



# Étude de chaines de transmissions en bande de base

Loïc BLANC, Guilhem MANGENOT

Département Sciences du Numérique - Première année  
2022-2023

# Table des matières

<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	Étude . . . . .	4
2.2	Modulateur 1 . . . . .	4
2.3	Modulateur 2 . . . . .	5
2.4	Modulateur 3 . . . . .	6
2.5	Comparaison en efficacité spectrale des modulateurs implantés . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Étude des interférences entre symbole et du critère de Nyquist</b>	<b>8</b>
3.1	Étude . . . . .	8
3.2	Sans canal de propagation . . . . .	8
3.3	Avec canal de propagation . . . . .	11
3.3.1	BW = 1000 . . . . .	11
3.3.2	BW = 8000 . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Étude de l'impact du bruit et du filtrage adapté, notion d'efficacité en puissance</b>	<b>14</b>
4.1	Étude . . . . .	14
4.2	Étude de chaque chaîne de transmission . . . . .	14
4.2.1	Chaîne 1 . . . . .	14
4.2.2	Chaîne 2 . . . . .	17
4.2.3	Chaîne 3 . . . . .	20
4.3	Comparaison des chaînes de transmission implantées . . . . .	22
4.3.1	Comparaison entre les chaînes 1 et 2 . . . . .	22
4.3.2	Comparaison entre les chaînes 1 et 3 . . . . .	23
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>23</b>

## Table des figures

1	Signal généré par le modulateur 1 . . . . .	4
2	DSP estimée . . . . .	5
3	DSPs estimée et théorique . . . . .	5
4	Signal généré par le modulateur 2 . . . . .	5
5	DSP estimée . . . . .	5
6	DSPs estimée et théorique . . . . .	5
7	Signal généré par le modulateur 3 et $\alpha = 0.8$ . . . . .	6
8	DSP estimée ( $\alpha=0.8$ ) . . . . .	6
9	DSPs estimée et théorique ( $\alpha=0.8$ ) . . . . .	6
10	DSP estimée ( $\alpha=0.5$ ) . . . . .	7
11	DSPs estimée et théorique ( $\alpha=0.5$ ) . . . . .	7
12	DSP estimée ( $\alpha=0.1$ ) . . . . .	7
13	DSPs estimée et théorique ( $\alpha=0.1$ ) . . . . .	7
14	DSPs estimées des 3 modulateurs ( $\alpha=0.1$ ) . . . . .	7
15	Schéma de la chaine sans canal et sans bruit . . . . .	8
16	Sortie du signal pour l'étude sans canal . . . . .	9
17	Réponse impulsionnelle pour l'étude sans canal . . . . .	9
18	Diagramme de l'oeil pour l'étude sans canal . . . . .	10
19	Schéma de la chaine avec canal et sans bruit . . . . .	11
20	Réponse impulsionnelle pour l'étude avec canal et BW=1000 . . . . .	11
21	Diagramme de l'oeil pour l'étude avec canal et BW=1000 . . . . .	11
22	Filtre pour l'étude avec canal et BW=1000 . . . . .	12
23	Réponse impulsionnelle pour l'étude avec canal et BW=8000 . . . . .	12
24	Diagramme de l'oeil pour l'étude avec canal et BW=8000 . . . . .	12
25	Filtre pour l'étude avec canal et BW=8000 . . . . .	13
26	Schéma de la chaine avec bruit . . . . .	14
27	Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de mise en forme (chaîne 1 sans bruit) . . .	15
28	Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de mise en forme pour $E_b/N_0=1$ (chaîne 1 avec bruit) . . . . .	15
29	Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de mise en forme pour $E_b/N_0=15$ (chaîne 1 avec bruit) . . . . .	16
30	Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de mise en forme pour $E_b/N_0=100$ (chaîne 1 avec bruit) . . . . .	16
31	TEB théorique et estimé en fonction de $E_b/N_0$ (chaîne 1 avec bruit) . . . . .	17
32	Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de mise en forme (chaîne 2 sans bruit) . . .	17
33	Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de mise en forme pour $E_b/N_0=1$ (chaîne 2 avec bruit) . . . . .	18
34	Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de mise en forme pour $E_b/N_0=15$ (chaîne 2 avec bruit) . . . . .	18
35	Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de mise en forme pour $E_b/N_0=100$ (chaîne 2 avec bruit) . . . . .	19
36	TEB théorique et estimé en fonction de $E_b/N_0$ (chaîne 2 avec bruit) . . . . .	19
37	Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de mise en forme (chaîne 3 sans bruit) . . .	20
38	Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de mise en forme pour $E_b/N_0=1$ (chaîne 3 avec bruit) . . . . .	21
39	Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de mise en forme pour $E_b/N_0=15$ (chaîne 3 avec bruit) . . . . .	21
40	Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de mise en forme pour $E_b/N_0=100$ (chaîne 3 avec bruit) . . . . .	21
41	TEB théorique et estimé en fonction de $E_b/N_0$ (chaîne 3 avec bruit) . . . . .	22
42	TEB estimés des chaines 1 et 2 . . . . .	22
43	TEB estimés des chaines 1 et 3 . . . . .	23

# 1 Introduction

L'objectif de ce projet était l'initiation à l'étude d'une chaîne de transmission en bande de base. Cela comprend l'évaluation des efficacités spectrale et en puissance ; l'identification de solutions possibles pour l'optimisation en termes d'efficacités ; et la comparaison de chaînes de transmission en termes d'efficacités.

Le programme *modulateurs.m* contient le code et les figures constituant les parties 2 et 3 de ce rapport.

Le programme *chaines.m* contient ceux constituant la partie 4.

## 2 Étude de modulateurs bande de base

### 2.1 Étude

Ce premier travail est 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.

Pour cela, on implante plusieurs modulateurs bande de base, en utilisant une fréquence d'échantillonnage  $Fe = 24000$  Hz pour transmettre  $N_{bits} = 1000$  bits à un même débit binaire  $Rb = 3000$  bits par seconde.

### 2.2 Modulateur 1

Le modulateur 1 utilise un mapping à symboles binaires ( $M = 2$ ) de moyenne nulle, et un filtre de mise en forme rectangulaire de hauteur 1 et de durée égale à la durée symbole.

Les bits 1 sont codés par le symbole 1, et les bits 0 par le symbole -1. On sur-échantillonne ensuite le signal mappé par un facteur de sur-échantillonnage  $Ns = Fe \times \log_2(M) / Rb$  puis on lui applique le filtre de mise en forme. Le signal en sortie de filtre est celui que nous transmettons (figure 1).

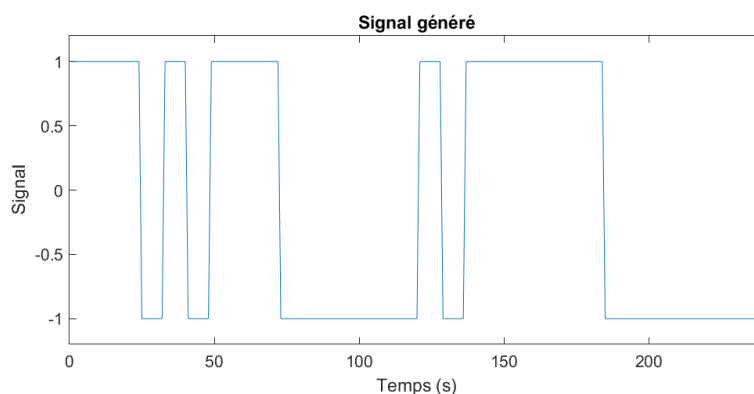


FIGURE 1 – Signal généré par le modulateur 1

On estime la densité spectrale de puissance (DSP) de ce signal avec un périodogramme de Welch, par la commande *pwelch* sous MatLab (figure 2). On peut calculer la DSP théorique de ce signal par la formule

$$S(f) = T_s \times \text{sinc}(\pi f T_s) \quad (1)$$

où  $T_b = \frac{1}{R_b}$  est la durée symbole. On peut la comparer à la DSP estimée précédemment (figure 3).

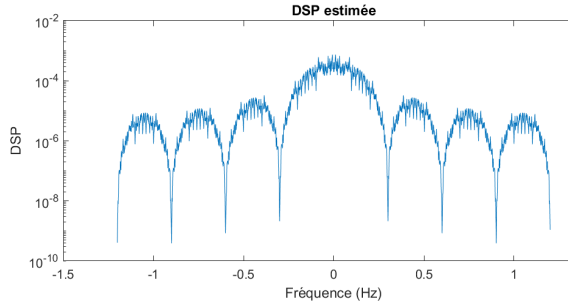


FIGURE 2 – DSP estimée

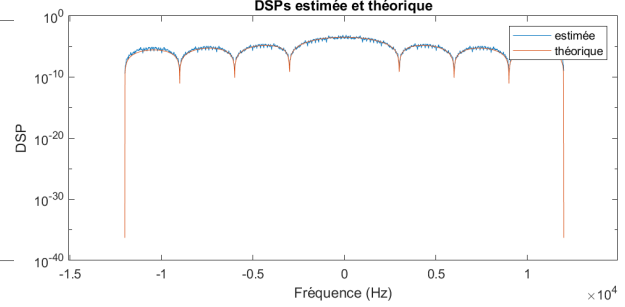


FIGURE 3 – DSPs estimée et théorique

## 2.3 Modulateur 2

Le modulateur 2 utilise un mapping à symboles 4-aires ( $M = 4$ ) de moyenne nulle, et un filtre de mise en forme identique à celui du modulateur 1.

Les bits sont codés par paires, le symbole 1 codant pour 00, le 3 pour 10, le -1 pour 11 et le -3 pour 01. Le signal subit un traitement identique à celui détaillé précédemment pour obtenir un signal à transmettre (figure 4) dont on peut estimer la DSP par *pwelch* et calculer la DSP théorique par la formule 2.

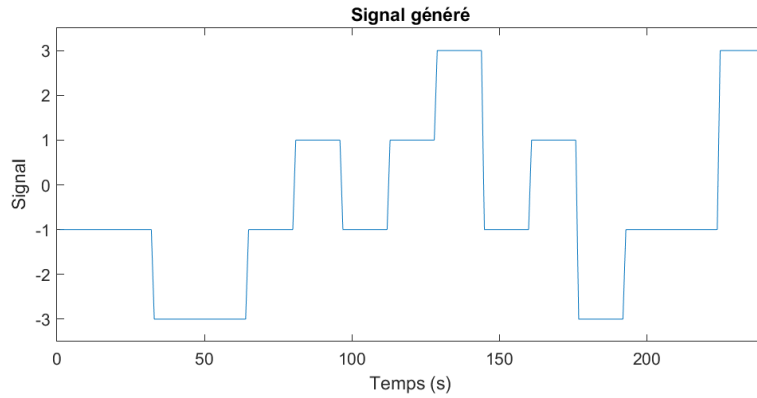


FIGURE 4 – Signal généré par le modulateur 2

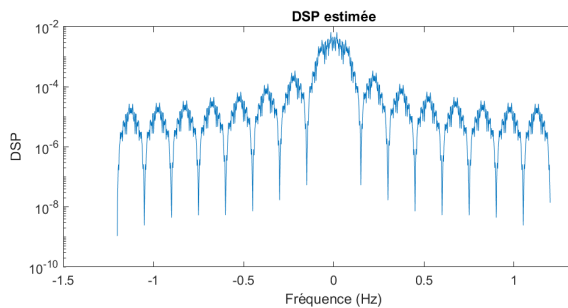


FIGURE 5 – DSP estimée

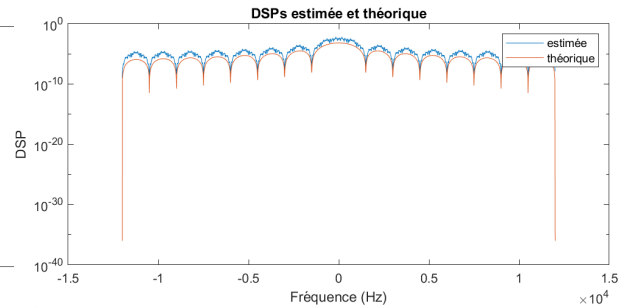


FIGURE 6 – DSPs estimée et théorique

## 2.4 Modulateur 3

Le modulateur 3 utilise un mapping à symboles binaire de moyenne nulle identique au premier modulateur, et un filtre de mise en forme en racine de cosinus surélevé de roll off  $\alpha \in [0, 1]$  et de réponse impulsionnelle de longueur  $N = L \times N_s + 1$  échantillons. En fixant dans un premier temps  $\alpha$  arbitrairement, on obtient le signal généré suivant (figure 7).

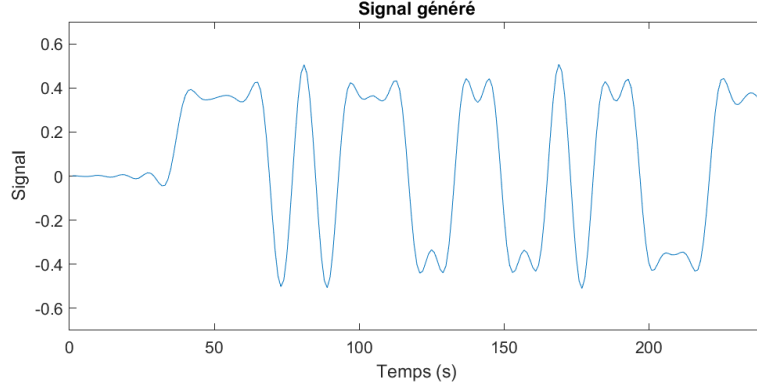


FIGURE 7 – Signal généré par le modulateur 3 et  $\alpha = 0.8$

On peut estimer sa DSP avec Welch (figure 8) et calculer sa DSP théorique (figure 9) par la formule suivante :

$$S(f) = \frac{\sigma_a^2}{T_s} \begin{cases} T_s \text{ si } |f| \leq \frac{1-\alpha}{2T_s} \\ \frac{T_s}{2} (1 + \cos(\frac{\pi T_s}{\alpha} (|f| - \frac{1-\alpha}{2T_s}))) \text{ pour } \frac{1-\alpha}{2T_s} \leq |f| \leq \frac{1+\alpha}{2T_s} \\ 0 \text{ sinon} \end{cases} \quad (2)$$

où  $\sigma_a^2$  est la variance des symboles émis.

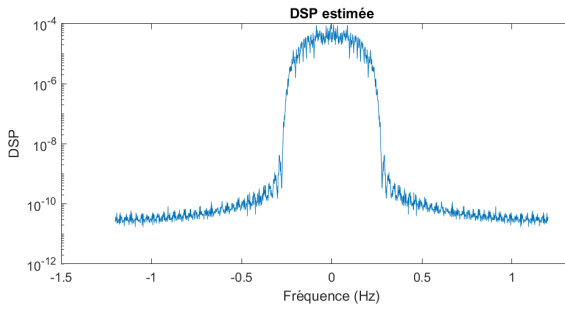


FIGURE 8 – DSP estimée ( $\alpha=0.8$ )

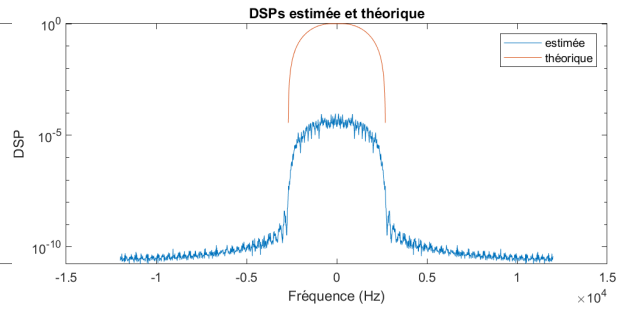


FIGURE 9 – DSPs estimée et théorique ( $\alpha=0.8$ )

On peut faire varier la valeur du roll off  $\alpha$  et observer la DSP du signal généré par le modulateur (figures 10, 11, 12, 13). On remarque que diminuer le roll off permet une meilleure efficacité du filtre ( $\alpha = 0$  correspondant à un filtre passe-bas idéal), mais se compense par un coût en puissance plus élevé.

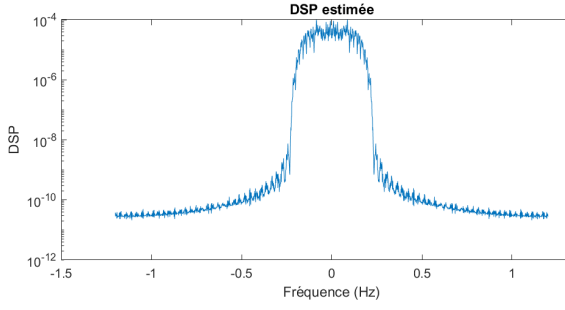


FIGURE 10 – DSP estimée ( $\alpha=0.5$ )

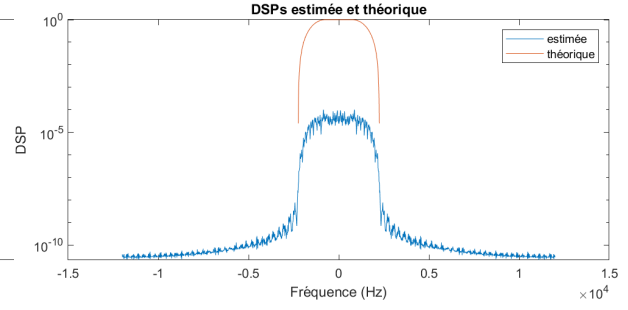


FIGURE 11 – DSPs estimée et théorique ( $\alpha=0.5$ )

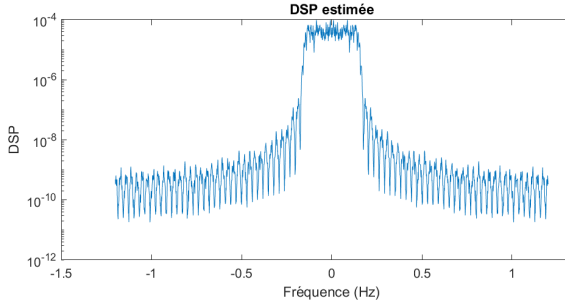


FIGURE 12 – DSP estimée ( $\alpha=0.1$ )

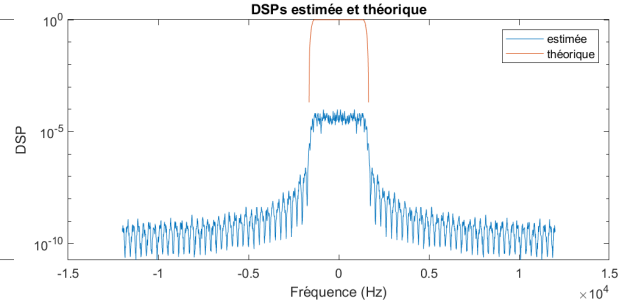


FIGURE 13 – DSPs estimée et théorique ( $\alpha=0.1$ )

## 2.5 Comparaison en efficacité spectrale des modulateurs implantés

On définit l'efficacité spectrale d'une transmission comme le rapport  $\eta = R_b / B$  où  $R_b$  est le débit binaire et  $B$  la largeur de la bande de transmission.

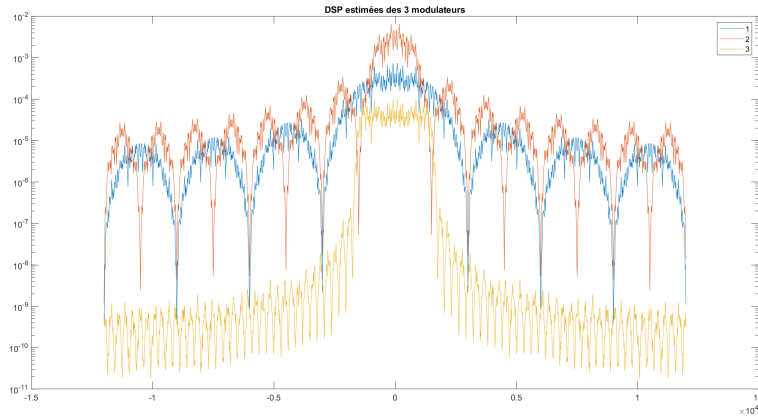


FIGURE 14 – DSPs estimées des 3 modulateurs ( $\alpha=0.1$ )

La figure 14 compare les densités spectrales de puissance des 3 modulateurs pour un même débit binaire  $R_b = 3000$  bits/s.

On constate que les lobes secondaires du modulateur 3 sont négligeables par rapport aux autres, donc le modulateur 3 est le plus efficace. De plus,  $B_1 > B_2$  et  $\eta = R_b / B$ , donc le modulateur 2 est plus efficace que le 1. On a finalement  $\eta_3 > \eta_2 > \eta_1$ .

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

#### 3.1 Étude

Cette deuxième partie est consacrée à l'analyse des interférences entre symboles dans une chaîne de transmission en bande de base, leur impact sur la transmission et l'influence du (non) respect du critère de Nyquist.

On travaillera sur une chaîne de transmission de fréquence d'échantillonnage  $F_e = 24000$  Hz qui transmettra à un débit binaire  $Rb = 3000$  bits/s. On utilisera un mapping binaire à moyenne nulle et des filtres de mise en forme et de réception de même réponse impulsionnelles rectangulaires de durées égales à la durée symbole et de hauteur 1.

#### 3.2 Sans canal de propagation

Cette première étude se fait sans canal de propagation (donc sans bruit et sans filtrage introduit par le canal). On étudie donc uniquement le bloc modulateur/démodulateur.

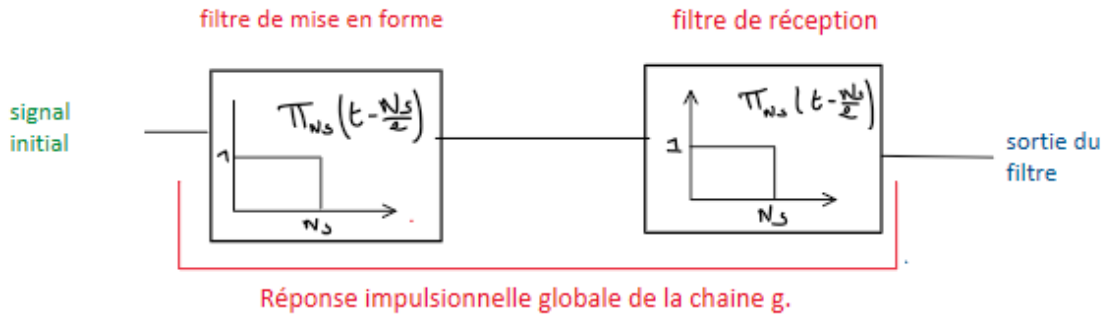


FIGURE 15 – Schéma de la chaîne sans canal et sans bruit

Nous pouvons donc calculer  $g$  en effectuant le produit de convolution du filtre de réception ( $h_r$ ) et du filtre de mise en forme ( $h_{mf}$ ).

Tout d'abord, le filtre de réception  $h_r$  est donné par :

$$h_r(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < N_s \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3)$$

De même, le filtre de mise en forme  $h_{mf}$  est donné par :

$$h_{mf}(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < N_s \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4)$$

On a donc :

$$g(t) = (h_r * h_{mf})(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_r(\tau) h_{mf}(t - \tau) d\tau = \Lambda_{T_s}(t - T_s) \quad (5)$$

Donc  $g(t)$  est une fonction triangulaire : cela est vérifié par le tracé de la réponse impulsionnelle globale (figure 17) et impacte la sortie du signal (figure 18).



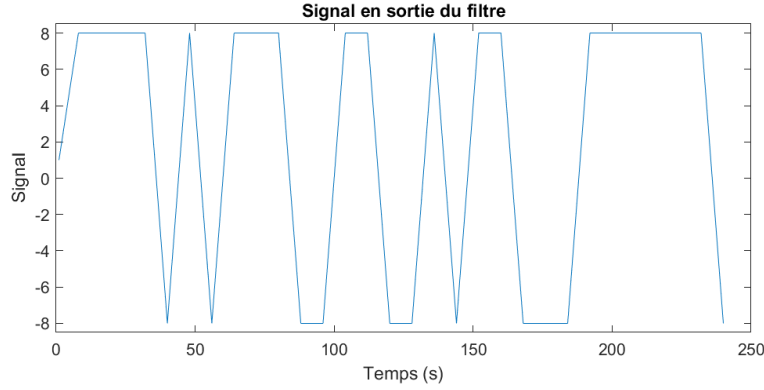


FIGURE 16 – Sortie du signal pour l'étude sans canal

Le signal est composé de pics et de plateau car la réponse impulsionnelle globale est triangulaire. Les plateaux sont dus à l'envoi de plusieurs bits identiques à la suite. On observe donc bien l'impact de la chaîne sur le signal en sortie.

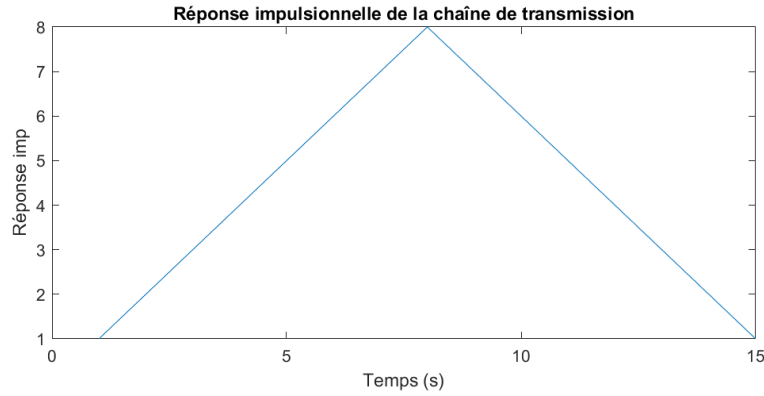


FIGURE 17 – Réponse impulsionnelle pour l'étude sans canal

Le critère de Nyquist nous indique :

$$ISI = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} g(t_0) \neq 0 \\ g(t_0 + pT_s) = 0 \text{ pour } p \in \mathbb{Z}^* \end{cases} \quad (6)$$

Sur ce tracé, nous pouvons observer que le sommet du pic est 8. Cela sera le  $n_0$  utilisé pour le facteur de surechantillonnage.  $n_0$  correspond donc à  $N_s$

En effet, pour  $t_0=8$  qui l'antécédant du pic, nous avons bien les conditions de Nyquist respectées :

$$\begin{cases} g(t_0) &= T_s \\ g(t_0 + T_s) &= g(2T_s) = 0 \\ g(t_0 - T_s) &= g(0) = 0 \end{cases}$$

Nous traçons le diagramme de l'oeil associé :

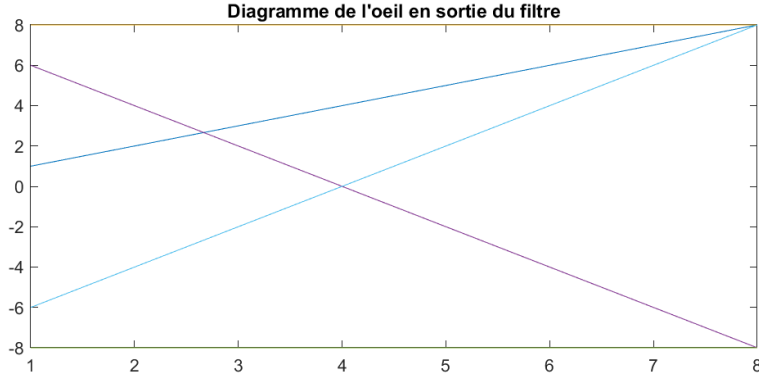


FIGURE 18 – Diagramme de l’oeil pour l’étude sans canal

Le temps pour lequel les droites sont le plus éloignées est 8. Cela signifie que pour  $T_s = 8$ , les interférences sont les moins nombreuses. L’hypothèse de prendre 8 pour  $n_0$  est confirmée.

La taille de la matrice du signal de sortie est huit fois plus grand que les bits d’origine. Nous prenons une valeur tous les 8 donc  $m = 8$ .

On échantillonne donc le signal en sélectionnant les valeurs correspondant à des instants  $k \times m \times N_s + n_0$  avec  $k \in \mathbb{N}^*$ .

On ne reçoit que 2 valeurs différentes et opposées, et on choisit donc un détecteur avec des valeurs précises ( 8 correspondant à 1 et -8 à -1). On a pu choisir des valeurs précises car il y a pas de bruit rajouté.

Le taux d’erreur trouvé est bien de 0.

### Modification de l’instant d’échantillonnage

Pour  $n_0=3$ , le taux d’erreur sans canal et sans bruit est de 1. L’erreur est due au mauvais choix de  $n_0$  qui ne respecte pas le critère de Nyquist. Il y a une mauvaise interprétation qui provoque un décalage dans les bits sélectionnés pour la décision. En effet, il choisit un bits tous les 3+8k symboles au lieu d’en choisir un tous les 8+8k.

### 3.3 Avec canal de propagation

Pour réaliser une chaîne avec canal de propagation sans bruit, nous rajoutons un filtre passe bas qui le simule. Voici le nouveau schéma de la chaîne :

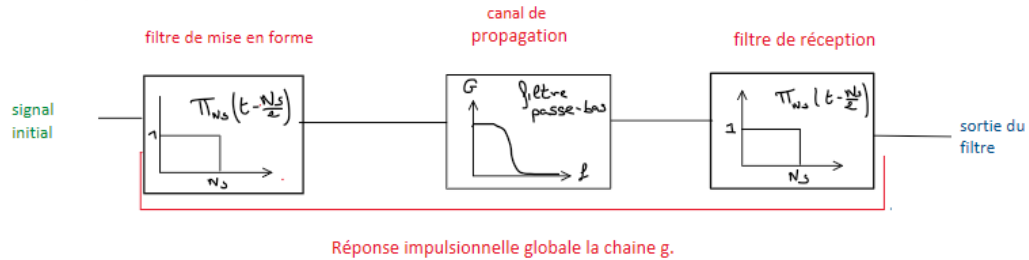


FIGURE 19 – Schéma de la chaîne avec canal et sans bruit

#### 3.3.1 BW = 1000

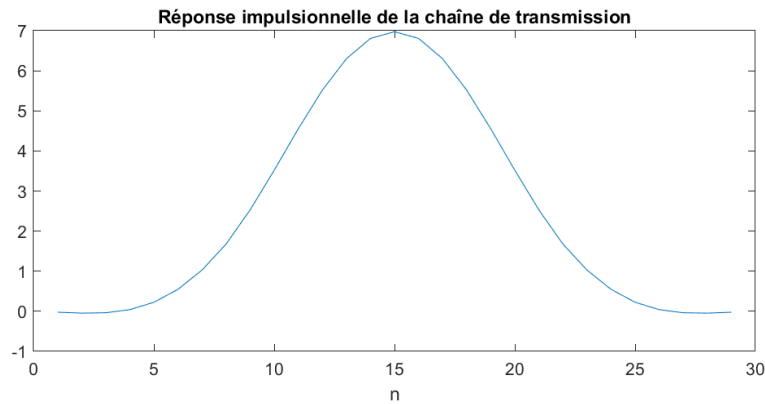


FIGURE 20 – Réponse impulsionnelle pour l'étude avec canal et BW=1000

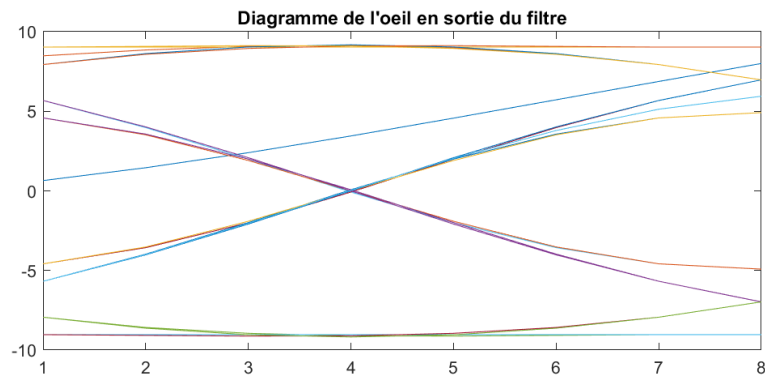


FIGURE 21 – Diagramme de l'oeil pour l'étude avec canal et BW=1000

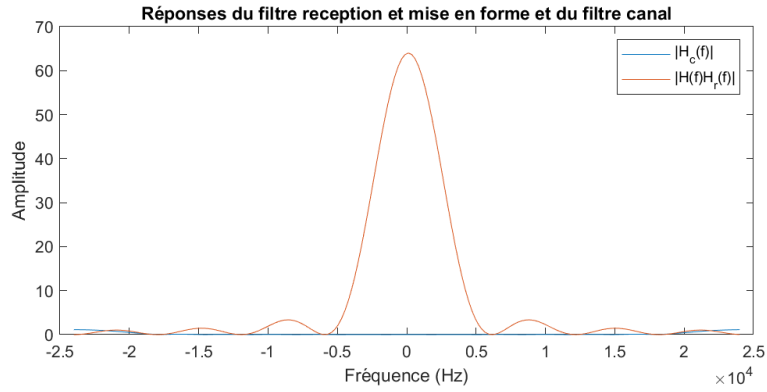


FIGURE 22 – Filtre pour l'étude avec canal et BW=1000

### 3.3.2 BW = 8000

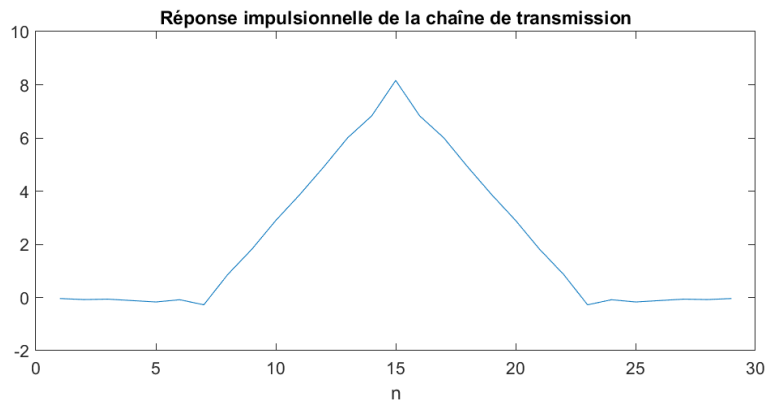


FIGURE 23 – Réponse impulsionnelle pour l'étude avec canal et BW=8000

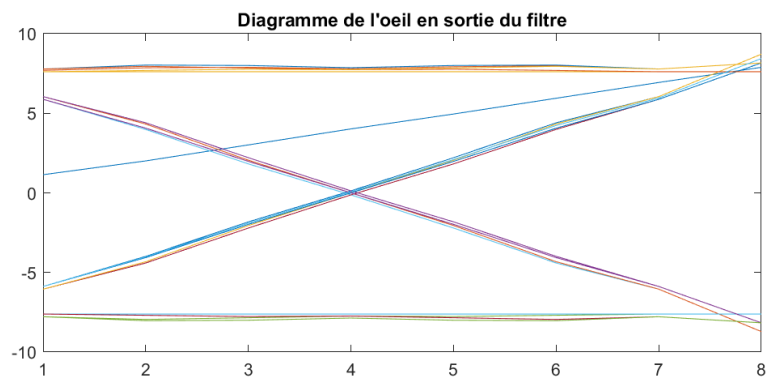


FIGURE 24 – Diagramme de l'oeil pour l'étude avec canal et BW=8000

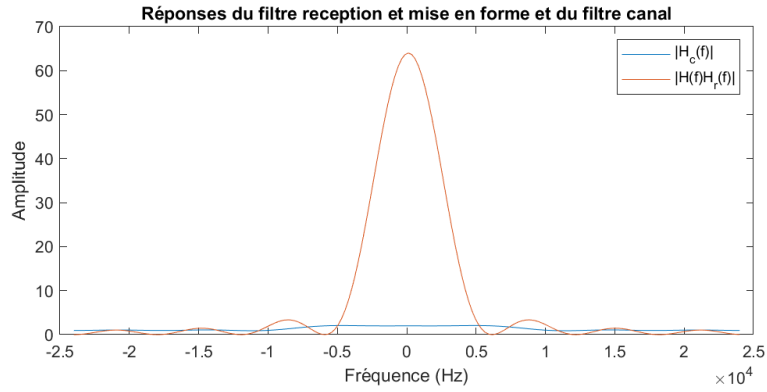


FIGURE 25 – Filtre pour l'étude avec canal et  $BW=8000$

Avec  $BW = 1000$ , le taux d'erreur est de 0.433 et avec  $BW = 8000$ , il est nul. Plus  $BW$  est grand, plus la bande passante est étendue. Par conséquent, la chaîne a moins de perte et le taux d'erreur est meilleur.

## 4 Étude de l'impact du bruit et du filtrage adapté, notion d'efficacité en puissance

### 4.1 Étude

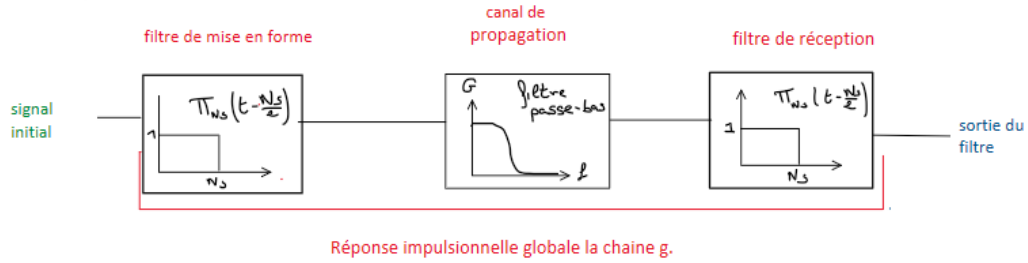


FIGURE 26 – Schéma de la chaîne avec bruit

Cette partie sera dédiée à l'étude du bruit dans la chaîne de transmission numérique. Nous étudierons trois chaînes différentes et étudierons l'impact du bruit introduit par le canal sur la transmission, l'influence du filtrage adapté et estimerons leur TEB pour les comparer en termes d'efficacité en puissance.

On utilisera un canal de propagation à bruit additif et gaussien. Le signal sera bruité en utilisant :

$$x_{\text{bruit}} = x + \text{bruit} = x + \sigma_n \times \text{random} \quad (7)$$

où  $x$  représente le signal à bruite et  $\sigma_n^2$  la puissance du bruit :

$$\sigma_n^2 = \frac{P_x N_s}{2 \log_2(M) \frac{E_b}{N_0}} \quad (8)$$

avec  $P_x = E(|x|^2)$  la puissance du signal à bruite.

### 4.2 Étude de chaque chaîne de transmission

#### 4.2.1 Chaîne 1

##### Caractéristiques

La première chaîne est constituée des éléments suivants :

- Mapping à symboles binaires à moyenne nulle
- Filtre de mise en forme rectangulaire de durée égale à la durée symbole et de hauteur 1
- Filtre de réception rectangulaire de durée égale à la durée symbole et de hauteur 1

Pour le mapping, on utilise la table suivante :

bits	$a_k$
1	+1
0	-1

##### Étude sans bruit

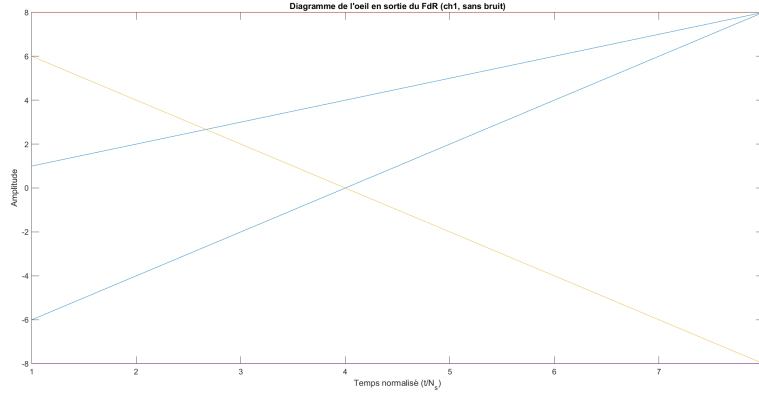


FIGURE 27 – Diagramme de l’oeil en sortie du filtre de mise en forme (chaîne 1 sans bruit)

D’après le diagramme de l’oeil,  $n_0$  doit valoir donc  $n_0 = N_s$  pour un échantillonnage optimal.

La taille de la matrice du signal de sortie est huit fois plus grand que les bits d’origine. Nous prenons une valeur tous les 8 donc  $m = 8$ .

On échantillonne donc le signal en sélectionnant les valeurs correspondant à des instants  $k \times m \times N_s + n_0$  avec  $k \in \mathbb{N}^*$ .

On ne reçoit que 2 valeurs différentes et opposées, et on choisit donc un détecteur à seuil à 0 pour effectuer le démapping. Une valeur positive correspondra ainsi à un bit 1 et une négative à un bit 0.

On obtient bien un TEB égal à 0, comme on pouvait s’y attendre étant donné que l’on n’introduit pas de bruit.

### Étude avec bruit

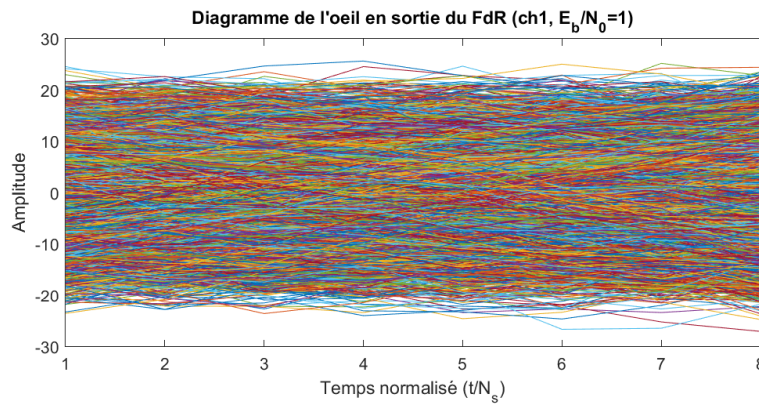


FIGURE 28 – Diagramme de l’oeil en sortie du filtre de mise en forme pour  $E_b/N_0=1$  (chaîne 1 avec bruit)

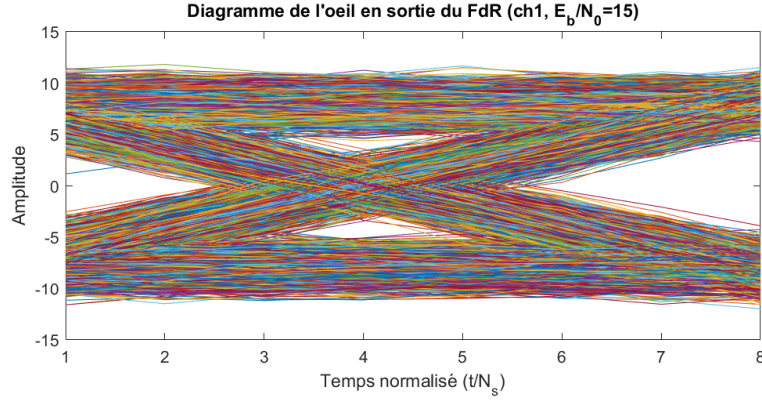


FIGURE 29 – Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de mise en forme pour  $E_b/N_0=15$  (chaîne 1 avec bruit)

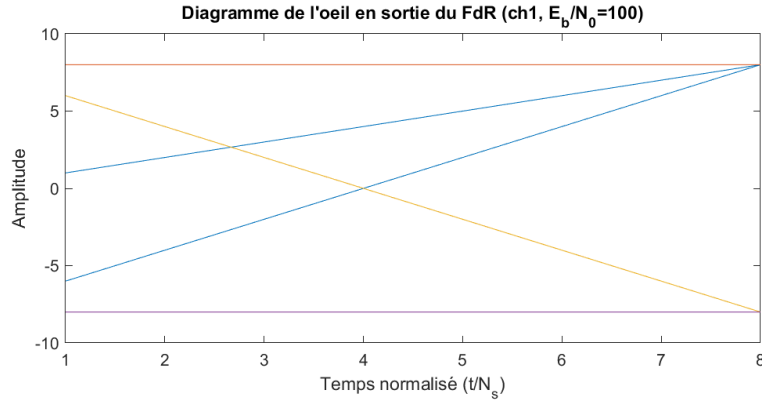


FIGURE 30 – Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de mise en forme pour  $E_b/N_0=100$  (chaîne 1 avec bruit)

Ces trois tracés montrent l'impact du bruit sur le diagramme de l'oeil, le rapport  $E_b/N_0$  étant inversement proportionnel au bruit.

Le signal ne prend plus exactement deux valeurs aux instants d'échantillonnage, comme lors de l'étude sans bruit. Plus il y a de bruit, plus les valeurs que le signal peut prendre sont rapprochées. Le seuil de décision sera donc moins efficace et le taux d'erreur binaire plus élevé.

On utilise toujours le même détecteur à seuil à 0.

On peut calculer le TEB théorique de la chaîne étudiée par la formule :

$$TEB = 2 \times \frac{M-1}{M \log_2(M)} \times Q \left( \sqrt{\frac{1}{M^2-1} \cdot 6 \log_2(M) \cdot 10^{\frac{E_b/N_0}{10}}} \right) \quad (9)$$

et le comparer au TEB estimé pour différentes valeurs du rapport  $E_b/N_0$  de 0 à 8 dB. Le TEB est estimé en comparant les bits en entrée de la chaîne aux bits en sortie.



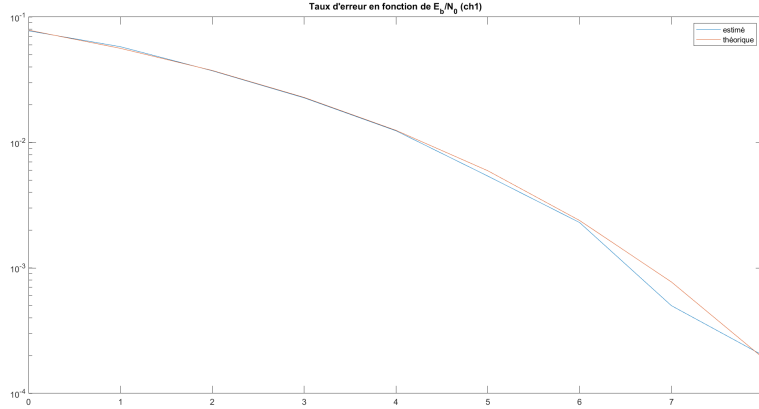


FIGURE 31 – TEB théorique et estimé en fonction de  $E_b/N_0$  (chaîne 1 avec bruit)

#### 4.2.2 Chaîne 2

##### Caractéristiques

La deuxième chaîne est constituée des éléments suivants :

- Mapping à symboles binaires à moyenne nulle
- Filtre de mise en forme rectangulaire de durée égale à la durée symbole et de hauteur 1
- Filtre de réception rectangulaire de durée égale à la moitié de la durée symbole et de hauteur 1

##### Étude sans bruit

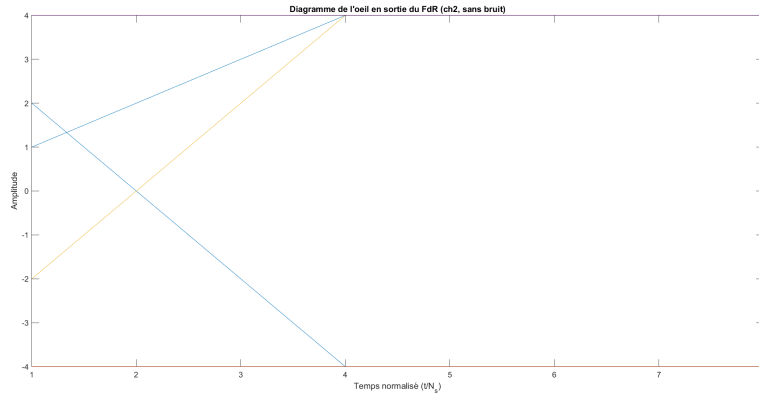


FIGURE 32 – Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de mise en forme (chaîne 2 sans bruit)

D'après le diagramme de l'oeil,  $n_0$  doit valoir 4 ce qui correspond à  $\frac{N_s}{2}$  pour un échantillonnage optimal.

La taille de la matrice du signal de sortie est huit fois plus grande que les bits d'origine. Nous prenons une valeur tous les 8 donc  $m = 8$ .

On échantillonne donc le signal en sélectionnant les valeurs correspondant à des instants  $k \times m \times N_s + n_0$  avec  $k \in \mathbb{N}^*$ .

De même que pour la chaîne précédente, on ne reçoit que 2 valeurs différentes et opposées, et on choisit donc un détecteur à seuil à 0 pour effectuer le démapping.

On obtient bien un TEB égal à 0.

### Étude avec bruit

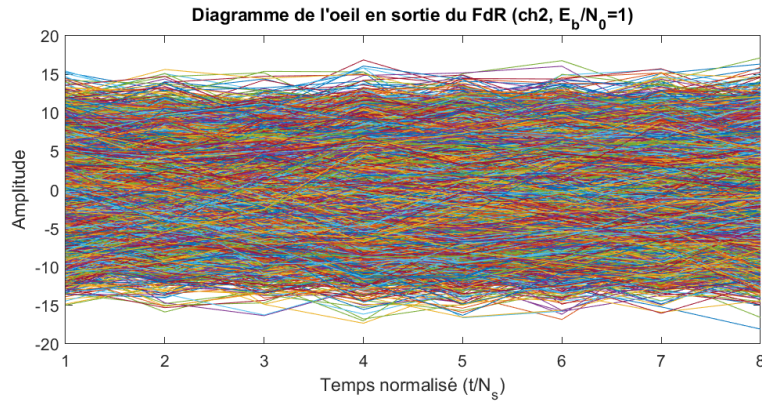


FIGURE 33 – Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de mise en forme pour  $E_b/N_0=1$  (chaîne 2 avec bruit)

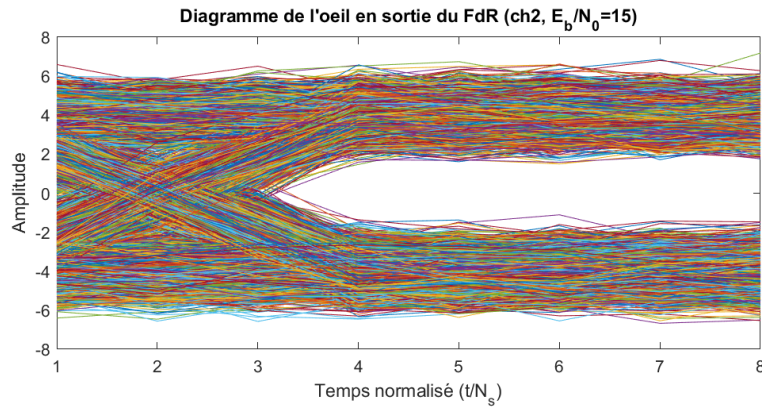


FIGURE 34 – Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de mise en forme pour  $E_b/N_0=15$  (chaîne 2 avec bruit)

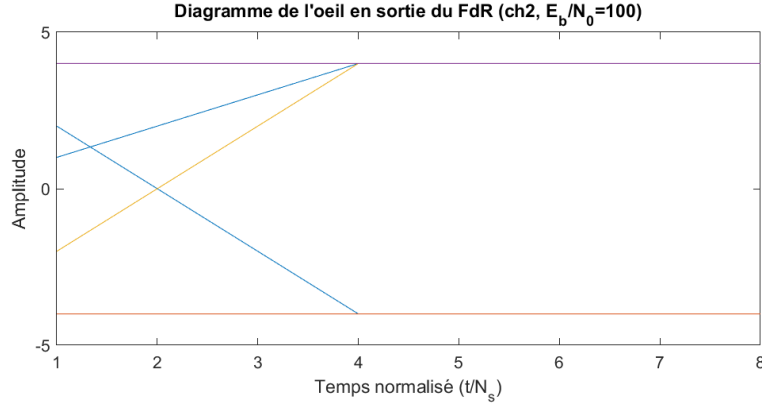


FIGURE 35 – Diagramme de l’oeil en sortie du filtre de mise en forme pour  $E_b/N_0=100$  (chaîne 2 avec bruit)

Ces trois tracés montrent l’impact du bruit sur le diagramme de l’oeil, le rapport  $E_b/N_0$  étant inversement proportionnel au bruit.

On utilise toujours le même détecteur à seuil à 0.

On peut calculer le TEB théorique de la chaîne étudiée par la formule :

$$TEB = Q \left( \sqrt{10 \frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (10)$$

et le comparer au TEB estimé pour différentes valeurs du rapport  $E_b/N_0$  de 0 à 8 dB.

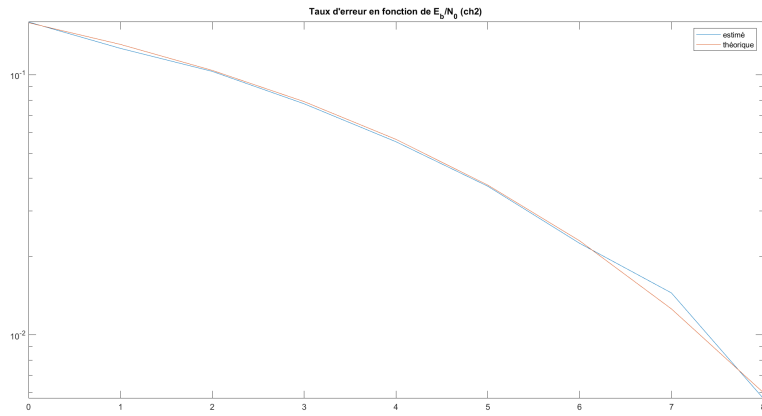


FIGURE 36 – TEB théorique et estimé en fonction de  $E_b/N_0$  (chaîne 2 avec bruit)

### 4.2.3 Chaîne 3

#### Caractéristiques

La troisième chaîne est constituée des éléments suivants :

- Mapping à symboles 4-aires à moyenne nulle
- Filtre de mise en forme rectangulaire de durée égale à la durée symbole et de hauteur 1
- Filtre de réception rectangulaire de durée égale à la durée symbole et de hauteur 1

Pour le mapping, on utilise la table suivante :

bits	$a_k$
10	+3
00	+1
01	-1
11	-3

On utilise un mapping de Gray afin de réduire le TEB. Étant donné qu'on code 2 bits par symbole, on arrange le mapping afin qu'une erreur de décision du symbole n'entraîne au pire qu'une seule erreur binaire.

#### Étude sans bruit

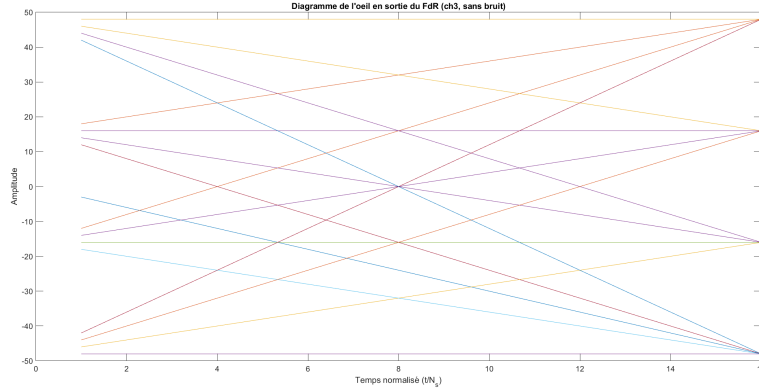


FIGURE 37 – Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de mise en forme (chaîne 3 sans bruit)

D'après le diagramme de l'oeil,  $n_0$  doit valoir 16 ce qui correspond à  $N_s$  pour un échantillonnage optimal.

La taille de la matrice du signal de sortie est huit fois plus grande que les bits d'origine. Nous prenons une valeur tous les 8 donc  $m = 8$ .

On échantillonne donc le signal en sélectionnant les valeurs correspondant à des instants  $k \times m \times N_s + n_0$  avec  $k \in \mathbb{N}^*$ .

Pour cette chaîne, on reçoit 4 valeurs différentes ( $\pm 16$  et  $\pm 48$ ). et on choisit pour le démapping un détecteur à seuil tel que :

$$bit_1 = \begin{cases} 1 & \text{si } symbole > 32 \text{ ou } symbole < -32 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad bit_2 = \begin{cases} 1 & \text{si } symbole < 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (11)$$

On obtient bien un TEB égal à 0.

### Étude avec bruit

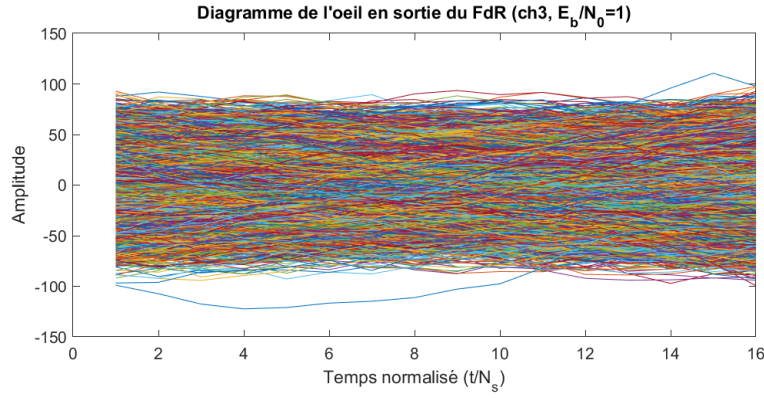


FIGURE 38 – Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de mise en forme pour  $E_b/N_0=1$  (chaîne 3 avec bruit)

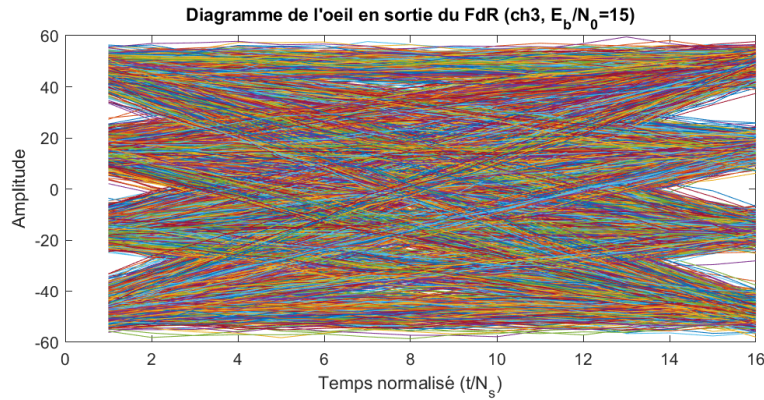


FIGURE 39 – Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de mise en forme pour  $E_b/N_0=15$  (chaîne 3 avec bruit)

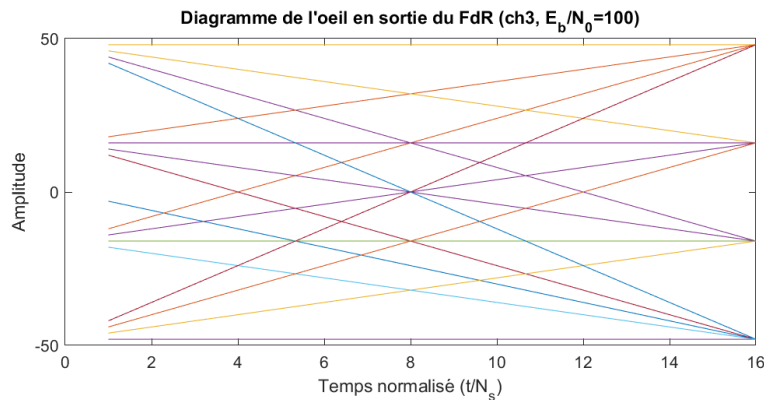


FIGURE 40 – Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de mise en forme pour  $E_b/N_0=100$  (chaîne 3 avec bruit)

Ces trois tracés montrent l'impact du bruit sur le diagramme de l'oeil, le rapport  $E_b/N_0$  étant inversement proportionnel au bruit.

On utilise toujours le même détecteur à seuil à 0.

On peut calculer le TEB théorique de la chaîne étudiée par la formule (9) utilisée pour la première chaîne et le comparer au TEB estimé pour différentes valeurs du rapport  $E_b/N_0$  de 0 à 8 dB.

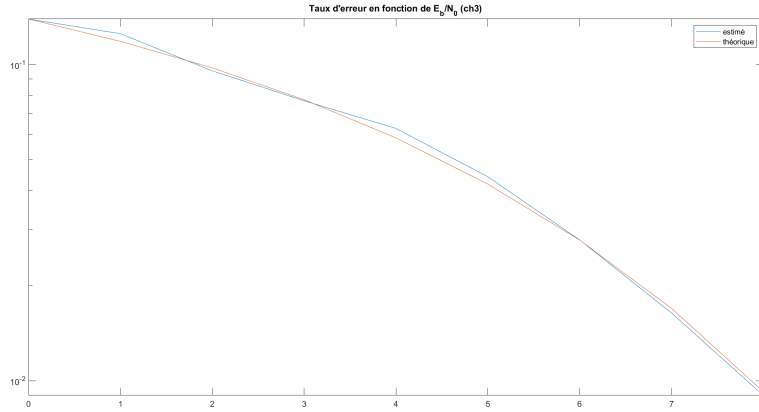


FIGURE 41 – TEB théorique et estimé en fonction de  $E_b/N_0$  (chaîne 3 avec bruit)

### 4.3 Comparaison des chaînes de transmission implantées

#### 4.3.1 Comparaison entre les chaînes 1 et 2

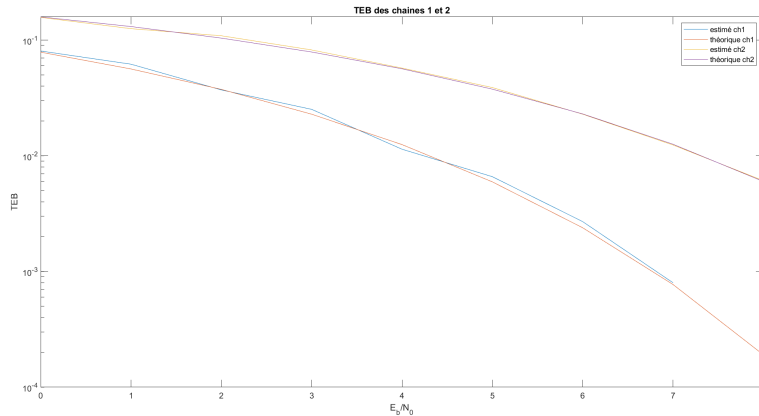


FIGURE 42 – TEB estimés des chaînes 1 et 2

En comparant les TEB des chaînes 1 et 2 en fonction du rapport  $E_b/N_0$ , on remarque que la chaîne 2 présente un taux d'erreur supérieur à celui de la chaîne 1 peu importe la puissance du bruit. La chaîne 2 a donc une meilleur efficacité en puissance.

La seule différence entre les deux chaînes est le filtre de réception. Celui de la chaîne 1 est identique à son filtre de mise en forme et donc adapté, contrairement à celui de la chaîne 2. Un filtrage adapté augmente donc l'efficacité en puissance.

### 4.3.2 Comparaison entre les chaines 1 et 3

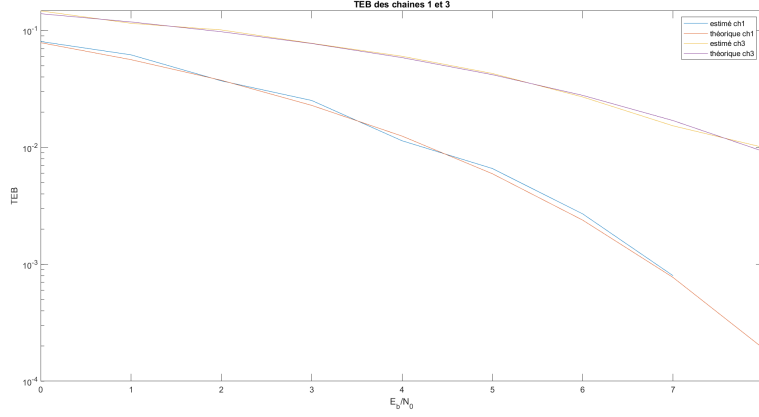


FIGURE 43 – TEB estimés des chaines 1 et 3

De la même façon que lors de la comparaison précédente, on remarque que la chaîne 1 est plus efficace en puissance que la chaîne 3.

La seule différence entre les deux chaînes est le mapping. Celui de la chaîne 1 est binaire et celui de la chaîne 3 4-aire. On peut en conclure que l'efficacité en puissance est inversement proportionnelle au nombre de symboles par bit utilisé.

Cependant, l'utilisation de deux fois moins de symboles par bit de la chaîne 3 permet un débit deux fois plus élevé que celui de la chaîne 1.

## 5 Conclusion

Ce projet nous a permis de comprendre et de mettre en oeuvre les critères d'efficacité spectrale et en puissance par la comparaison de plusieurs modulateurs bande de base. Il nous a également permis d'analyser et de comprendre les interférences entre symboles, l'influence du critère de Nyquist et l'impact du bruit et d'un filtrage adapté sur des chaînes de transmissions.