



Rapport TPs

Etude de transmissions en bande de base

Nihal BELMAKHFI et Héroïse LAFARGUE

Département Sciences du Numérique - Première année
Télécommunications
2021-2022

Table des matières

1	Introduction	4
2	Étude de modulateurs bande de base	4
2.1	Introduction	4
2.2	Modulateurs à étudier et comparer	4
2.3	Étude réalisée	4
2.3.1	Modulateur 1	5
2.3.2	Modulateur 2	6
2.3.3	Modulateur 3	7
2.3.4	Comparaison des modulateurs implantés en termes d'efficacité spectrale . .	8
3	Étude des interférences entre symbole et du critère de Nyquist	9
3.1	Introduction	9
3.2	Étude sans canal de propagation	9
3.3	Étude avec canal de propagation sans bruit	12
4	Étude de l'impact du bruit, filtrage adapté, taux d'erreur binaire, efficacité en puissance	14
4.1	Introduction	14
4.2	Chaîne de référence	14
4.3	Première chaîne à étudier, implanter et comparer à la chaîne de référence	15
4.3.1	Implantation de la chaîne sans bruit	16
4.3.2	Implantation de la chaîne avec bruit	16
4.4	Deuxième chaîne à étudier, implanter et comparer à la chaîne de référence	18
4.5	Implantation de la chaîne sans bruit	18
4.6	Implantation de la chaîne avec bruit	18
5	Conclusion	20

Table des figures

1	Figure du modulateur 1	5
2	Figure du modulateur 2	6
3	Figure du modulateur 3	7
4	Comparaison des modulateurs	8
5	Modulation et démodulation sans canal de propagation	9
6	Modulation et démodulation sans canal de propagation	10
7	Réponse impulsionnelle théorique	10
8	Réponse impulsionnelle sans canal de propagation	10
9	Diagramme de l'oeil sans canal de propagation	11
10	TEB sans canal de propagation	11
11	Cas BW - 8000Hz	12
12	Cas BW - 1000Hz	13
13	Diagramme de l'oeil pour la chaîne bruitée	14
14	Comparaison des TEB	15
15	Réponses impulsionnelles des filtres d'émission et de réception.	15
16	Produit de convolution entre $h(t)$ et $h_r(t)$	15
17	Diagramme de l'oeil de la première chaîne sans bruit	16
18	Diagramme de l'oeil de la première chaîne avec bruit	16
19	Comparaison des TEB simulé et théorique	17
20	Comparaison TEB de la chaîne de transmission étudiée et TEB de la chaîne de référence	17

21	Diagramme de l'oeil de la deuxième chaîne sans bruit	18
22	Diagramme de l'oeil de la deuxième chaîne sans bruit	19
23	Diagramme de l'oeil de la deuxième chaîne sans bruit	19
24	Diagramme de l'oeil de la deuxième chaîne sans bruit	20

1 Introduction

L'objectif du travail présenté dans ce rapport est d'étudier une chaîne de transmission en bande de base. Nous nous intéressons à l'efficacité spectrale et en puissance et leurs facteurs d'optimisation, et à la comparaison des chaînes de transmission en termes d'efficacité spectrale et d'efficacité en puissance.

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

Pour le modulateur 1, nous obtenons sur la figure 1 le tracé du signal transmis, le tracé de la DSP du signal transmis et la comparaison du tracé obtenu pour la DSP simulée avec celui de la DSP théorique du signal généré.

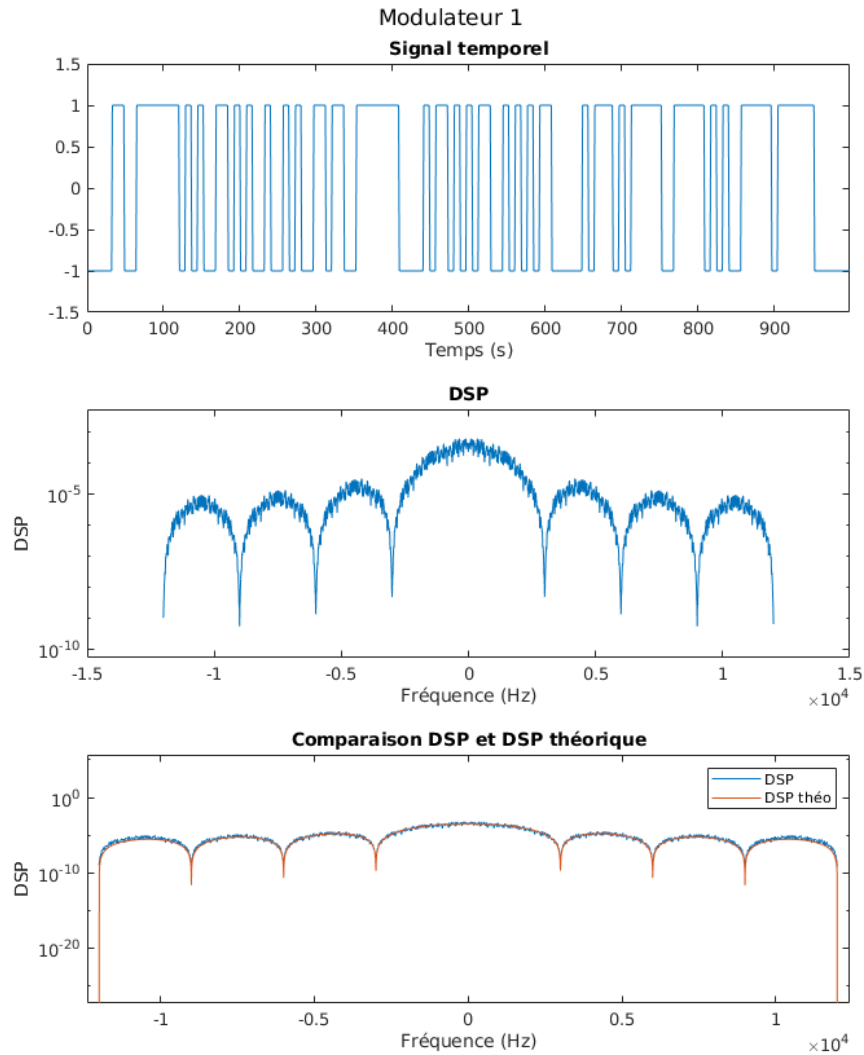


FIGURE 1 – Figure du modulateur 1

2.3.2 Modulateur 2

Pour le modulateur 2, nous obtenons sur la figure 2 le tracé du signal transmis, le tracé de la DSP du signal transmis et la comparaison du tracé obtenu pour la DSP simulée avec celui de la DSP théorique du signal généré.

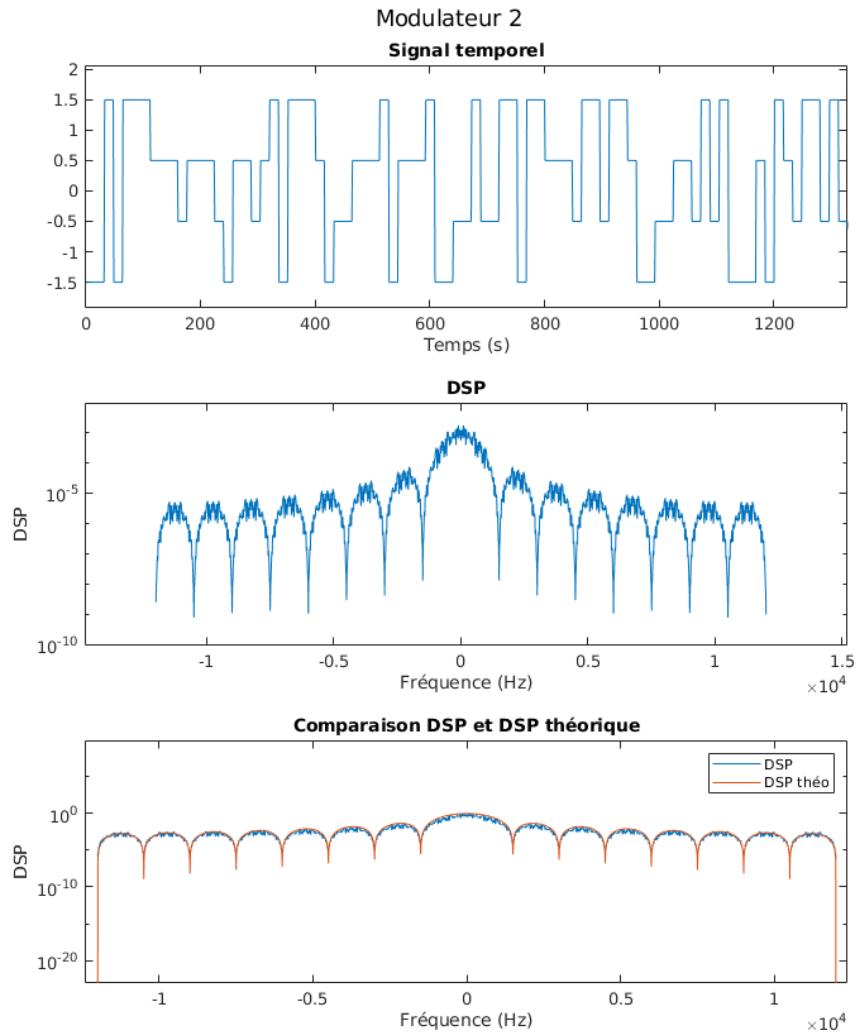


FIGURE 2 – Figure du modulateur 2

2.3.3 Modulateur 3

Pour le modulateur 1, nous obtenons sur la figure 3 le tracé du signal transmis, le tracé de la DSP du signal transmis et la comparaison du tracé obtenu pour la DSP simulée avec celui de la DSP théorique du signal généré.

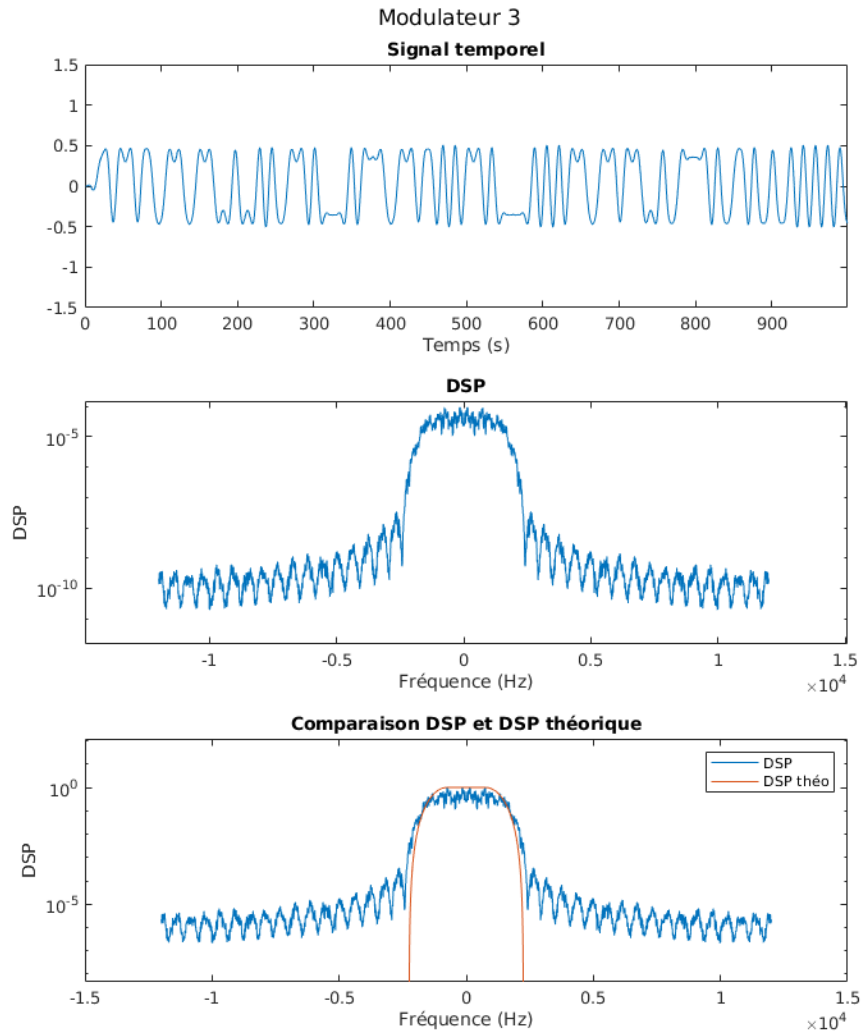


FIGURE 3 – Figure du modulateur 3

2.3.4 Comparaison des modulateurs implantés en termes d'efficacité spectrale

Nous obtenons sur la figure 4, les DSP des signaux générés par les différents modulateurs étudiés.

Pour un débit binaire à transmettre fixé, une transmission est d'autant plus efficace spectralement que la bande occupée par le signal est faible.

Nous obtenons par ordre d'efficacité spectrale croissante : le modulateur 1, puis le modulateur 3 et le modulateur 2 qui est le plus efficace car la bande occupée est la plus courte.

Pour augmenter l'efficacité spectrale, on peut jouer sur deux paramètres :

- choisir un filtre de mise en forme bien localisé en fréquence
- augmenter M l'ordre de la modulation

En effet, $\eta = \frac{R_b}{B} = \frac{\log_2(M)}{k}$.

Cela confirme nos observations :

- Ici pour un mapping avec des symboles binaires, un filtre en racine de cosinus surélevé (modulateur 3) est plus efficace spectralement qu'un filtre rectangulaire (modulateur 1) car la bande passante est plus fine.
- Le modulateur ayant l'ordre de modulation M le plus élevé est plus efficace spectralement. Le modulateur 2 avec $M=4$ est plus efficace spectralement que les modulateur 1 et 3 où $M=2$.

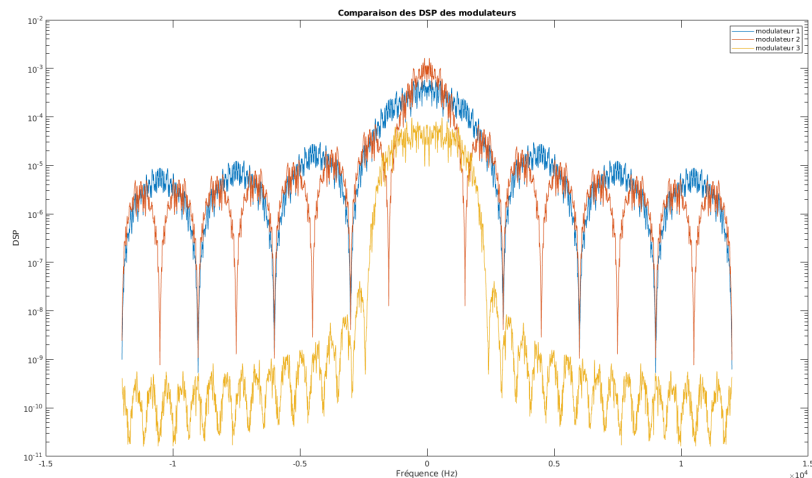


FIGURE 4 – Comparaison des modulateurs

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

— Nous traçons sur la figure 5 le signal en sortie du filtre de réception.

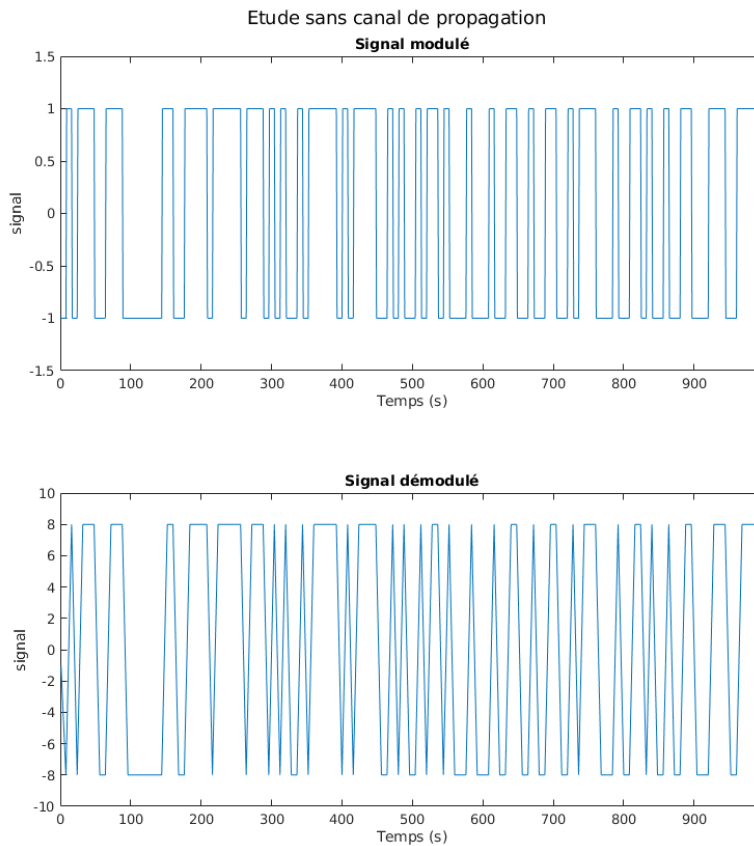


FIGURE 5 – Modulation et démodulation sans canal de propagation

Le signal démodulé est conforme à ce qui est attendu en théorie car avec des filtres de mise en forme et de réception de même réponse impulsionnelle rectangulaire, le signal en sortie du filtre est une superposition de "triangles" (comme on peut le voir avec le signal en orange sur la figure 6).

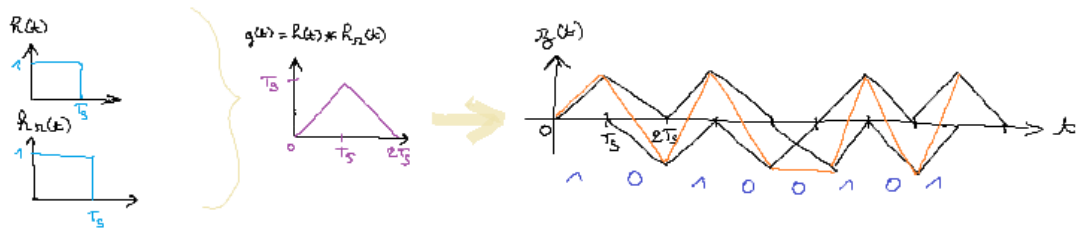


FIGURE 6 – Modulation et démodulation sans canal de propagation

— Nous traçons sur la figure 8 la réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission g .

Elle est conforme à ce qui est attendu en théorie car pour un filtre de mise en forme et un filtre de réception de même réponse impulsionnelle rectangulaire de durée T_s , la réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission est triangulaire, comme représentée sur la figure 7

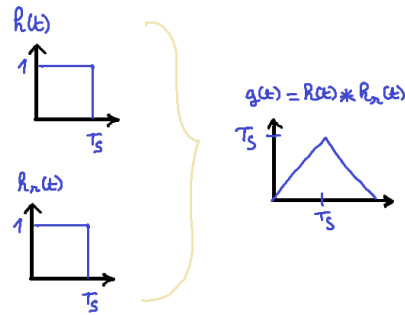


FIGURE 7 – Réponse impulsionnelle théorique

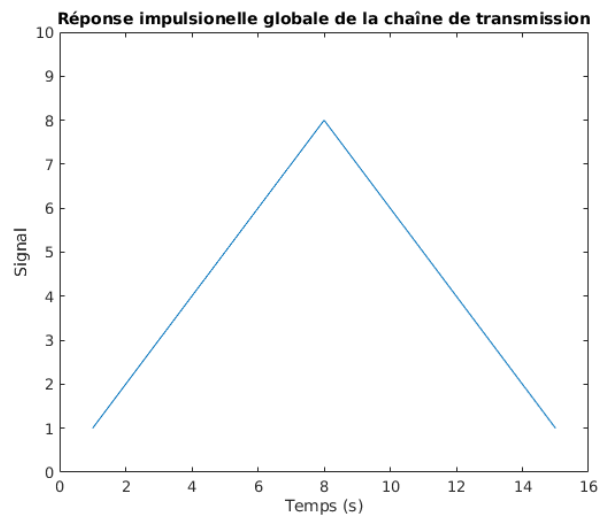


FIGURE 8 – Réponse impulsionnelle sans canal de propagation

— Nous déterminons, en utilisant g , l'instant n_0 optimal permettant d'échantillonner aux ins-

tants sans interférences entre symboles $n_0 + mN_s$.

Grâce à la figure 8, nous déduisons que le critère de Nyquist est respecté pour $n_0 = 8s$.

En effet, nous avons $g(n_0) \neq 0$ et $g(n_0 + pT_s) = 0$, $p \in \mathbb{Z}$.

En effet, le critère de Nyquist nous assure d'avoir un terme d'interférence nul.

- Nous traçons le diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception sur la figure 9.
Il est conforme à ce qui est attendu en théorie car on retrouve tout ce qui se produit pendant T_s sur le signal en sortie du filtre de réception.
Pour ne pas avoir d'interférences, on se place aux instants optimaux, c'est-à-dire là où il n'y que 2 deux valeurs possible (car on travaille avec des symboles binaires) sur le diagramme de l'oeil : à $n_0 = 8s$. On retrouve la même valeur qu'avec la réponse impulsionnelle.

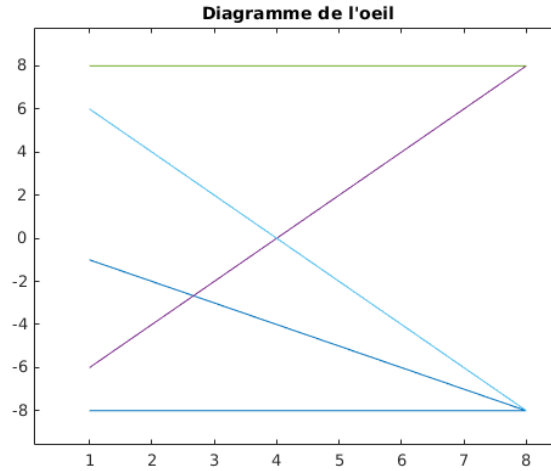


FIGURE 9 – Diagramme de l'oeil sans canal de propagation

- Voici les résultats obtenus en figure 10 pour les TEBs mesurés quand nous échantillonnons avec le n_0 optimal et avec $n_0 = 3$.

Pour $n_0 = 8$ (optimal), le TEB obtenu est 0.000000
 Pour $n_0 = 3$, le TEB obtenu est 0.500000

FIGURE 10 – TEB sans canal de propagation

Pour $n_0 = 8$, il s'agit du cas optimal où il n'y a pas d'interférences. Tout est parfaitement transmis (100%).

Pour $n_0 = 3$, il y a des interférences car le critère de Nyquist n'est pas respecté, l'échantillonnage n'a pas lieu aux instants optimaux. On trouve une transmission d'environ 50%.

3.3 Étude avec canal de propagation sans bruit

On ajoute à la chaine 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 :

Nous traçons sur la figure 11 la réponse impulsionnelle globale de la chaine de transmission et le tracé du diagramme de l'oeil à la sortie du filtre de réception.

Nous traçons aussi sur la même figure $|H(f)H_r(f)|$ et $|H_c(f)|$, où $H(f)$ est la réponse en fréquence du filtre de mise en forme, $H_r(f)$ la réponse en fréquence du filtre de réception et $H_c(f)$ la réponse en fréquence du filtre canal.

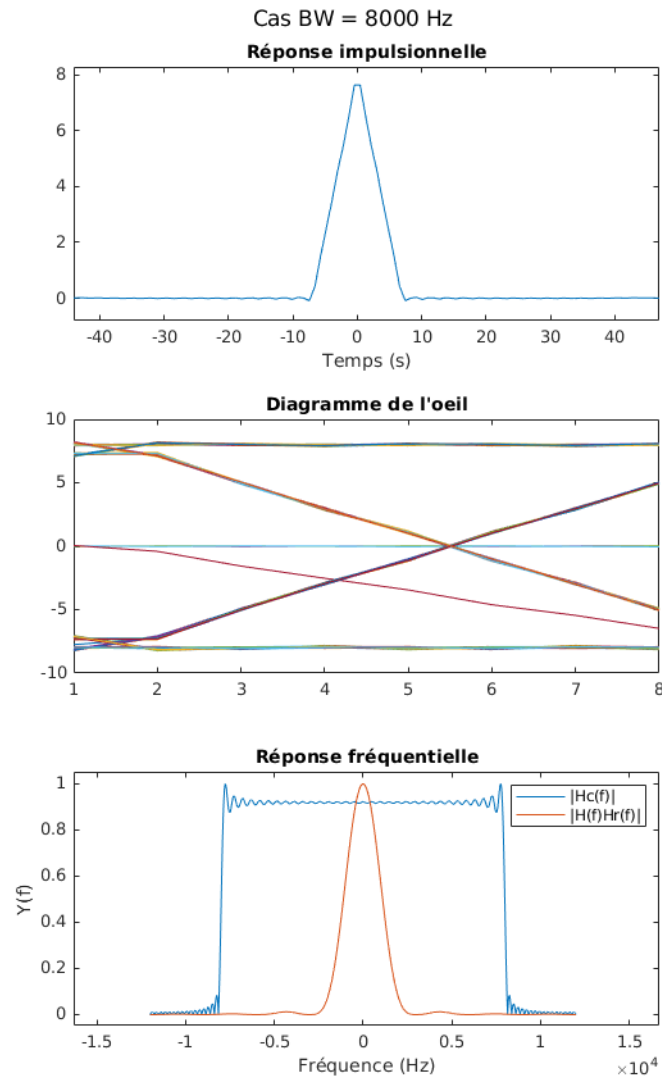


FIGURE 11 – Cas BW - 8000Hz

Le TEB pour $n_0 = 8$ (cas optimal) est égal à 0,0. La réponse impulsionnelle tracée en figure 11 nous montre qu'il existe des instants optimaux pour lesquels le critère de Nyquist peut

être respecté. Et la transmission par le canal est totale car l'intervalle de fréquences du filtre canal contient l'intervalle de fréquences du signal étudié (figure 11, réponse fréquentielle) donc le critère de Nyquist est bien respecté.

2. Pour $BW = 1000$ Hz :

Nous traçons sur la figure 12 la réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission et le tracé du diagramme de l'oeil à la sortie du filtre de réception. Nous traçons aussi sur la même figure $|H(f)H_r(f)|$ et $|H_c(f)|$, où $H(f)$ est la réponse en fréquence du filtre de mise en forme, $H_r(f)$ la réponse en fréquence du filtre de réception et $H_c(f)$ la réponse en fréquence du filtre canal.

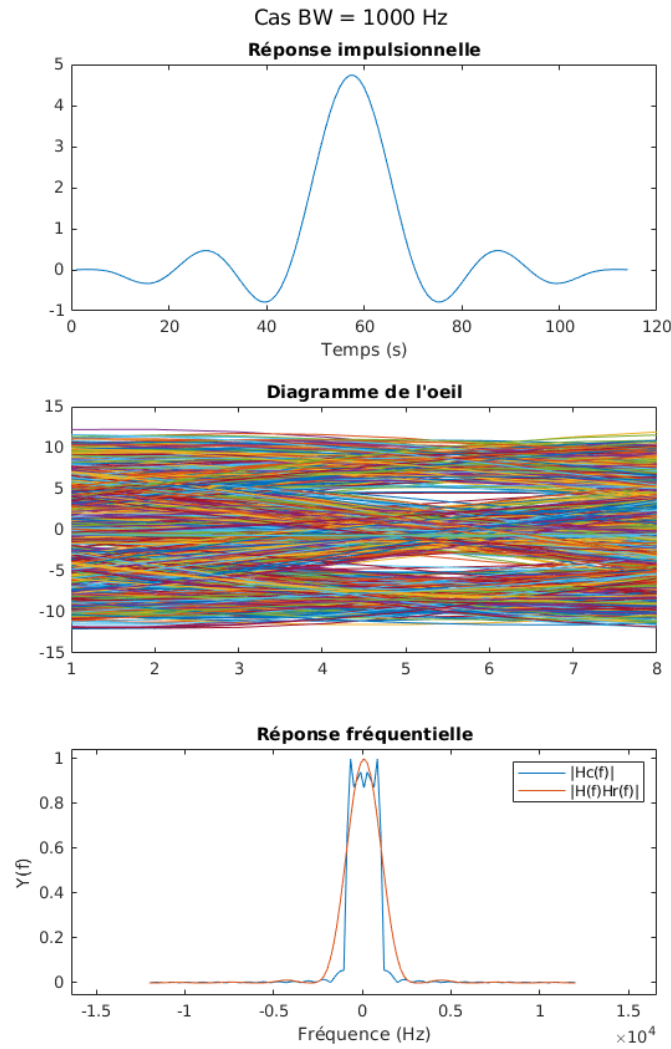


FIGURE 12 – Cas BW - 1000Hz

Le TEB est environ égal à 0,5. Il n'est pas nul car il y a des interférences comme on le voit sur le diagramme de l'oeil sur la figure 12. Le critère de Nyquist n'est pas respecté : le canal de propagation ne permet pas une transmission totale car l'intervalle de fréquences du filtre canal est plus petit que l'intervalle de fréquences du signal étudié (figure 12, réponse fréquentielle).

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.

1. Nous avons tracé le diagramme de l'oeil pour différentes valeurs de E_b/N_0 sur la figure 13. Le bruit rend le diagramme de l'oeil illisible. Le rapport signal-à-bruit est trop faible, l'oeil est fermé et on ne peut plus distinguer les niveaux représentant les symboles. Le bruit rend impossible l'identification des instants optimaux d'échantillonnage sur le diagramme de l'oeil.

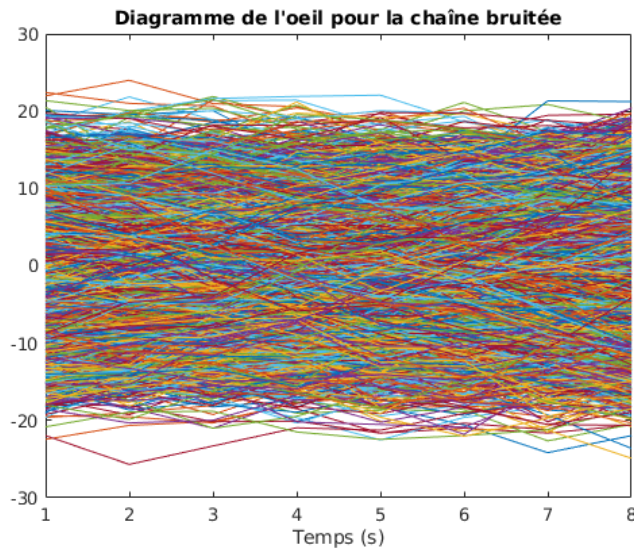


FIGURE 13 – Diagramme de l'oeil pour la chaîne bruitée

2. Sur la figure 14, nous avons tracé le TEB simulé et du TEB théorique de la chaîne étudiée 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.

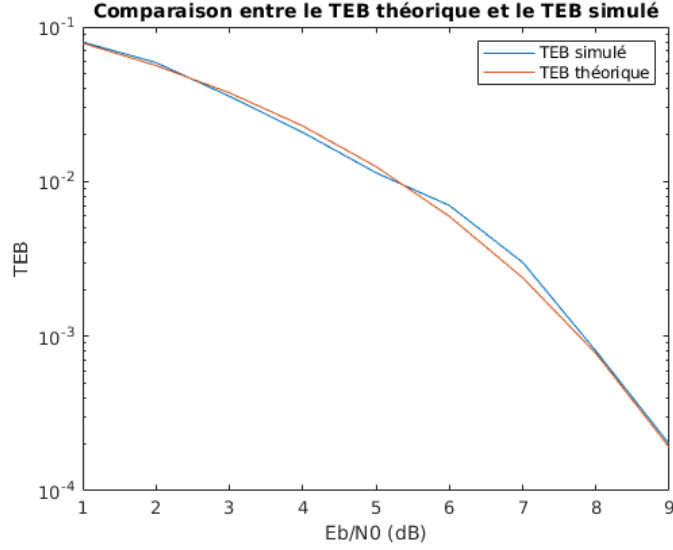


FIGURE 14 – Comparaison des TEB

La figure 14 nous permet de valider le bon fonctionnement de notre chaîne de transmission. En effet, la courbe simulée suit la courbe théorique.

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 15.

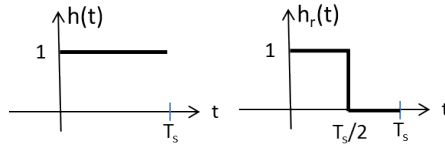


FIGURE 15 – Réponses impulsionnelles des filtres d'émission et de réception.

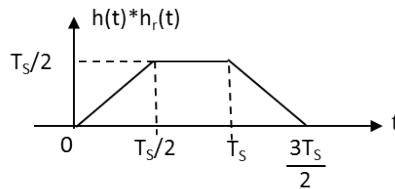


FIGURE 16 – Produit de convolution entre $h(t)$ et $h_r(t)$.

4.3.1 Implantation de la chaîne sans bruit

Nous avons tracé le diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception sur la durée T_s . Les instants optimaux sont tels qu'il n'y que deux valeurs possibles sur le diagramme de l'oeil (mapping binaire). Donc ici $n_0 = 4$ convient (8 aussi). De plus, le diagramme de l'oeil est conforme à ce qui est attendu en théorie car on retrouve tout ce qui se produit pendant T_s sur le signal en sortie du filtre de réception qui est formé avec le produit de convolution de la figure 16.

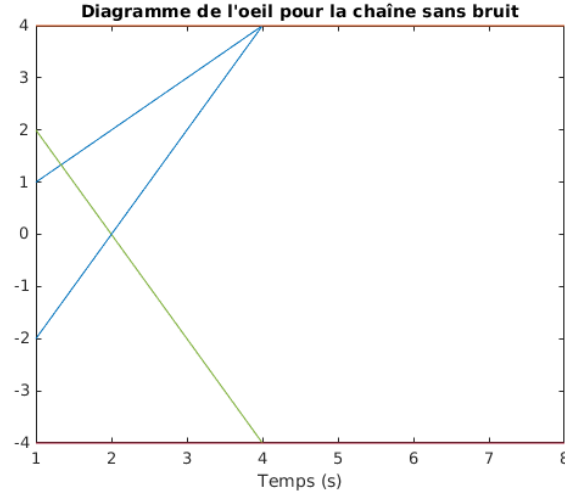


FIGURE 17 – Diagramme de l'oeil de la première chaîne sans bruit

4.3.2 Implantation de la chaîne avec bruit

1. Nous avons tracé le diagramme de l'oeil pour différentes valeurs de E_b/N_0 sur la figure 18. Le bruit rend illisible le diagramme de l'oeil. Le rapport signal-à-bruit est trop faible, l'oeil est fermé et on ne peut plus distinguer les niveaux représentant les symboles.

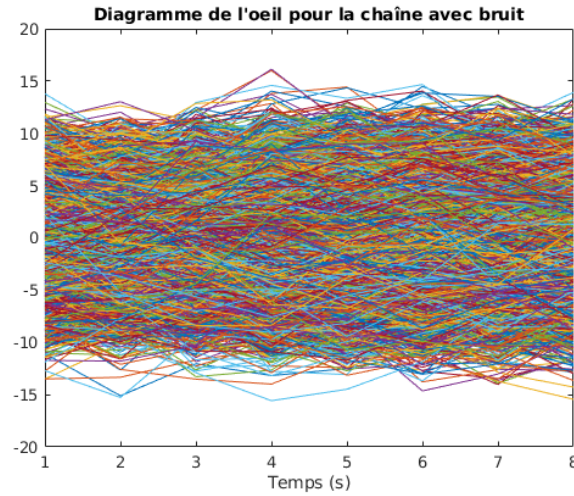


FIGURE 18 – Diagramme de l'oeil de la première chaîne avec bruit

2. Sur la figure 19, nous avons tracé le tracé du TEB simulé et du TEB théorique de la chaîne étudiée en fonction du rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur (E_b/N_0) pour des valeurs allant de 0 à 8 dB.

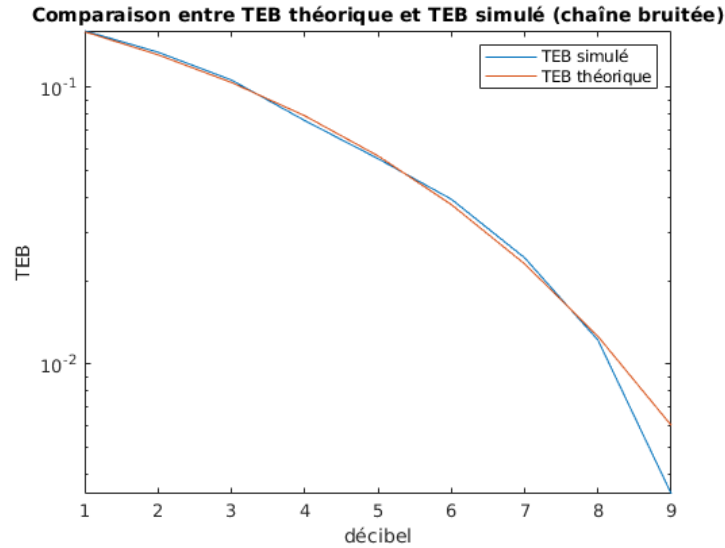


FIGURE 19 – Comparaison des TEB simulé et théorique

La figure 19 nous permet de valider le bon fonctionnement de notre chaîne de transmission. En effet, la courbe simulée suit la courbe théorique.

3. Sur la figure 20, nous avons tracé le TEB obtenu par simulation pour la chaîne de transmission étudiée et le TEB de la chaîne de référence.

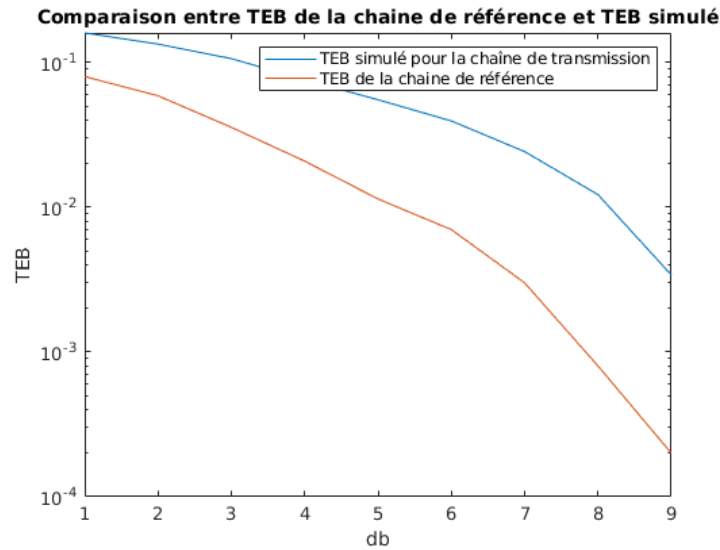


FIGURE 20 – Comparaison TEB de la chaîne de transmission étudiée et TEB de la chaîne de référence

Les courbes des TEB sont différentes (espacement entre les deux) car on n'utilise pas les mêmes filtre de mise en forme et de réception.

La chaîne de référence est plus efficace en puissance car pour une valeur de TEB fixée, la transmission est meilleure car le rapport E_b/N_0 est plus petit.

Par exemple le $TEB = 10^{-2}$ est atteint à $E_b/N_0 = 6$ pour la chaîne de référence et à $E_b/N_0 = 8,3$ pour le chaîne de transmission étudiée.

4. Les deux chaînes ont la même efficacité spectrale car elles ont le même filtre de mise en forme et le même ordre de modulation. Et le filtre de réception n'a pas d'influence sur l'efficacité spectrale.

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

Sur la figure 21, nous avons tracé le diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception sur la durée T_s .

Les instants optimaux sont tels qu'il n'y que 4 valeurs possibles sur le diagramme de l'oeil (mapping 4-aire). Donc $n_0 = 19$.

De plus, le diagramme de l'oeil est conforme à ce qui est attendu en théorie car on retrouve tout ce qui se produit pendant T_s sur le signal en sortie du filtre de réception. (Le mapping 4-aire explique que l'on ait autant de droites).

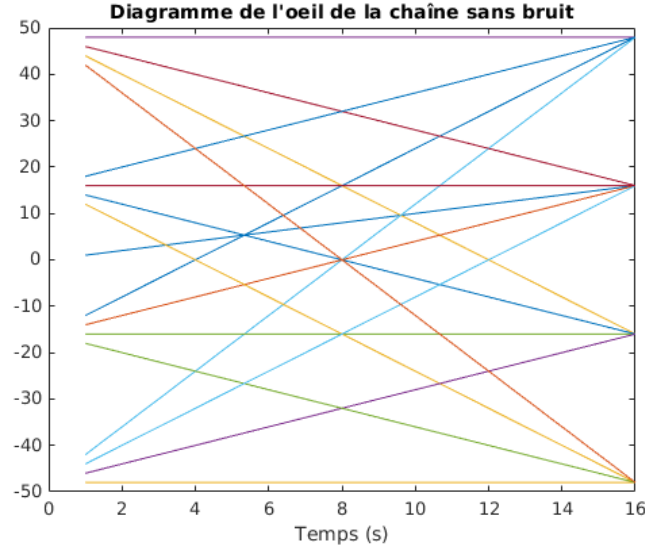


FIGURE 21 – Diagramme de l'oeil de la deuxième chaîne sans bruit

4.6 Implantation de la chaîne avec bruit

1. Sur la figure 22, nous avons tracé le TES simulé et du TES théorique de la chaîne étudiée 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 10 à 9 dB. Avec pour le TES théorique : $TES = \frac{3}{2}Q\left(\sqrt{\frac{4}{5}\frac{E_b}{N_0}}\right)$.

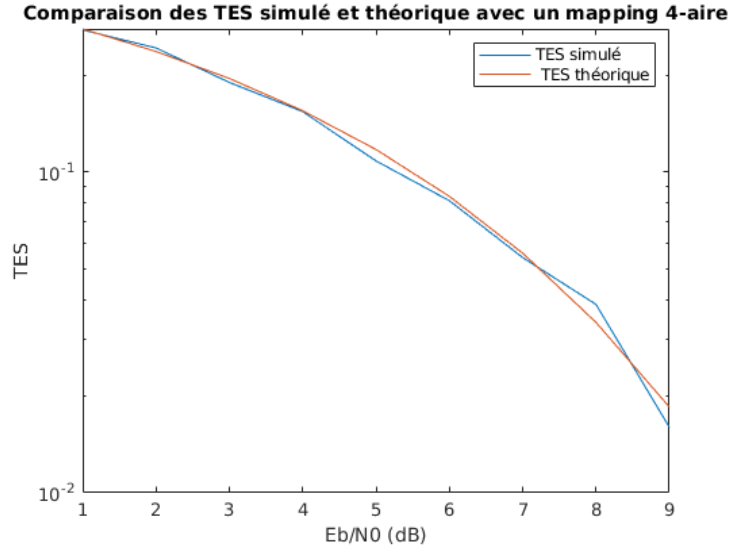


FIGURE 22 – Diagramme de l'oeil de la deuxième chaîne sans bruit

Ce tracé permet de valider le bon fonctionnement de notre chaîne de transmission. En effet, la courbe simulée suit la courbe théorique.

2. Sur la figure 23 nous avons tracé le TEB obtenu par simulation pour la chaîne de transmission étudiée et le TEB suivant : $TEB = \frac{3}{4}Q\left(\sqrt{\frac{4}{5}\frac{E_b}{N_0}}\right)$.

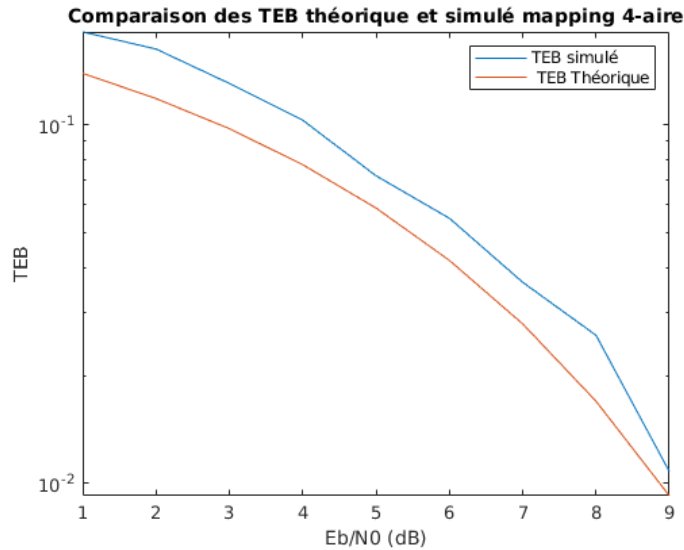


FIGURE 23 – Diagramme de l'oeil de la deuxième chaîne sans bruit

La chaîne associée au TEB donné précédemment est plus efficace en puissance que la chaîne étudiée. En effet, pour une valeur de TEB fixée, la transmission est meilleure car le rapport E_b/N_0 est plus petit.

3. Sur la figure 24, nous avons tracé le TEB obtenu par simulation pour la chaîne de trans-

mission étudiée et du TEB de la chaîne de référence.

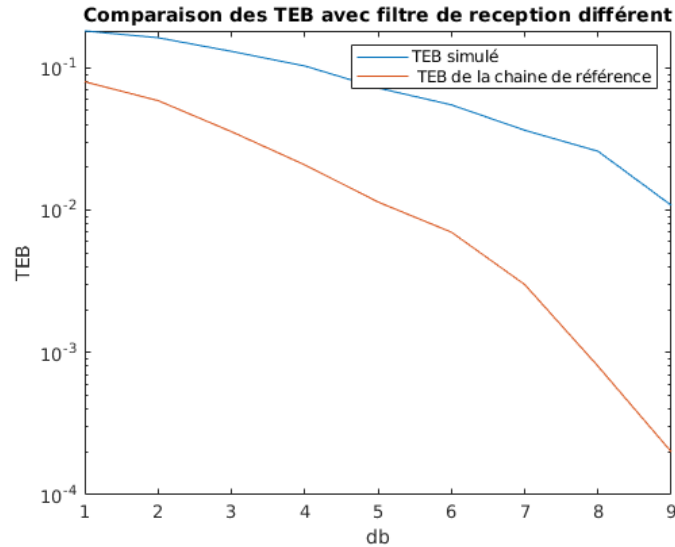


FIGURE 24 – Diagramme de l’oeil de la deuxième chaîne sans bruit

La chaîne de référence est plus efficace en puissance que la chaîne étudiée. En effet, pour une valeur de TEB fixée, la transmission est meilleure car le rapport E_b/N_0 est plus petit.

4. Les deux chaînes ont la même efficacité spectrale car elles ont le même filtre de mise en forme et le même ordre de modulation (4). Et le filtre de réception n’a pas d’influence sur l’efficacité spectrale.

5 Conclusion

Pour conclure, ces TP nous ont permis d’appliquer ce que nous avons vu en cours sur les transmissions en bande de base. Nous avons pu tester des méthodes plus ou moins efficaces et voir l’utilité de chaque outils.