



Télécommunications : Étude de transmission en bande de base

Léo Meissner, Justin Barbier

Département Sciences du Numérique - Première année
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	4
2.3.2	Modulateur 2	6
2.3.3	Modulateur 3	7
2.3.4	Comparaison des modulateurs implantés en termes d'efficacité spectrale . .	9
3	Étude des interférences entre symbole et du critère de Nyquist	10
3.1	Introduction	10
3.2	Étude sans canal de propagation	10
3.3	Étude avec canal de propagation sans bruit	11
4	Étude de l'impact du bruit, filtrage adapté, taux d'erreur binaire, efficacité en puissance	13
4.1	Introduction	13
4.2	Chaîne de référence	13
4.3	Première chaîne à étudier, implanter et comparer à la chaîne de référence	14
4.3.1	Implantation de la chaîne sans bruit	15
4.3.2	Implantation de la chaîne avec bruit	16
4.4	Deuxième chaîne à étudier, implanter et comparer à la chaîne de référence	17
4.5	Implantation de la chaîne sans bruit	17
4.6	Implantation de la chaîne avec bruit	18
5	Conclusion	20
6	Références	20

Table des figures

1	Signal transmis à partir du Modulateur 1	5
2	DSP du signal transmis à partir du Modulateur 1	5
3	Comparaison de la DSP réelle et théorique	5
4	Signal émis à partir du Modulateur 2	6
5	DSP du signal transmis à partir du Modulateur 2	7
6	Comparaison de la DSP réelle et théorique	7
7	Signal émis à partir du Modulateur 3	8
8	DSP du signal transmis à partir du Modulateur 3	8
9	Comparaison de la DSP réelle et théorique	9
10	Comparaison des 3 DSP	9
11	Signal en sortie du filtre de réception	10
12	Réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission	10
13	Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception	11
14	Réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission avec $BW = 8000$. . .	12
15	Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception avec $BW = 8000$	12
16	Réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission avec $BW = 1000$. . .	12
17	Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception avec $BW = 1000$	13
18	Diagramme de l'oeil avec du bruit	14
19	TEB de la chaîne de référence en fonction du rapport (E_b/N_0)	14

20	Comparaison du TEB simulé et théorique de la chaîne de référence en fonction du rapport (E_b/N_0)	15
21	Réponses impulsionnelles des filtres d'émission et de réception.	15
22	Produit de convolution entre $h(t)$ et $h_r(t)$	15
23	Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception sur la durée T_s	16
24	TEB de la chaîne 1 : Simulé en vert, théorique en rouge.	16
25	TEB de la chaîne 1 : Chaîne 1 en vert, Référence en rouge.	17
26	Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception sur la durée T_s	17
27	TES en fonction du rapport E_b/N_0 en dB.	18
28	TES en fonction du rapport E_b/N_0 en dB.	18
29	TES en fonction du rapport E_b/N_0 en dB.	19
30	TES en fonction du rapport E_b/N_0 en dB.	19

1 Introduction

L'objectif du travail présenté dans ce rapport était de s'initier à l'étude d'une chaîne de transmission en bande de base afin d'être capable :

- D'en évaluer l'efficacité spectrale et l'efficacité en puissance.
- D'identifier les solutions possibles pour l'optimiser en termes d'efficacité spectrales et d'efficacité en puissance.
- De comparer 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

Sur la figure 1, nous observons le tracé du signal transmis, avec une échelle en secondes. Le mapping est bien réalisé car les valeurs 1 et -1 sont représenté pendant une durée R_b pour chaque bit.

Ensuite sur la figure 2 nous observons le tracé de la densité spectrale de puissance (DSP) du signal transmis avec une échelle fréquentielle en Hz ce qui va nous permettre de mesurer son efficacité spectrale.

Enfin, sur la figure 3, nous pouvons comparer le tracé obtenu pour la DSP simulée avec celui de la DSP théorique du signal généré. Ces 2 signaux se superposent comme attendu.

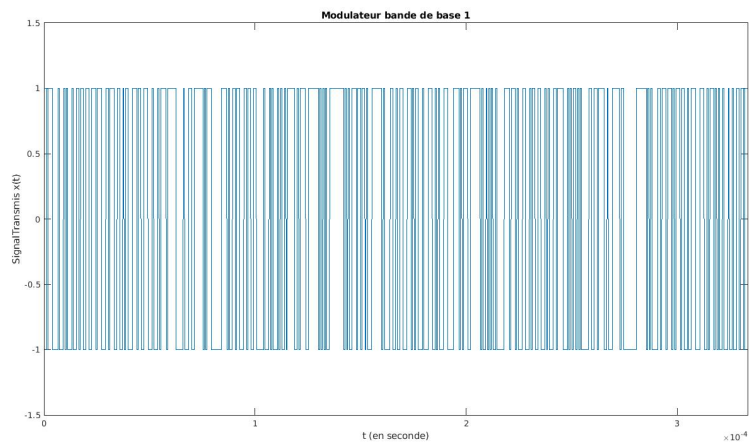


FIGURE 1 – Signal transmis à partir du Modulateur 1

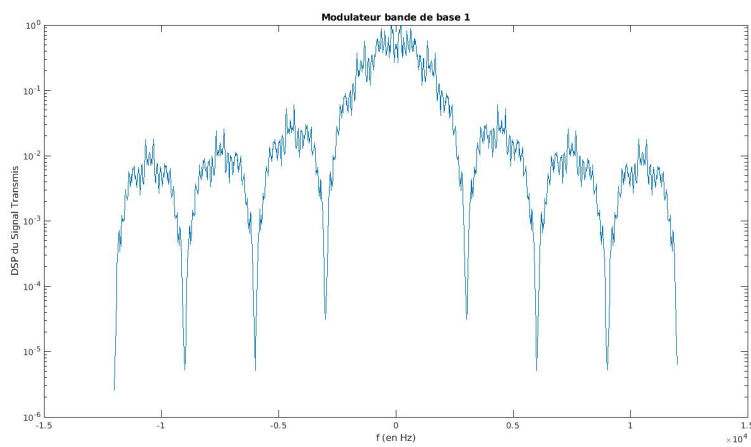


FIGURE 2 – DSP du signal transmis à partir du Modulateur 1

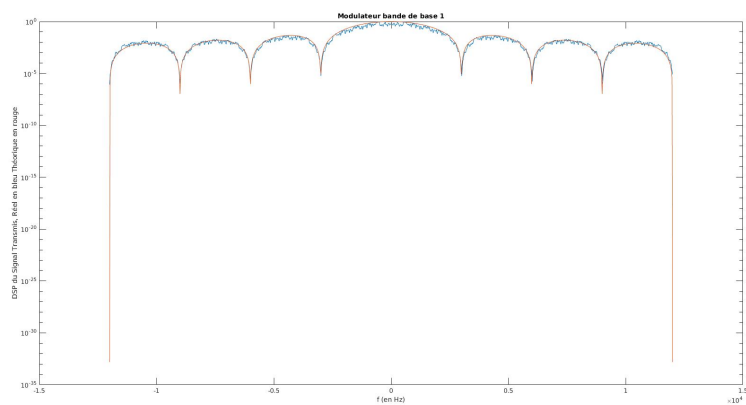


FIGURE 3 – Comparaison de la DSP réelle et théorique

2.3.2 Modulateur 2

Sur la figure 4, nous observons le tracé du signal transmis, avec une échelle en secondes. Le mapping a bien été réalisé, car les valeurs -3, -1, 1 et 3 sont bien représentées avec une durée R_b pour chaque symboles.

Ensuite sur la figure 5 nous observons le tracé de la densité spectrale de puissance (DSP) du signal transmis avec une échelle fréquentielle en Hz ce qui va nous permettre de mesurer son efficacité spectrale.

Enfin, sur la figure 6 nous pouvons comparer le tracé obtenu pour la DSP simulée avec celui de la DSP théorique du signal généré. Ces 2 signaux se superposent bien.

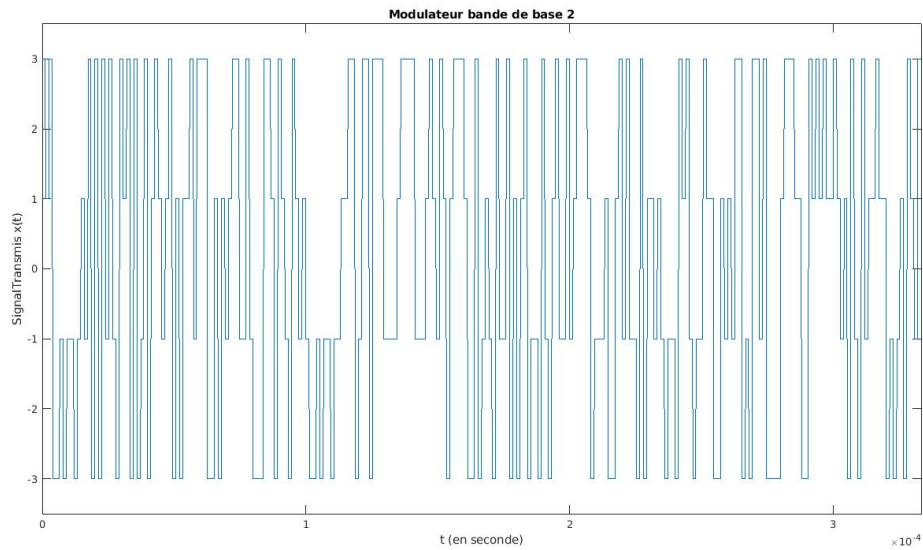


FIGURE 4 – Signal émis à partir du Modulateur 2

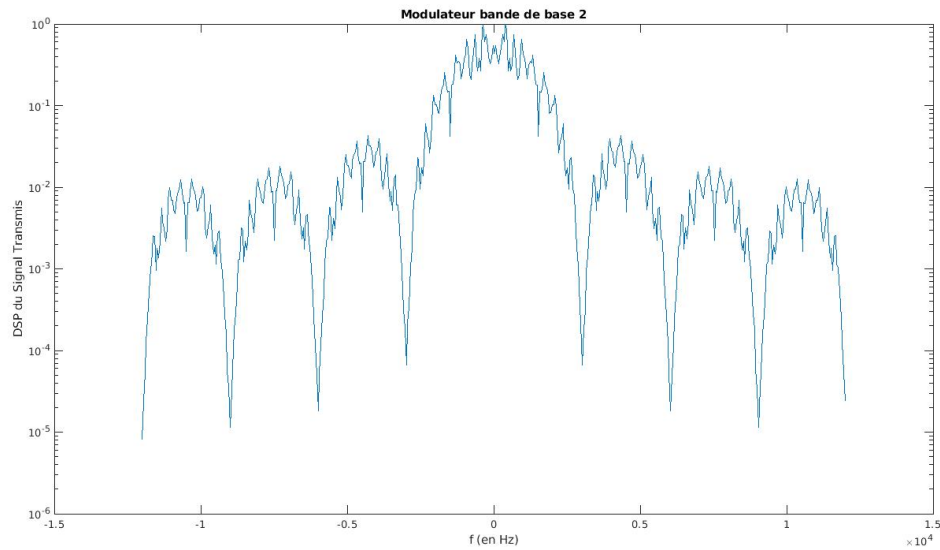


FIGURE 5 – DSP du signal transmis à partir du Modulateur 2

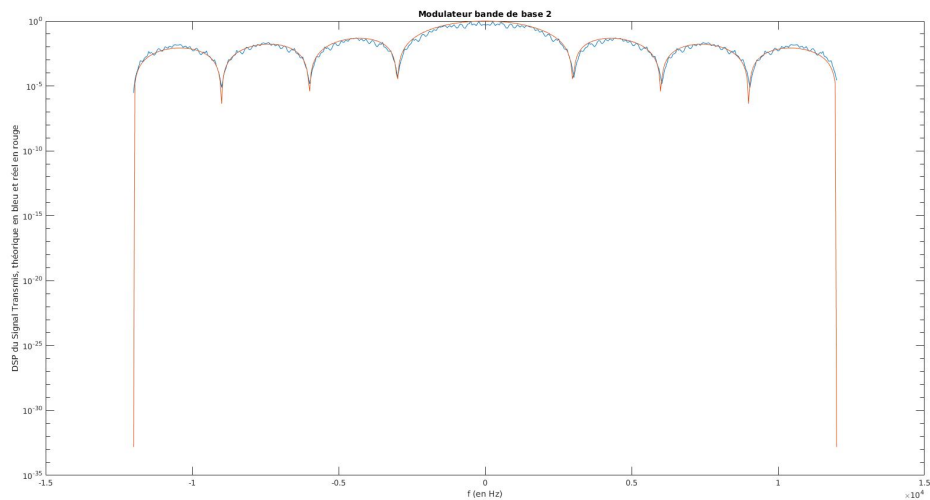


FIGURE 6 – Comparaison de la DSP réelle et théorique

2.3.3 Modulateur 3

Sur la figure 7, nous observons le tracé du signal transmis, avec une échelle en secondes. Le mapping à une nouvelle fois bien été réalisé.

Ensuite sur la figure 8, nous observons le tracé de la densité spectrale de puissance (DSP) du signal transmis avec une échelle fréquentielle en Hz ce qui va nous permettre de mesurer l'efficacité spectrale.

Enfin, sur la figure 9 nous pouvons comparer le tracé obtenu pour la DSP simulée avec celui de la DSP théorique du signal généré. Ces 2 signaux se superposent comme attendu.

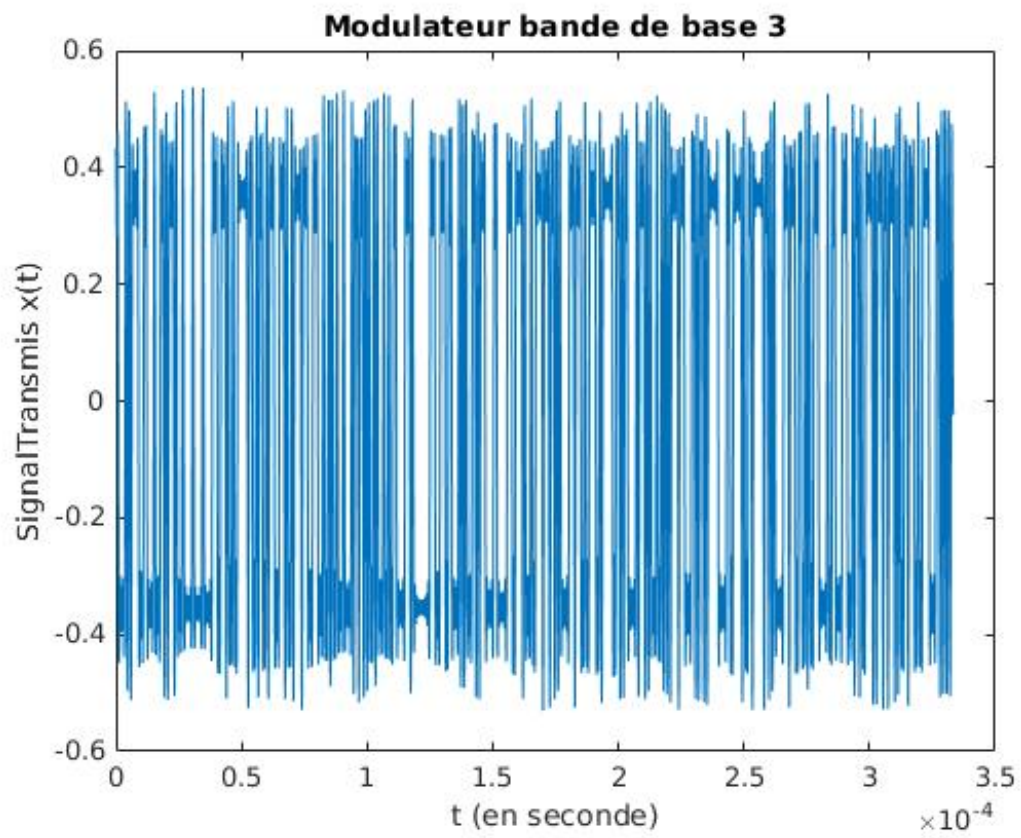


FIGURE 7 – Signal émis à partir du Modulateur 3

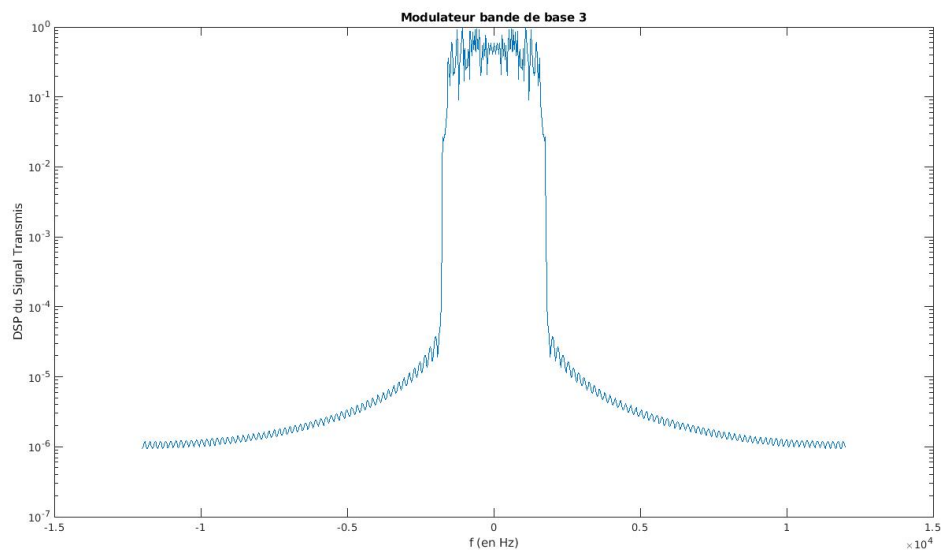


FIGURE 8 – DSP du signal transmis à partir du Modulateur 3

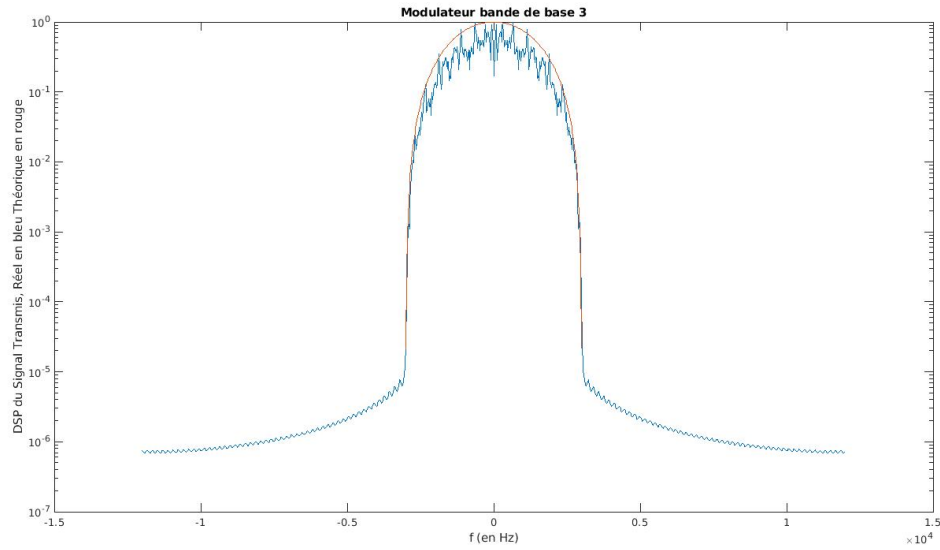


FIGURE 9 – Comparaison de la DSP réelle et théorique

2.3.4 Comparaison des modulateurs implantés en termes d'efficacité spectrale

Nous allons donc comparer l'efficacité spectrale des 3 modulateurs qui est définie par $\eta = R_b/B$ avec R_b la débit binaire et B la bande de fréquence au dela de laquelle l'atténuation minimale est de 20 dB. Nous trouvons alors pour le mdoulateur 1 $B = 1.5 * 10^4$ d'où $\eta = 0.2$.

Pour le modulateur 2 $B = 5 * 10^3$ d'où $\eta = 0.6$.

pour le modulateur 3 $B = 2 * 10^3$ d'où $\eta = 1.5$.

En terme d'efficacité spectrale, le modulateur 3 est le plus efficace. Les paramètres permettant d'augmenter l'efficacité spectrale sont : l'augmentation du débit binaire ou la diminution de la bande de fréquence au dela laquelle l'atténuation minimale est de 20 dB.

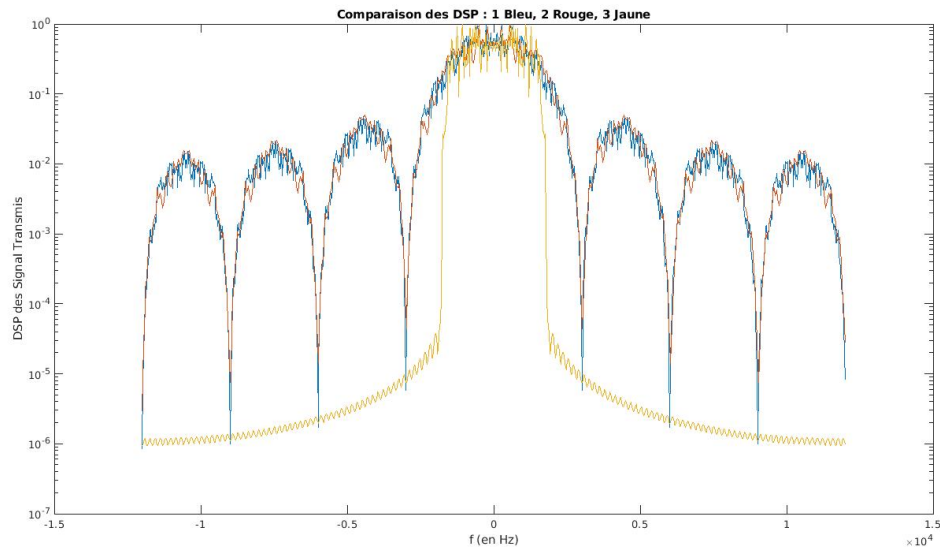


FIGURE 10 – Comparaison des 3 DSP

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

- Tout d'abord, sur la figure 11, nous observons le tracé du signal en sortie du filtre de réception. Celui-ci est bien conforme à ce qui est attendu en théorie car le filtre du cosinus surélevé a bien été implanté.

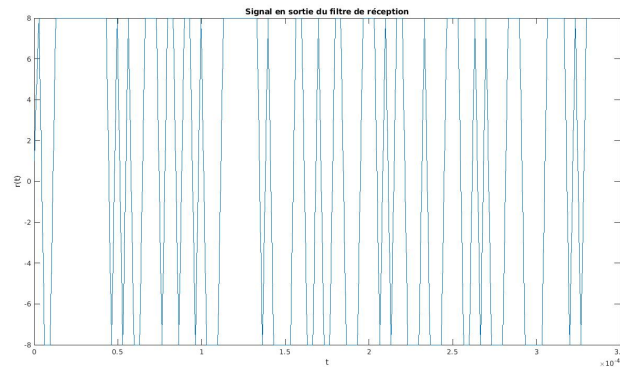


FIGURE 11 – Signal en sortie du filtre de réception

- Ensuite, en figure 12, nous avons le tracé de la réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission g . Elle est conforme à ce qui est attendu en théorie : le produit de convolution de 2 fonctions portes donne bien une fonction triangle. (voir cours et TDs)

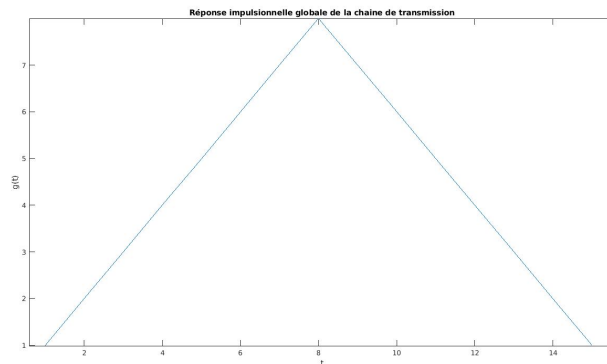


FIGURE 12 – Réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission

- Il est possible de déterminer, en utilisant g , l'instant n_0 optimal permettant d'échantillonner aux instants sans interférence entre symboles $n_0 + mN_s$. Il faut choisir un point de g où il n'y a qu'un seul antécédent. Ainsi il ne peut y avoir d'interférences. Ici il faut donc prendre $n_0 = 8$ pour qu'il n'y ait pas d'interférences.
- Nous observons sur la figure 13 le tracé du diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception. Il est conforme à ce qui est attendu car le critère de Nyquist peut être respecté. L'instant optimal permettant d'échantillonner aux instants sans interférences entre symboles est $n_0 = 8$ car pour tout m : $g(n_0 + mN_s) = \pm 8$ comme on peut le voir sur le diagramme de l'oeil.

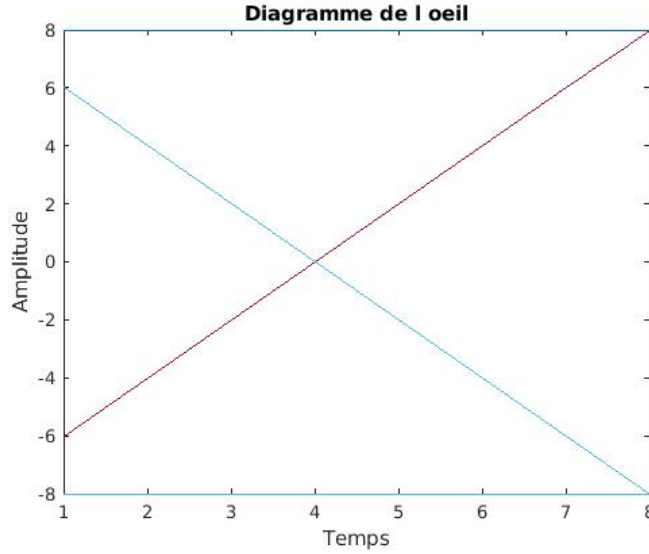


FIGURE 13 – Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception

- Nous remarquons que lorsque l'instant n_0 d'échantillonnage est optimal, le TEB mesuré est nul sans canal de propagation car les critères sont bien respectés donc il n'y a pas d'interférences. Par contre lorsqu'on choisit $n_0 = 3$, on a $TEB = 0,55$, car il y a des interférences comme nous le voyons sur le diagramme de l'oeil sur la figure 13.

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 :

Sur la figure 14, nous observons le tracé de la réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission et sur la figure 15, le tracé du diagramme de l'oeil à la sortie du filtre de réception. Comme on a $BW = 8000$ Hz, le TEB déterminé en présence de ce canal est toujours de 0 car les critères sont toujours respectés comme nous pouvons le voir sur le diagramme de l'oeil, les interférences sont négligeables et n'affecte pas le résultat.

2. Pour $BW = 1000$ Hz :

Sur la figure 16, nous observons le tracé de la réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission et sur la figure 17, le tracé du diagramme de l'oeil à la sortie du filtre de réception. Le tracé, sur la même figure, de $|H(f)H_r(f)|$ 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, nous permet de voir que le critère de Nyquist ne sera plus respecté et que le TEB ne sera donc plus nul. Le TEB déterminé en présence de ce canal est de 0.495.

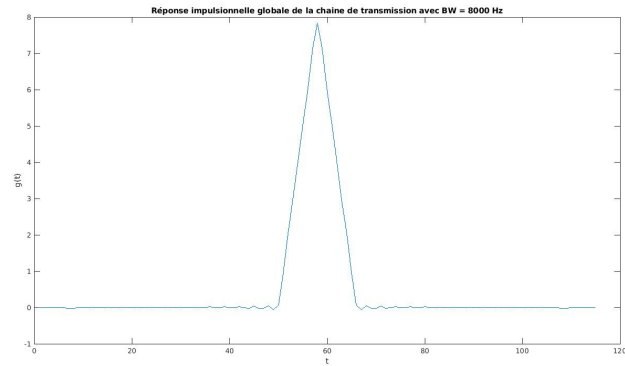


FIGURE 14 – Réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission avec $BW = 8000$

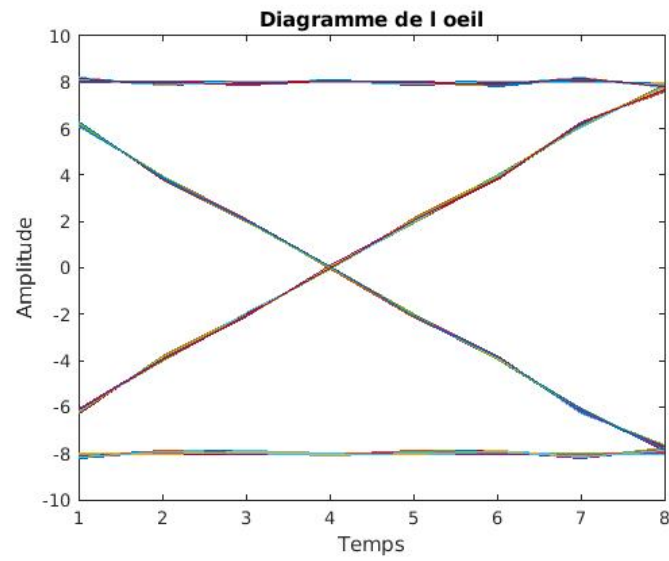


FIGURE 15 – Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception avec $BW = 8000$

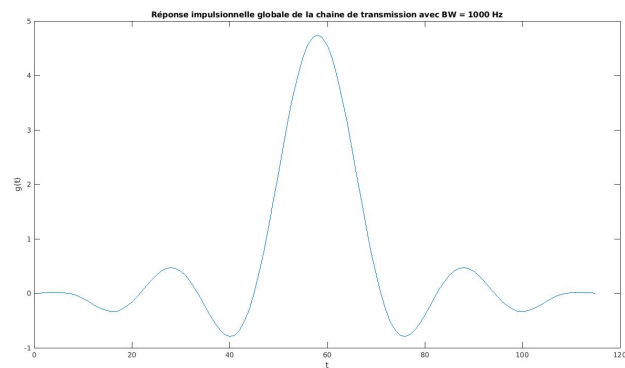


FIGURE 16 – Réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission avec $BW = 1000$

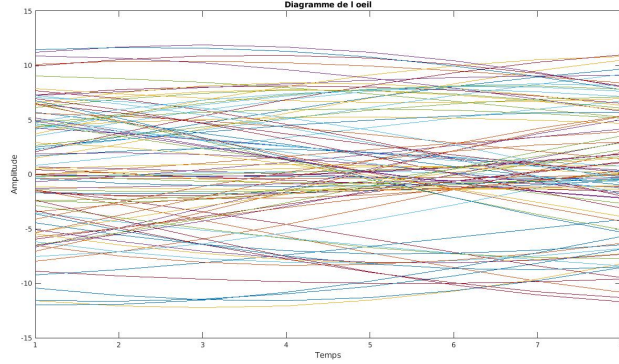


FIGURE 17 – Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception avec $BW = 1000$

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 pouvons observer un exemple de diagramme de l'oeil avec $E_b/N_0 = 5$ sur la figure 18.
2. Le tracé du 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 sur la figure 19.
3. Le tracé, sur la figure 20, du TEB simulé et du TEB théorique de la chaîne étudiée qui correspondent bien.

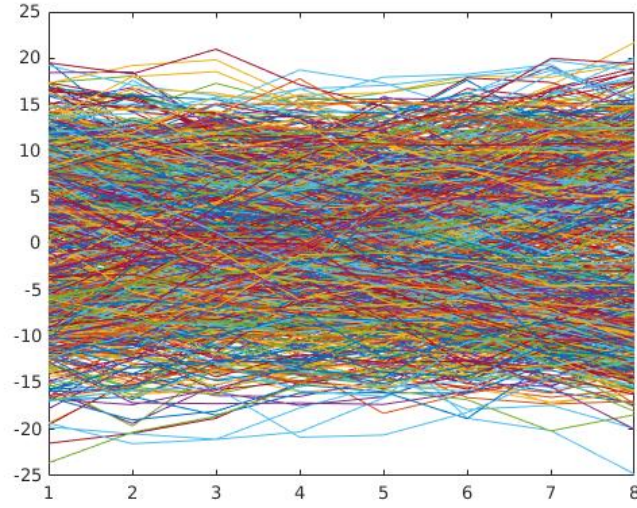


FIGURE 18 – Diagramme de l’œil avec du bruit

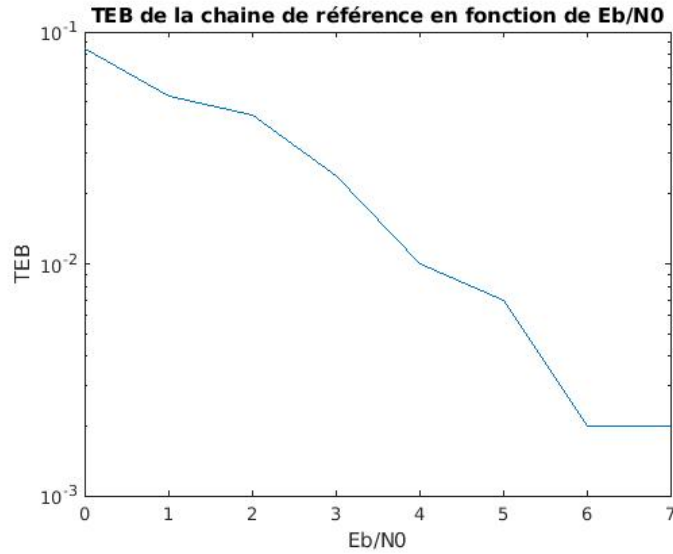


FIGURE 19 – TEB de la chaîne de référence en fonction du rapport (E_b/N_0)

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 21.

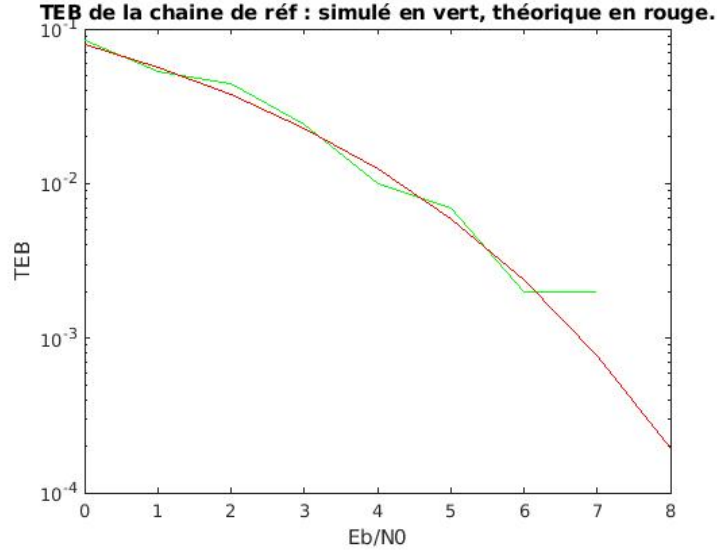


FIGURE 20 – Comparaison du TEB simulé et théorique de la chaîne de référence en fonction du rapport (E_b/N_0)

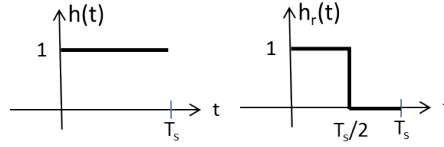


FIGURE 21 – Réponses impulsionnelles des filtres d'émission et de réception.

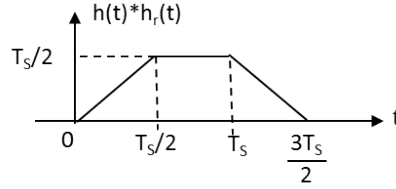


FIGURE 22 – Produit de convolution entre $h(t)$ et $h_r(t)$.

4.3.1 Implantation de la chaîne sans bruit

Nous avons le tracé du diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception sur la durée T_s (N_s échantillons), sur la figure 23 ce qui nous permet d'en déduire les instants optimaux d'échantillonnage $n_0 + mN_s$ qui se situent entre 4 et 8. Nous avons donc choisi de prendre $N_0 = 6$ pour palier à des éventuels problèmes de synchronisations. En vous référant au cours et/ou aux TDs expliquez en quoi ce diagramme de l'oeil est conforme à ce qui est attendu en théorie.

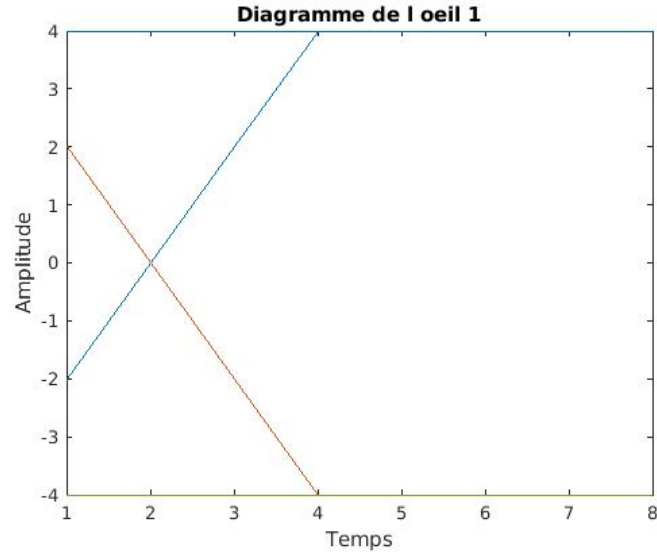


FIGURE 23 – Diagramme de l’oeil en sortie du filtre de réception sur la durée T_s

4.3.2 Implantation de la chaine avec bruit

1. Voici le tracé, sur une même figure (19), du TEB simulé et du TEB théorique de la chaine étudiée.

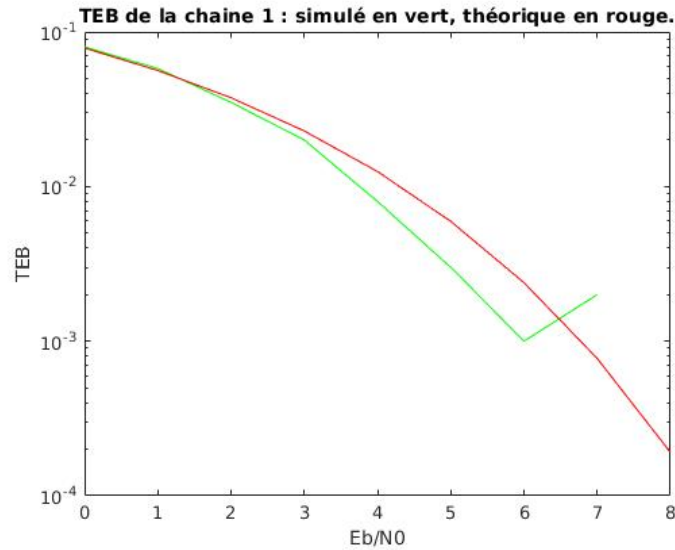


FIGURE 24 – TEB de la chaine 1 : Simulé en vert, théorique en rouge.

2. Voici le tracé, sur la même figure (25), du TEB obtenu par simulation pour la chaine de transmission étudiée et celui du TEB de la chaine de référence. Les 2 sont similaires car les filtres utilisés sont similaires.
3. Cette chaine de transmission a une efficacité similaire avec la chaine de référence en terme de puissance.

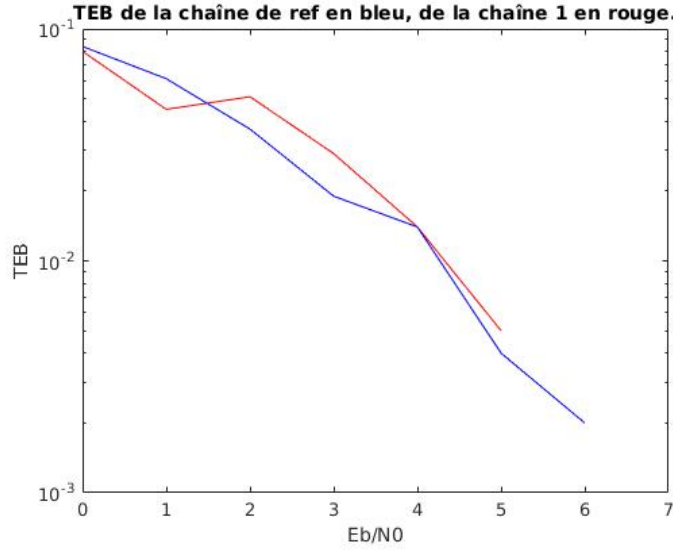


FIGURE 25 – TEB de la chaîne 1 : Chaîne 1 en vert, Référence en rouge.

4.4 Deuxième chaîne à étudier, planter 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

Nous avons le tracé du diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception sur la durée T_s (N_s échantillons) et en déduire les instants optimaux d'échantillonnage $n_0 + mN_s$ en expliquant votre choix pour n_0 . En vous référant au cours et/ou aux TDs expliquez en quoi ce diagramme de l'oeil est conforme à ce qui est attendu en théorie.

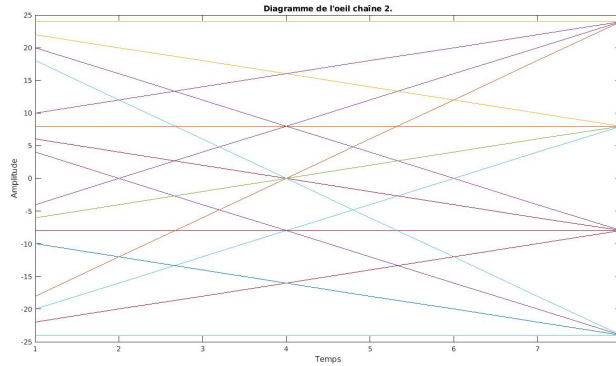


FIGURE 26 – Diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception sur la durée T_s

4.6 Implantation de la chaîne avec bruit

1. Sur la figure 27 le tracé du taux d'erreur symbole 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.

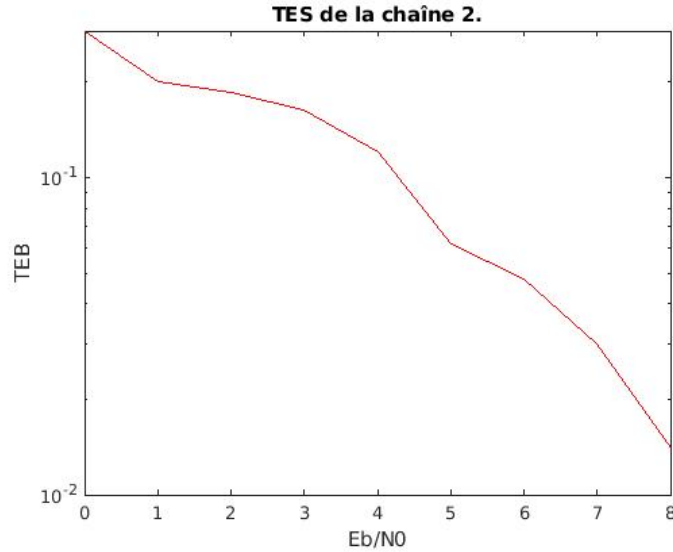


FIGURE 27 – TES en fonction du rapport E_b/N_0 en dB.

2. Sur la figure 28 le tracé du TES simulé et du TES théorique de la chaîne étudiée donné ci-dessous :

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

pour une transmission de symboles 4-aires indépendants prenant leurs valeurs dans $\pm 1, \pm 3$, en utilisant une chaîne de transmission respectant le critère de Nyquist, le critère de filtrage adapté et utilisant les instants optimaux d'échantillonnage et seuils optimaux de décision. Ce tracé permet de valider le bon fonctionnement de la chaîne de transmission 2.

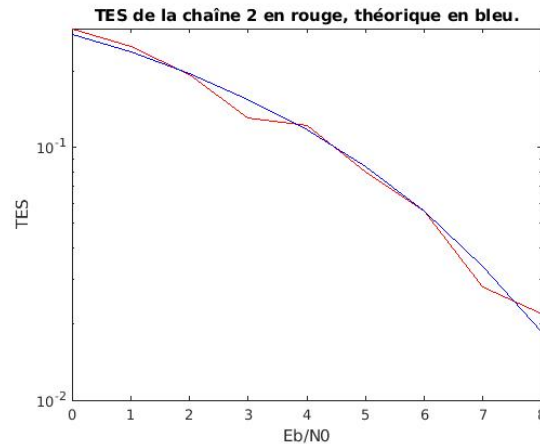


FIGURE 28 – TES en fonction du rapport E_b/N_0 en dB.

3. Sur la figure 29 le tracé du TEB obtenu par simulation pour la chaîne de transmission étudiée et du TEB suivant :

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

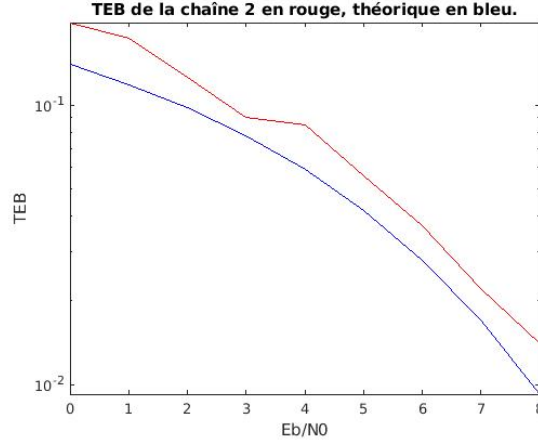


FIGURE 29 – TES en fonction du rapport E_b/N_0 en dB.

En pratique, il n'y a pas de différence observé entre le TES et le TEB alors que dans la théorie $2 * TES = TEB$.

4. Voici sur la figure 30 les tracés du TEB obtenu par simulation pour la chaîne de transmission étudiée, du TEB de la chaîne de référence et du TEB de la chaîne 1. La chaîne 2 n'a pas la même allure que les 2 autres chaîne car nous avons changé le mapping ainsi que la détection des symboles (qui a une distance plus faible que les 2 premières chaînes). La chaîne la plus efficace en puissance est celle qui demande le E_b/N_0 le plus faible pour atteindre le TEB fixé. Par conséquent, les 2 premières chaînes sont plus efficaces en puissance que la dernière.

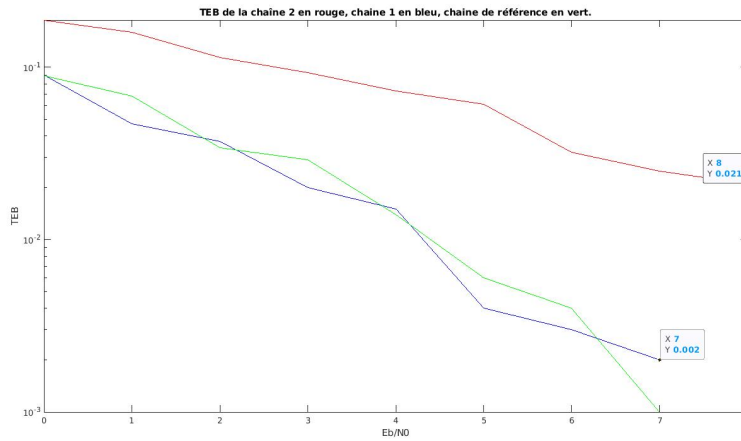


FIGURE 30 – TES en fonction du rapport E_b/N_0 en dB.

5 Conclusion

L'objectif du travail présenté dans ce rapport était de s'initier à l'étude d'une chaîne de transmission en bande de base afin d'être capable :

- D'en évaluer l'efficacité spectrale et l'efficacité en puissance comme nous l'avons fait en analysant les différentes figures.
- D'identifier les solutions possibles pour l'optimiser en termes d'efficacité spectrales et d'efficacité en puissance.
- De comparer des chaînes de transmission en terme d'efficacité spectrale et d'efficacité en puissance. En termes d'efficacité en puissance, la chaîne la plus efficace est celle qui demande le E_b/N_0 le plus faible pour atteindre le TEB fixé. En terme d'efficacité spectrale pour augmenter l'efficacité il faut augmenter le débit binaire ou diminuer la bande de fréquence au delà laquelle l'atténuation minimale est de 20 dB.

6 Références

- Cours de Télécommunications, INP-ENSEEIH