théorique.

**Comparaison entre le TEB théorique et estimé pour la deuxième chaine**



Ce tracé permet de valider le bon fonctionnement de notre chaîne de transmission puisque les deux courbes sont à peu près les mêmes.

5. On compare le TEB obtenu par simulation pour la chaîne de transmission étudiée au TEB théorique de la chaîne de référence (comparaison en termes d'efficacité en puissance).



La chaîne de référence est plus efficace en puissance car pour atteindre le même TEB il faut un SNR moins que la deuxième chaîne.