



# Rapport de Télécommunications

Anas SEGHROUCHNI, Léo LAZARE

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 . . . . .	4
2.3.3	Modulateur 3 . . . . .	5
2.3.4	Comparaison des modulateurs implantés en termes d'efficacité spectrale . .	5
<b>3</b>	<b>Étude des interférences entre symbole et du critère de Nyquist</b>	<b>6</b>
3.1	Introduction . . . . .	6
3.2	Étude sans canal de propagation . . . . .	6
3.2.1	Tracé le signal en sortie du filtre de réception . . . . .	6
3.3	Étude avec canal de propagation sans bruit . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Étude de l'impact du bruit, filtrage adapté, taux d'erreur binaire, efficacité en puissance</b>	<b>10</b>
4.1	Introduction . . . . .	10
4.2	Chaîne de référence . . . . .	10
4.2.1	Implantation de la chaîne sans bruit . . . . .	10
4.2.2	Implantation de la chaîne avec bruit . . . . .	10
4.3	Première chaîne à étudier, implanter et comparer à la chaîne de référence . . . . .	12
4.3.1	Implantation de la chaîne sans bruit . . . . .	12
4.3.2	Implantation de la chaîne avec bruit . . . . .	13
4.4	Deuxième chaîne à étudier, implanter et comparer à la chaîne de référence . . . . .	15
4.5	Implantation de la chaîne sans bruit . . . . .	15
4.6	Implantation de la chaîne avec bruit . . . . .	15
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>17</b>

## List of Figures

1	Modulateur 1, signal transmis et densité spectrales . . . . .	4
2	Modulateur 2, signal transmis et densité spectrales . . . . .	5
3	Modulateur 3, signal transmis et densité spectrales . . . . .	5
4	DSP des signaux générés par les différents modulateurs étudiés . . . . .	5
5	Signal en sortie du filtre de réception . . . . .	6
6	Réponse impulsionnelle globale . . . . .	6
7	Signal en sortie du filtre de réception . . . . .	7
8	Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception . . . . .	7
9	Réponse impulsionnelle globale . . . . .	8
10	Diagramme de l'oeil à la sortie du filtre de réception pour $BW = 8000$ . . . . .	8
11	$ H(f)H_r(f) $ et $ H_c(f) $ , . . . . .	8
12	Réponse impulsionnelle globale . . . . .	9
13	Diagramme de l'oeil à la sortie du filtre de réception pour $BW = 1000$ . . . . .	9
14	$ H(f)H_r(f) $ et $ H_c(f) $ , . . . . .	9
15	Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception sur la durée $T_s$ . . . . .	10
16	Diagramme de l'oeil pour différentes valeurs de $E_b/N_0$ . . . . .	11
17	Tracé expérimental et théorique du TEB en fonction de $E_b/N_0$ . . . . .	11
18	Réponses impulsionnelles des filtres d'émission et de réception. . . . .	12

19	Produit de convolution entre $h(t)$ et $h_r(t)$ . . . . .	12
20	Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception sur la durée $T_s$ . . . . .	13
21	Diagramme de l'oeil pour différentes valeurs de $E_b/N_0$ . . . . .	14
22	Tracé expérimental et théorique du TEB en fonction de $E_b/N_0$ . . . . .	14
23	Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception sur la durée $T_s$ . . . . .	15
24	Tracé expérimental et théorique du TES en fonction de $E_b/N_0$ . . . . .	16
25	Tracé expérimental et théorique du TEB en fonction de $E_b/N_0$ . . . . .	17

# 1 Introduction

L'objectif du travail présenté dans ce rapport était d'implémenter une chaîne de transmission en bande de base. Nous allons en générer plusieurs en cherchant à optimiser l'efficacité spectrale et la puissance du signal.

## 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

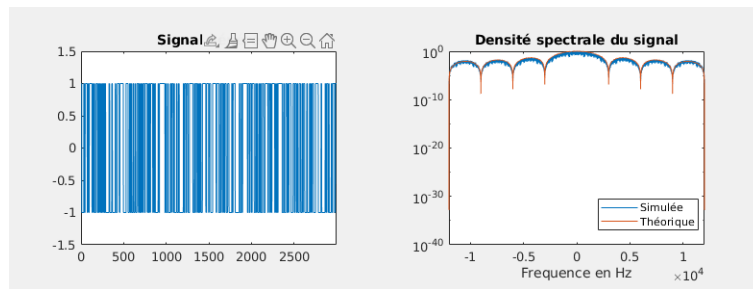


Figure 1: Modulateur 1, signal transmis et densité spectrales

#### 2.3.2 Modulateur 2

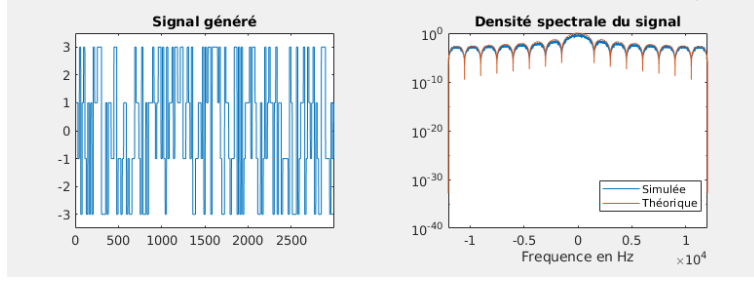


Figure 2: Modulateur 2, signal transmis et densité spectrales

### 2.3.3 Modulateur 3

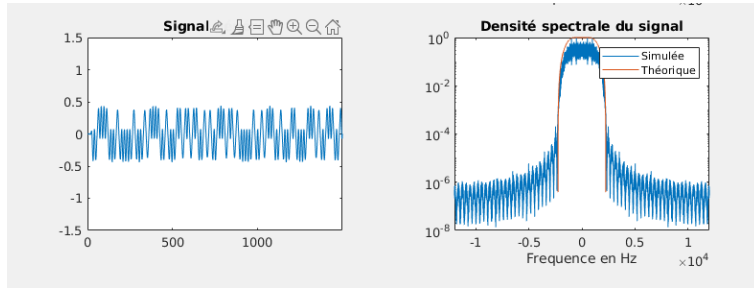


Figure 3: Modulateur 3, signal transmis et densité spectrales

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

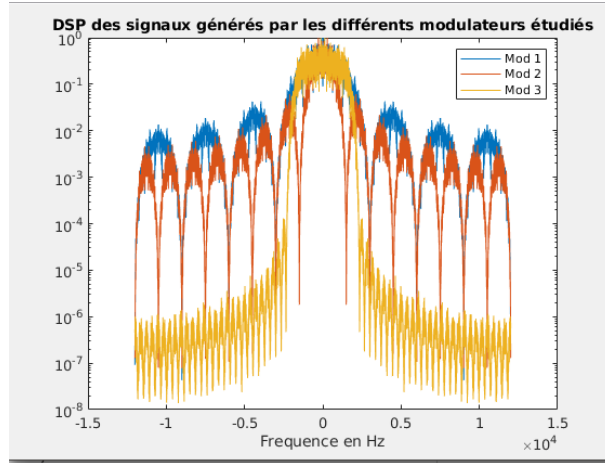


Figure 4: DSP des signaux générés par les différents modulateurs étudiés

On rappelle la formule théorique de l'efficacité spectrale ( $\eta$ ) :

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

Sur la figure ci-dessous, on voit bien que le modulateur le plus efficace est *Mod3*. En effet, c'est celui qui a la bande de fréquence occupée ( $B$ ) la plus faible pour un débit binaire constant ( $R_b$ ),

cela est dû au fait qu'il utilise un filtre en racine de cosinus surélevé. De plus, en augmentant l'ordre du filtre (M) pour un facteur de mise en forme (k) constant, on augmente également son efficacité spectrale. Ainsi, *Mod2* est mieux que *Mod1*. Finalement, les modulateurs classés par ordre d'efficacité spectrale croissant sont les suivants : *Mod1*, *Mod2*, *Mod3*.

### 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

##### 3.2.1 Tracé le signal en sortie du filtre de réception

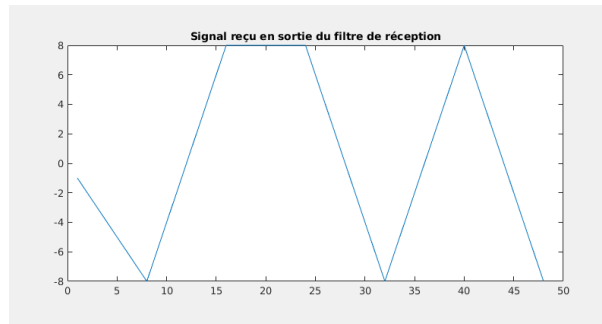


Figure 5: Signal en sortie du filtre de réception

- Le tracé de la figure 5 est bien conforme à ce qui est attendu théoriquement pour le signal en sorti du filtre de reception. En effet si l'on trace la réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission comme sur la figure 6, on peut reconstruire le signal tracé transmis à la main : comme fait sur la Figure 7. En regardant sur *Matlab* la variable *bits* on envoie

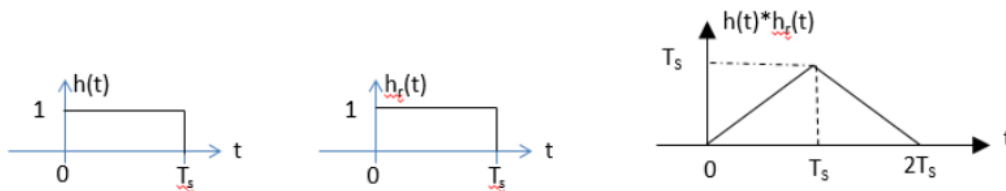


Figure 6: Réponse impulsionnelle globale

011010

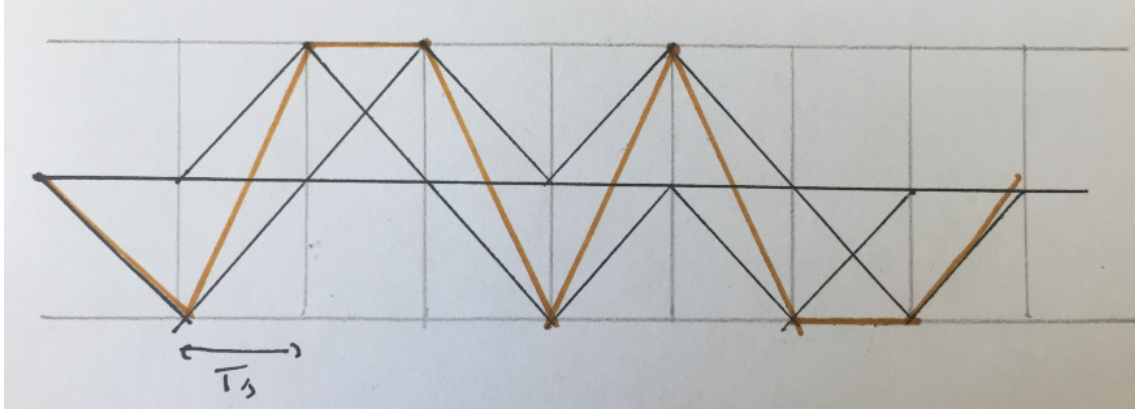


Figure 7: Signal en sortie du filtre de réception

- En regardant  $g(t) = h(t) \times h_r(t)$  on peut déterminer l'instant  $n_0$  optimal permettant d'échantillonner aux instants sans interférences entre symboles  $n_0 + mN_s$ , car ici nous supposons que la canal est AWGN et donc  $g(t)$  représente aussi la réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission. Ainsi on peut trouver le  $n_0$  qui permet de respecter le critère de Nyquist (i.e  $g(n_0) \neq 0$  et  $g(n_0 + mN_s) = 0$ .)

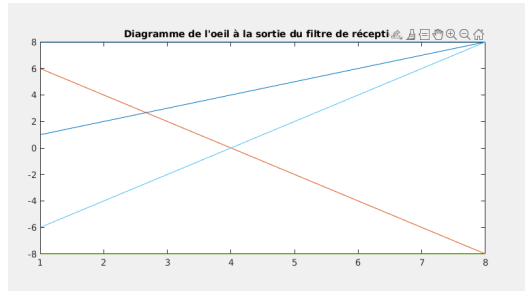


Figure 8: Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception

- Le diagramme de l'oeil est bien conforme à ce qui est attendu, on voit bien les différentes transitions et celle du début. On peut déterminer l'instant  $n_0$  optimal, comme on réalise un mapping binaire il faut chercher un instant où l'on a uniquement 2 choix possibles.
- On obtient bien un TEB nul quand l'on échantillonne avec un  $n_0$  optimal cependant pour  $n_0 = 3$  le critère de Nyquist n'est plus respecté (on peut le voir sur le diagramme de l'oeil), ainsi le TEB est moins bon  $n_0 = 8$ .

### 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.

1. Pour  $BW = 8000$  Hz :

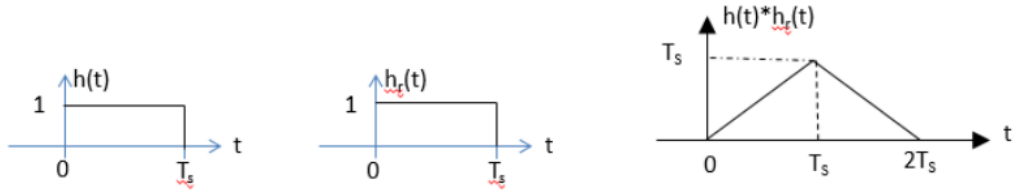


Figure 9: Réponse impulsionnelle globale

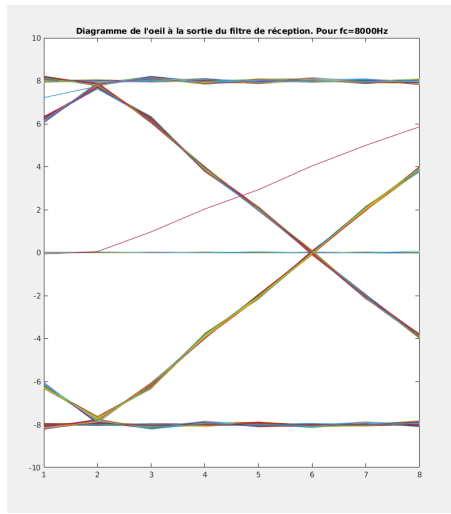


Figure 10: Diagramme de l'oeil à la sortie du filtre de réception pour  $BW = 8000$

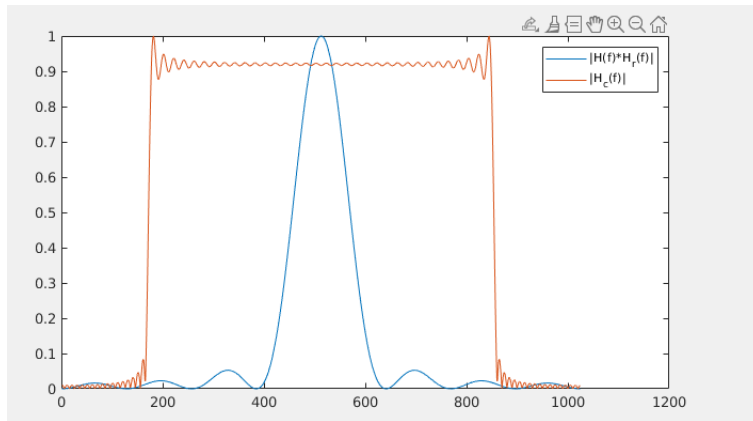


Figure 11:  $|H(f)H_r(f)|$  et  $|H_c(f)|$ ,

On trouve ici un TEB nul, exactement comme la chaîne de transmission sans le canal. On remarque bien sur le tracé des DSP que le canal ne va pas influer sur:  $G(f) = |H(f) * H_r(f) * H_c(f)| = |H(f) * H_r(f)|$  (Figure 11) or comme on l'a vu précédemment  $|H(f) * H_r(f)|$  permet de respecter le critère de Nyquist. C'est pourquoi on retrouve bien un TEB nul.

2. Pour  $BW = 1000$  Hz :



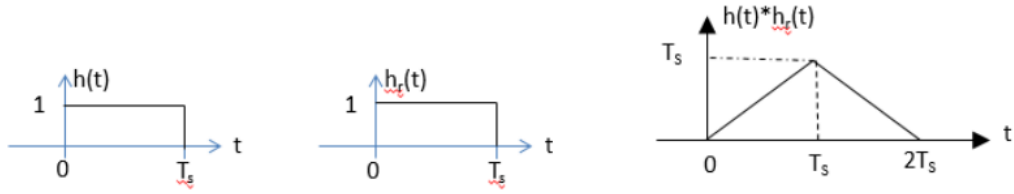


Figure 12: Réponse impulsionnelle globale

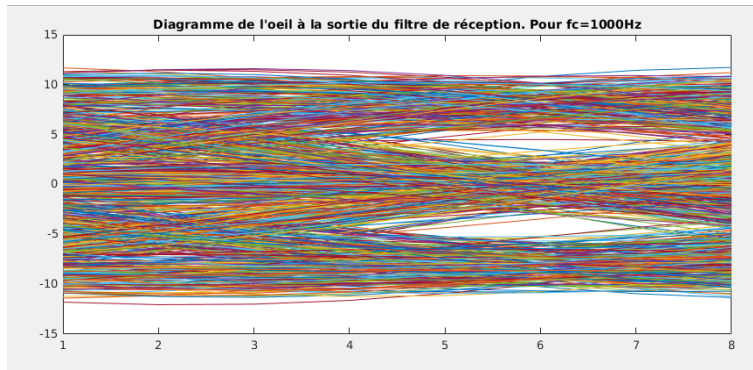


Figure 13: Diagramme de l'oeil à la sortie du filtre de réception pour  $BW = 1000$

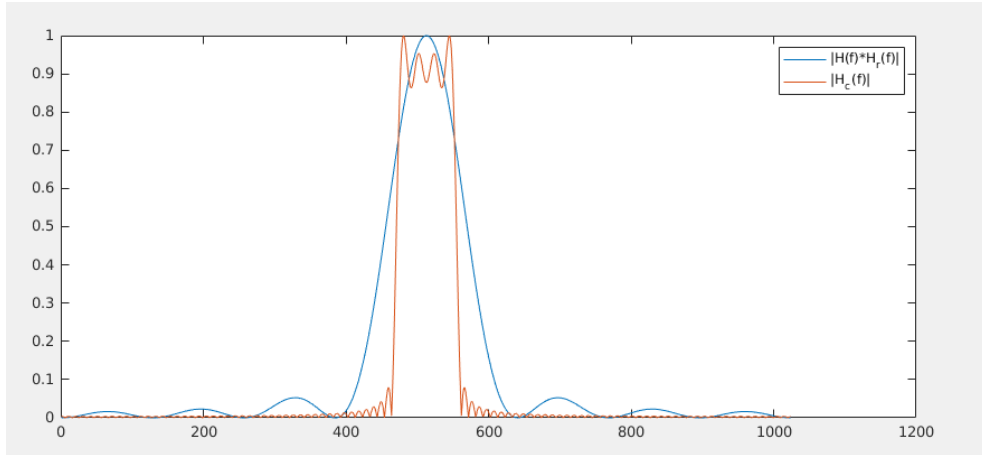


Figure 14:  $|H(f)H_r(f)|$  et  $|H_c(f)|$ ,

Ici on obtient un TEB de 0.1 car on voit bien sur la figure 14 que la bande du canal est plus petite que celle de filtre de réception convolué avec le filtre de mise en forme. Ainsi le critère de Nyquist ne sera plus respecté et donc le TEB ne sera pas minimisé.

## 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  $F_e = 24000$  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  $h_r$ , 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.

#### 4.2.1 Implantation de la chaîne sans bruit

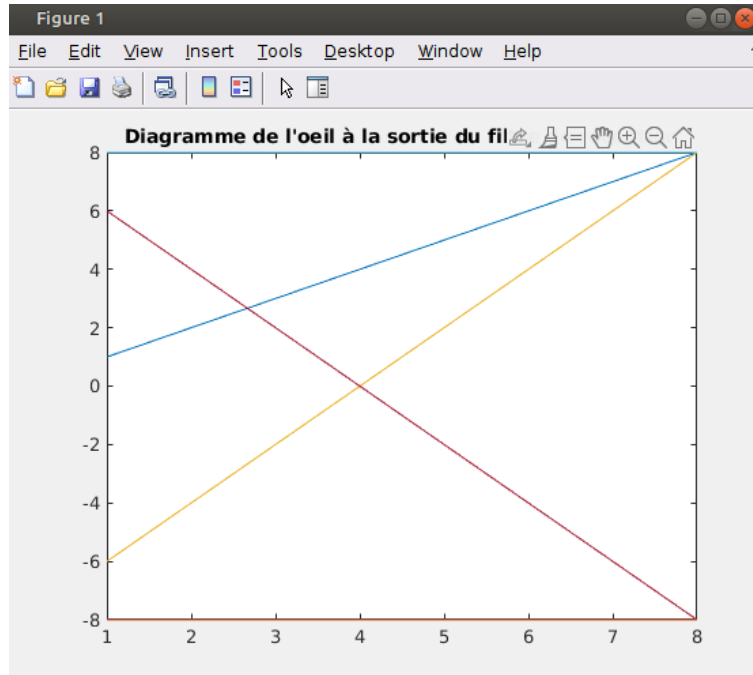


Figure 15: Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception sur la durée  $T_s$

On voit donc sur ce diagramme de l'oeil qu'il faut choisir  $n_0 = 8$ , car c'est l'endroit où le critère de Nyquist peut-être respecté. En effet, on a bien  $z(t_0) = a_m * g(t_0)$ , avec  $a_m \in \{-1, +1\}$  et  $g(t_0) = 8$ , le symbole d'interférence (ISI) y est bien nul. Le diagramme de l'oeil n'est pas exactement conforme à ce qui est attendu en réalité, on a bien la première transition, cependant le diagramme semble coupé à gauche, c'est un problème lié à Matlab.

#### 4.2.2 Implantation de la chaîne avec bruit

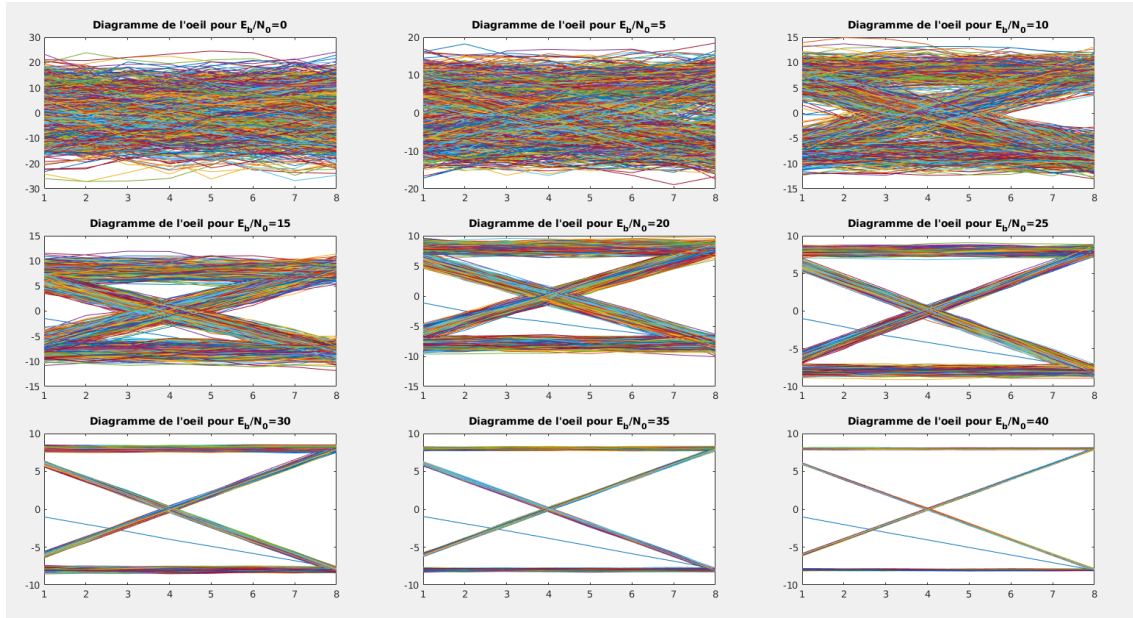


Figure 16: Diagramme de l'oeil pour différentes valeurs de  $E_b/N_0$

On voit que quand le bruit est trop fort, le diagramme de l'oeil est trop imprécis, il est impossible de savoir où échantillonner, on dit que "l'oeil se ferme".

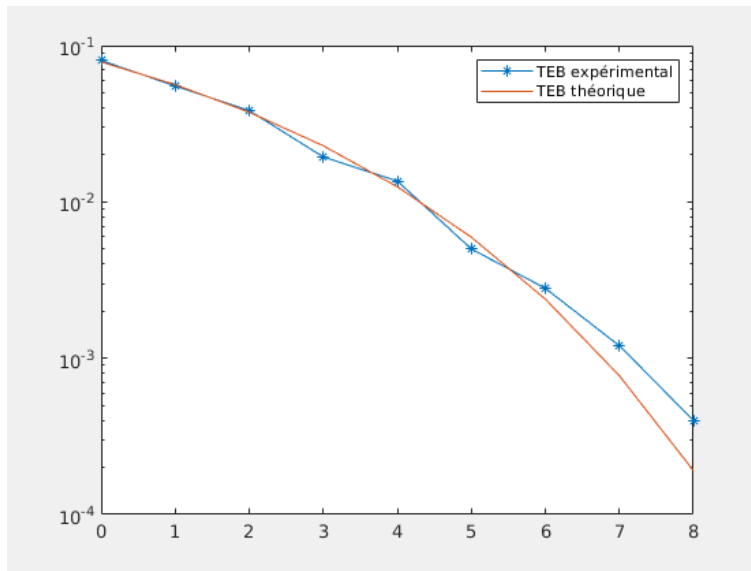


Figure 17: Tracé expérimental et théorique du TEB en fonction de  $E_b/N_0$

On voit bien que le TEB simulé suit bien le TEB théorique en fonction de  $E_b/N_0$ , ainsi la chaîne de transmission fonctionne bien. Les légères différences, quand on augmente le rapport SNR, peuvent s'expliquer par des petites imprécisions de simulation Matlab.

Cela est bien cohérent avec le cours, en effet :

- Le filtrage est adapté (le filtre de réception est bien proportionnel au filtre de mise en forme, c'est le même)

- Il respecte bien le critère de Nyquist
- Le seuil de décision est bien en 0, car la moyenne de l'alphabet est nulle.

### 4.3 Première 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 binaire à moyenne nulle, réponses impulsionnelles des filtres de mise en forme et de réception,  $h$  et  $h_r$ , données par la figure 18.

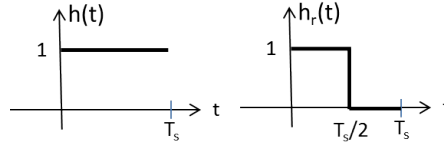


Figure 18: Réponses impulsionnelles des filtres d'émission et de réception.

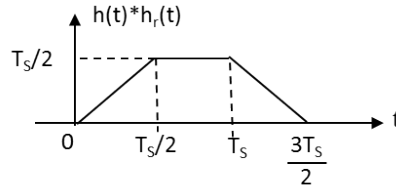


Figure 19: Produit de convolution entre  $h(t)$  et  $h_r(t)$ .

#### 4.3.1 Implantation de la chaîne sans bruit

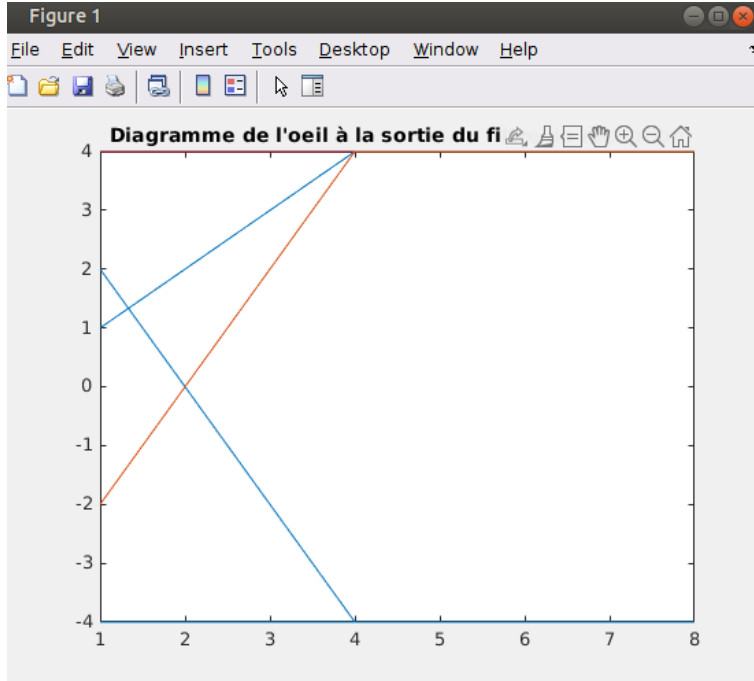


Figure 20: Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception sur la durée  $T_s$

On voit donc sur ce diagramme de l'oeil qu'il faut choisir  $n_0 = 8$ , car c'est l'endroit où le critère de Nyquist peut-être respecté. En effet, on a bien  $z(t_0) = a_m * g(t_0)$ , avec  $a_m \in \{-1, +1\}$  et  $g(t_0) = 4$ , le symbole d'interférence (ISI) y est bien nul. Le diagramme de l'oeil n'est pas exactement conforme à ce qui est attendu en réalité, on a bien la première transition, cependant le diagramme semble coupé à gauche, c'est un problème lié à Matlab.

#### 4.3.2 Implantation de la chaîne avec bruit

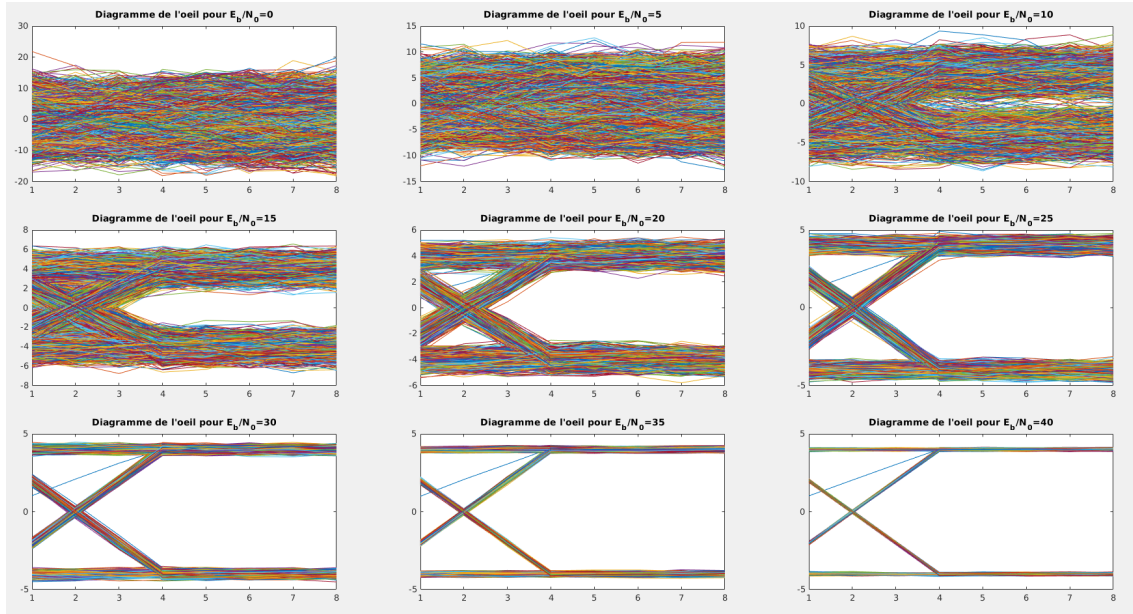


Figure 21: Diagramme de l'oeil pour différentes valeurs de  $E_b/N_0$

On voit que quand le bruit est trop fort, le diagramme de l'oeil est trop imprécis, il est impossible de savoir où échantillonner, on dit que "l'oeil se ferme".

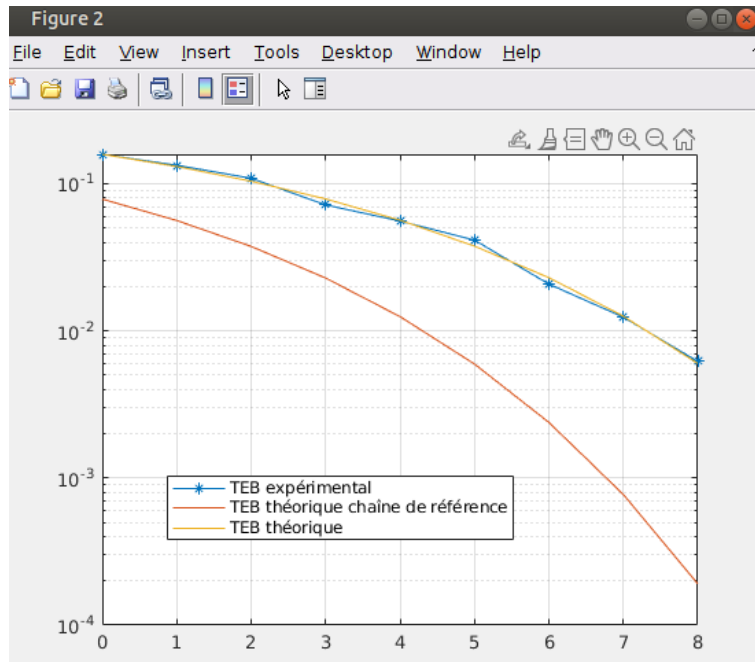


Figure 22: Tracé expérimental et théorique du TEB en fonction de  $E_b/N_0$

On voit bien que le TEB simulé suit bien le TEB théorique en fonction de  $E_b/N_0$ , ainsi la chaîne de transmission fonctionne bien. Les légères différences, quand on augmente le rapport SNR, peuvent s'expliquer par des petites imprécisions de simulation Matlab. On observe que le TEB théorique de la chaîne de référence décroît beaucoup plus vite que celui de la chaîne étudiée.

La chaîne étudiée est donc moins efficace en puissance que la chaîne de référence. Cela s'explique par le fait que, malgré qu'elle respecte le critère de Nyquist et que son seuil de décision soit en 0, son filtrage n'est plus adapté : le filtre de réception n'est plus proportionnel au filtre de mise en forme. En terme d'efficacité spectrale, la seule chose qui différencie les deux chaînes de transmission (étudiée / référence) est la bande de fréquence occupée. Elle est plus faible chez celle de référence du fait du filtre de réception. Ainsi, la chaîne étudiée est plus efficace spectralement que la chaîne de référence.

#### 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

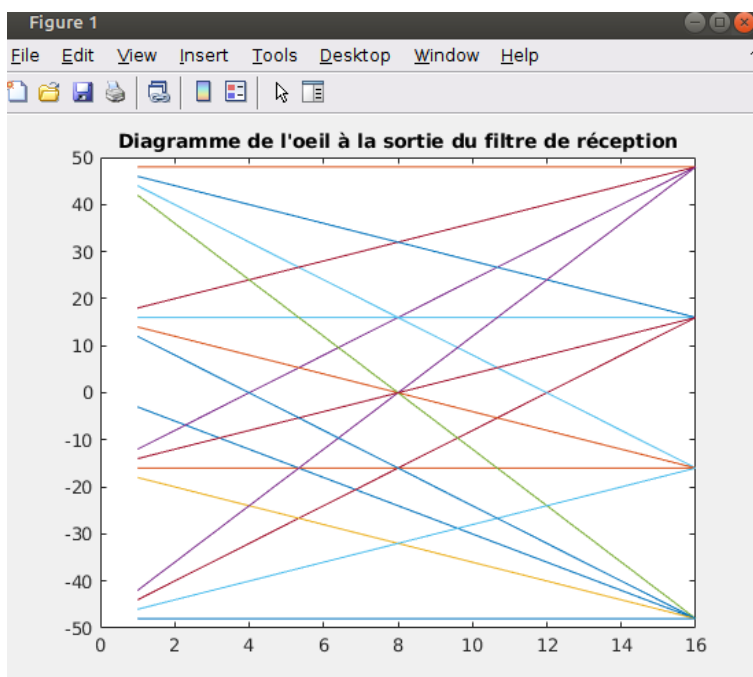


Figure 23: Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception sur la durée  $T_s$

On voit donc sur ce diagramme de l'oeil qu'il faut choisir  $n_0 = 16$ , car c'est l'endroit où le critère de Nyquist peut-être respecté. En effet, on a bien  $z(t_0) = a_m * g(t_0)$ , avec  $a_m \in \{-3, -1, +1, +3\}$  et  $g(t_0) = 17$ , le symbole d'interférence (ISI) y est bien nul. Le diagramme de l'oeil n'est pas exactement conforme à ce qui est attendu en réalité, on a bien la première transition, cependant le diagramme semble coupé à gauche, c'est un problème lié à Matlab.

#### 4.6 Implantation de la chaîne avec bruit

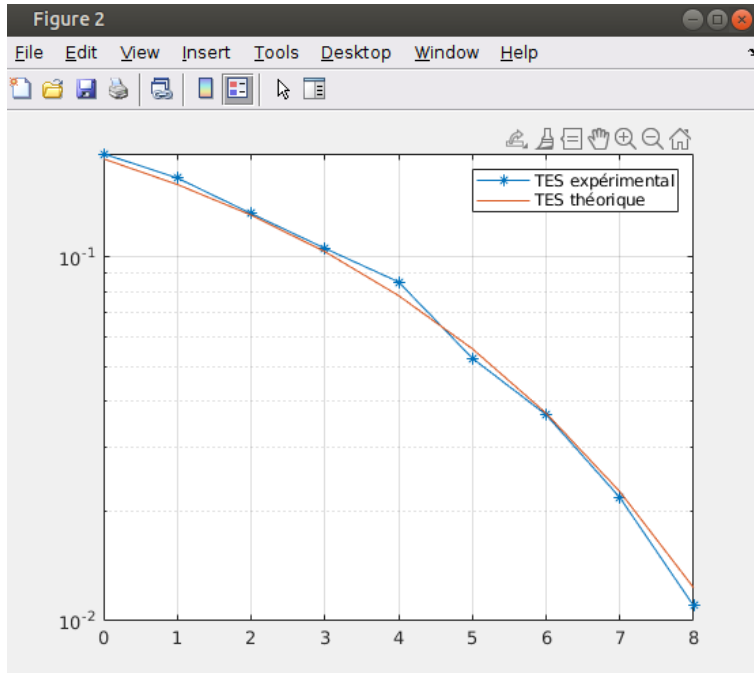


Figure 24: Tracé expérimental et théorique du TES en fonction de  $E_b/N_0$

$$TES = \frac{3}{2}Q \left( \sqrt{\frac{4}{5} \frac{E_b}{N_0}} \right)$$

On voit bien que le TES simulé suit bien le TES théorique en fonction de  $E_b/N_0$ , ainsi la chaîne de transmission fonctionne bien. Les légères différences, quand on augmente le rapport SNR, peuvent s'expliquer par des petites imprécisions de simulation Matlab.



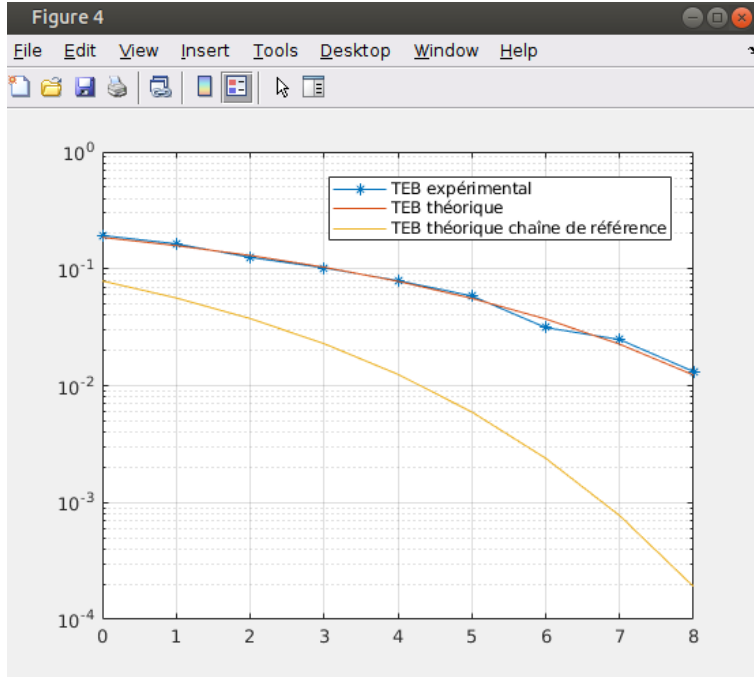


Figure 25: Tracé expérimental et théorique du TEB en fonction de  $E_b/N_0$

$$TES = \frac{3}{4}Q \left( \sqrt{\frac{4}{5} \frac{E_b}{N_0}} \right)$$

On voit bien que le TEB simulé suit bien le TEB théorique en fonction de  $E_b/N_0$ , ainsi la chaîne de transmission fonctionne bien. Les légères différences, quand on augmente le rapport SNR, peuvent s'expliquer par des petites imprécisions de simulation Matlab. On observe que le TEB théorique de la chaîne de référence décroît beaucoup plus vite que celui de la chaîne étudiée. La chaîne étudiée est donc moins efficace en puissance que la chaîne de référence. Cela s'explique par le fait que, malgré qu'elle respecte le critère de Nyquist et que son filtrage soit adaptée, son seuil de décision n'est plus en 0 car c'est du mapping 4-aire qui a donc 3 seuil de décision (0, -2, +2). En terme d'efficacité spectrale, la seule chose qui différencie les deux chaînes de transmission (étudiée / référence) est l'ordre de modulation qui est de 4 pour celle étudiée et 2 pour la chaîne de référence. Ainsi, la chaîne étudiée est plus efficace spectralement que la chaîne de référence.

## 5 Conclusion

Durant ces 3 TPs nous avons vu :

- Différentes modulations puis nous avons pu comparer leurs efficacités spectrales.
- L'importance de respecter le critère de Nyquist et comment identifier quelles chaînes peuvent respecter ce critère à l'aide du diagramme de l'oeil ou de la réponse impulsionnelle globale.
- L'influence du canal de propagation, il peut être la cause d'un non respect du critère de Nyquist.
- L'impacte du bruit et du filtrage adapté sur la chaîne de transmission.