



Rapport étude en bande de base et fréquence porteuse

Lilian Labiste
Jean-Baptiste Prevost

Département Sciences du Numérique - Première année
2021-2022

Table des matières

1	Introduction	4
2	Étude de modulateurs bande de base	4
2.1	Modulateur 1	4
2.2	Modulateur 2	5
2.3	Modulateur 3	7
2.4	Comparaison	8
3	Étude des interférences entre symbole et du critère de Nyquist	8
3.1	Étude sans canal de transmission	8
3.2	Étude avec canal de transmission	10
3.2.1	Fréquence de coupure $BW = 8000$ Hz	10
3.2.2	Fréquence de coupure $BW = 1000$ Hz	12
4	Étude de l'impact du bruit, filtrage adapté, taux d'erreur binaire, efficacité en puissance	13
4.1	Chaîne de référence	13
4.2	Première chaîne à étudier	15
4.2.1	Chaîne sans bruit	15
4.2.2	Chaîne avec bruit	15
4.3	Deuxième chaîne à étudier	16
4.3.1	Chaîne sans bruit	17
4.3.2	Chaîne avec bruit	17
4.4	Comparaison efficacité	18
5	Études de chaînes de transmission sur fréquence porteuse	19
5.1	Utilisation de la chaîne passe-bas équivalente pour le calcul et l'estimation du taux d'erreur binaire	19
5.1.1	Implantation de la chaîne sur fréquence porteuse	20
5.1.2	Implantation de la chaîne passe-bas équivalente	22
5.2	Comparaison de modulations sur fréquence porteuse	25
5.2.1	Modulation 4-ASK	25
5.2.2	Modulation QPSK	26
5.2.3	Modulation 8-PSK	28
5.2.4	Modulation 16-QAM	29
5.2.5	Comparaison des chaînes de transmission	31

Table des figures

1	Signal 1 mappé	4
2	Densité spectrale de puissance du signal 1	5
3	Signal 2 mappé	6
4	Densité spectrale de puissance du signal 2	6
5	Signal 3 mappé	7
6	Densité spectrale de puissance du signal 3	7
7	Densité spectrale de puissance des modulateurs	8
8	Signal après filtre de réception	9
9	Réponse impulsionnelle globale sans canal de propagation	9
10	Diagramme de l'oeil sans canal de propagation	10
11	Réponse impulsionnelle $f_c = 8000$ Hz	11
12	Diagramme de l'oeil pour $f_c = 8000$ Hz	11
13	Réponse fréquentielle pour $f_c = 8000$ Hz	11

14	Réponse impulsionnelle $f_c = 1000$ Hz	12
15	Diagramme de l'oeil pour $f_c = 1000$ Hz	12
16	Réponse fréquentielle pour $f_c = 1000$ Hz	12
17	Diagramme de l'oeil sans canal de propagation	13
18	Diagramme de l'oeil pour different puissance de bruit	14
19	TEB simulé et théorique en fonction de $\frac{E_b}{N_0}$	14
20	Diagramme de l'oeil sans canal de propagation	15
21	Diagramme de l'oeil pour differentes puissances de bruit	16
22	TEB simulé et théorique en fonction de $\frac{E_b}{N_0}$	16
23	Diagramme de l'oeil sans canal de propagation	17
24	TES simulé et théorique en fonction de $\frac{E_b}{N_0}$	18
25	TEB simulé et théorique en fonction de $\frac{E_b}{N_0}$	18
26	TEB simulé et théorique en fonction de $\frac{E_b}{N_0}$	18
27	Chaîne de transmission sur porteuse	19
28	Chaîne de transmission passe-bas équivalente	20
29	Signal sur fréquence porteuse	20
30	DSP du signal sur fréquence porteuse	21
31	TEB simulé et théorique en fonction de $\frac{E_b}{N_0}$	21
32	Signal sur fréquence porteuse	22
33	DSP du signal sur fréquence porteuse	22
34	Constellation chaine de reference sortie de mapping	23
35	Constellation chaine de référence sortie d'échantillonneur $\frac{E_b}{n_0} = 0$ dB	24
36	Constellation chaine de référence sortie d'échantillonneur $\frac{E_b}{n_0} = 6$ dB	24
37	Comparaison TEB de la chaine équivalente et la chaine sur fréquence porteuse	24
38	Comparaison TEB de la chaine équivalente et la chaine sur fréquence porteuse (4-ASK)	25
39	Constellation chaine de référence sortie d'échantillonneur $\frac{E_b}{n_0} = 0$ dB (4-ASK)	26
40	Constellation chaine de référence sortie d'échantillonneur $\frac{E_b}{n_0} = 6$ dB (4-ASK)	26
41	TEB simulé et théorique modulateur 4-ASK	26
42	Comparaison TEB de la chaine équivalente et la chaine sur fréquence porteuse (QPSK)	27
43	Constellation chaine de référence sortie d'échantillonneur $\frac{E_b}{n_0} = 0$ dB (QPSK)	27
44	Constellation chaine de référence sortie d'échantillonneur $\frac{E_b}{n_0} = 6$ dB (QPSK)	27
45	TEB simulé et théorique modulateur QPSK	28
46	Comparaison TEB de la chaine équivalente et la chaine sur fréquence porteuse (8-PSK)	28
47	Constellation chaine de référence sortie d'échantillonneur $\frac{E_b}{n_0} = 0$ dB (8-PSK)	29
48	Constellation chaine de référence sortie d'échantillonneur $\frac{E_b}{n_0} = 6$ dB (8-PSK)	29
49	TEB simulé et théorique modulateur 8-PSK	29
50	Comparaison TEB de la chaine équivalente et la chaine sur fréquence porteuse (16-QAM)	30
51	Constellation chaine de référence sortie d'échantillonneur $\frac{E_b}{n_0} = 0$ dB (16-QAM)	30
52	Constellation chaine de référence sortie d'échantillonneur $\frac{E_b}{n_0} = 6$ dB (16-QAM)	30
53	TEB simulé et théorique modulateur 16-QAM	31
54	Comparaison du TEB des different modulateur	31

1 Introduction

L'objectif de ce travail est la mise en place de chaines de transmission en bande de base ainsi que sur fréquence porteuse, en passant par la détermination du TEB pour différents rapports signal sur bruit afin de déterminer la chaine la plus efficace.

2 Étude de modulateurs bande de base

Dans cette partie l'étude portera sur trois modulateurs avec des mappings ainsi que des filtres de mise en forme différents. Pour chacun de ces modulateurs nous étudierons le signal émis ainsi que sa densité spectrale de puissance. Ainsi, nous pourrons classer ces différents modulateurs par ordre d'efficacité spectrale et identifier les paramètres jouant sur cette dernière.

2.1 Modulateur 1

Le premier modulateur étudié est un modulateur dont le mapping est avec des symboles binaires à moyenne nulle, et avec un filtre de mise en forme rectangulaire de durée $T_{s_1} = N_{s_2} \cdot T_e$. Sur la figure 1 on peut retrouver le signal avant sa mise en forme par le filtre. Le bit 0 est le symbole -1 et le bit 1 est le symbole 1.

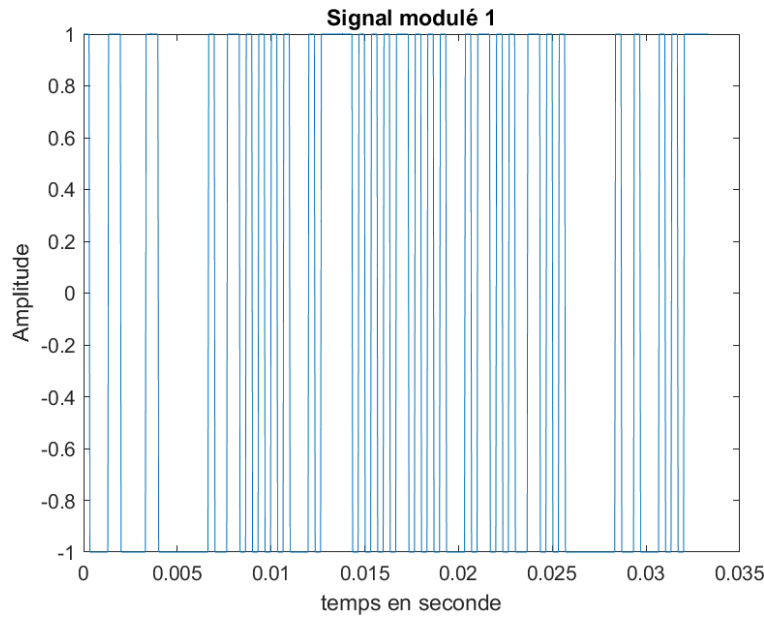


FIGURE 1 – Signal 1 mappé

Une fois ce signal mis en forme par le filtre dédié à cette tâche, nous obtenons la figure 2. Cette figure nous permet d'observer la bande passante de signal et donc son efficacité.

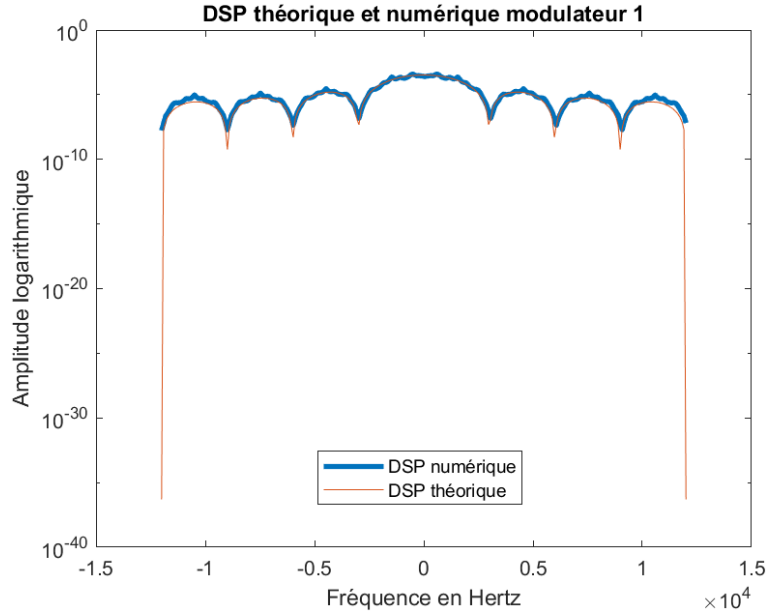


FIGURE 2 – Densité spectrale de puissance du signal 1

2.2 Modulateur 2

Pour ce deuxième modulateur nous gardons le même filtre de mise en forme mais nous utilisons un mapping différent. Ici nous aurons un mapping 4-aires a moyenne nulle donné par le système suivant :

$$Mapping : \begin{cases} 11 = -1V \\ 01 = -3V \\ 00 = +1V \\ 10 = +3V \end{cases}$$

On obtient ainsi le signal sur la figure 3. Grâce a ce mapping le signal émis est deux fois plus court.

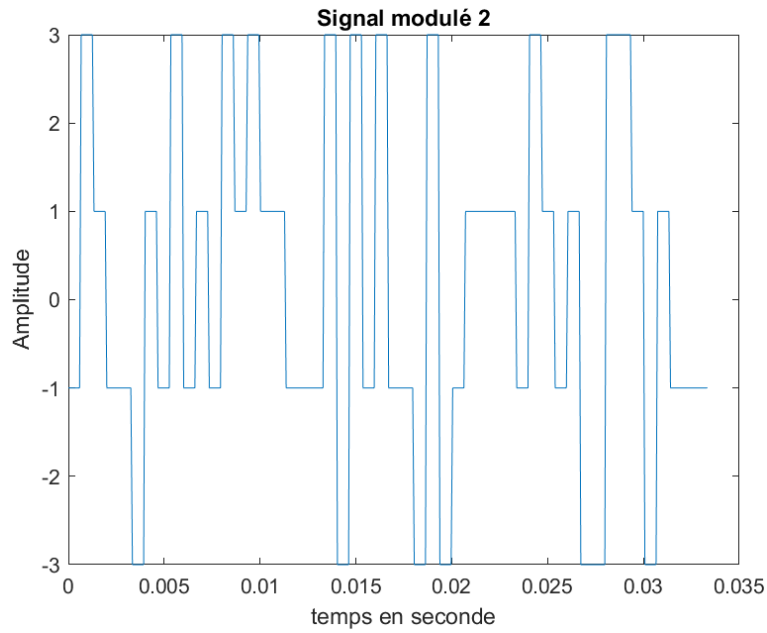


FIGURE 3 – Signal 2 mappé

Après mise en forme de second signal on obtient la figure 4 suivante :

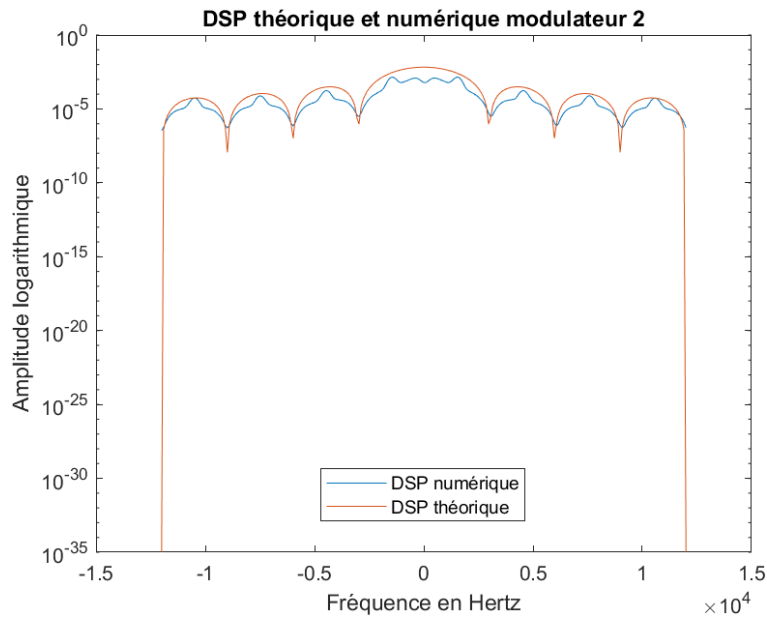


FIGURE 4 – Densité spectrale de puissance du signal 2

Contrairement au premier modulateur où la DSP numérique et théorique se superpose, on peut observer sur la figure 4 que la DSP numérique est légèrement au-dessous de la DSP théorique, ce qui indique que ce modulateur est un peu plus performant.

2.3 Modulateur 3

Pour ce troisième modulateur on utilisera un mapping binaire a moyenne nulle tout comme pour le premier modulateur implanté. Cependant le filtre de mise en forme sera légèrement plus complexe, puisqu'il s'agit d'un filtre en racine de cosinus surélevé. Dans notre cas ce filtre aura un roll-off noté $\alpha = 0.5$. Pour ce qui est du mapping on le retrouve sur la figure 5.

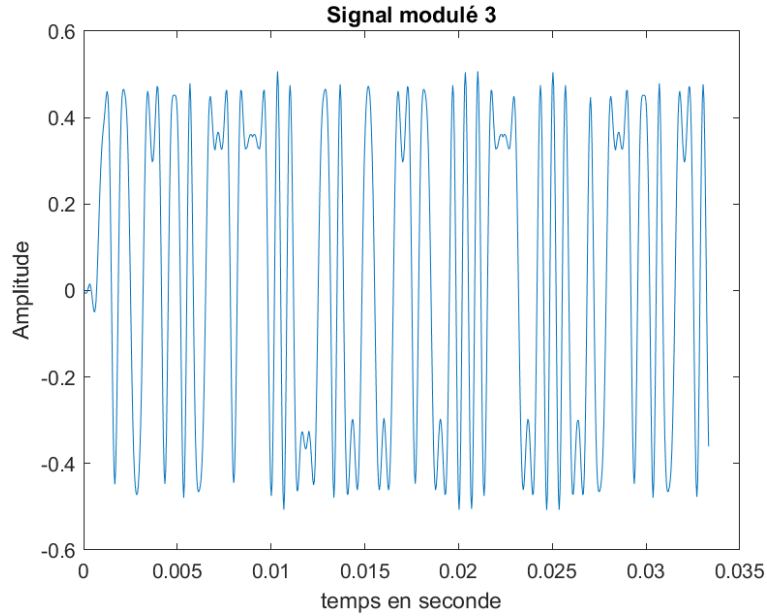


FIGURE 5 – Signal 3 mappé

On retrouve le signal après la mise en forme sur la figure 6.

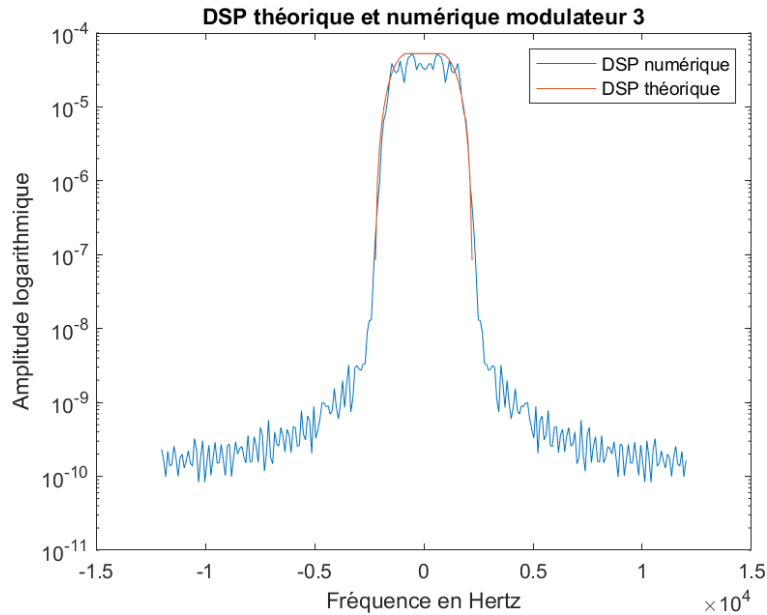


FIGURE 6 – Densité spectrale de puissance du signal 3

Sur la figure 6 on peut observer que la densité spectrale de puissance théorique majore la

densité spectrale de puissance numérique.

2.4 Comparaison

La figure 7 représente les densités spectrales de puissance des trois modulateurs, ce qui va nous permettre de les classer en fonction de leurs efficacité spectrale.

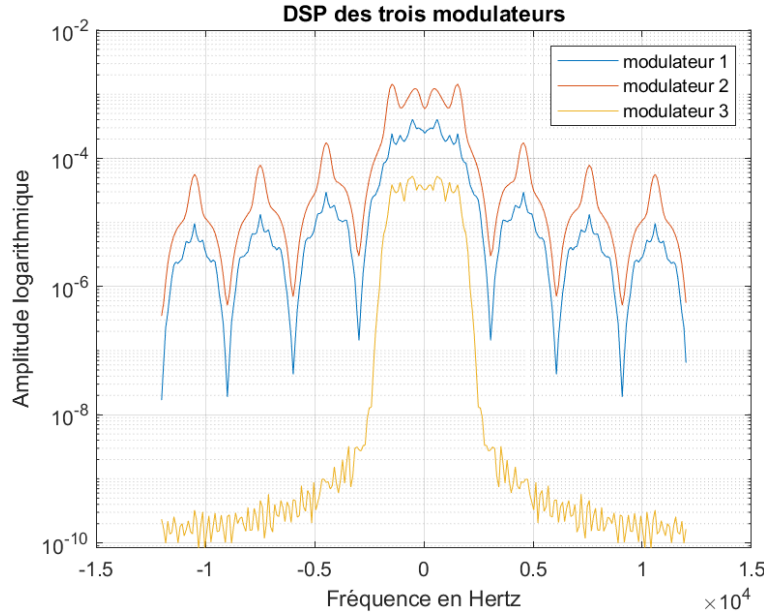


FIGURE 7 – Densité spectrale de puissance des modulateurs

On peut voir sur la figure ci-dessus que l'encombrement spectral du deuxième modulateur est plus élevé que celui du premier, lui même plus élevé que celui du troisième. On peut donc en conclure, le débit étant le même pour les trois modulateurs, que le plus efficace spectralement est le troisième.

3 Étude des interférences entre symboles et du critère de Nyquist

Dans cette deuxième partie il sera question des interférences entre symboles liée à l'échantillonnage du signal reçu, donc cette étude sera liée au critère de Nyquist. Afin d'étudier ce phénomène nous allons implanter une chaîne de transmission en bande de base avec et sans canal de propagation. Pour ce faire nous considérerons un mapping binaire à moyenne nulle avec comme filtre de mise en forme et de réception une réponse impulsionnelle rectangulaire de durée T_s .

3.1 Étude sans canal de transmission

Dans un premier temps nous implanterons une chaîne de transmission sans canal de propagation, sur la figure 8 on retrouve le signal après le filtre de réception.

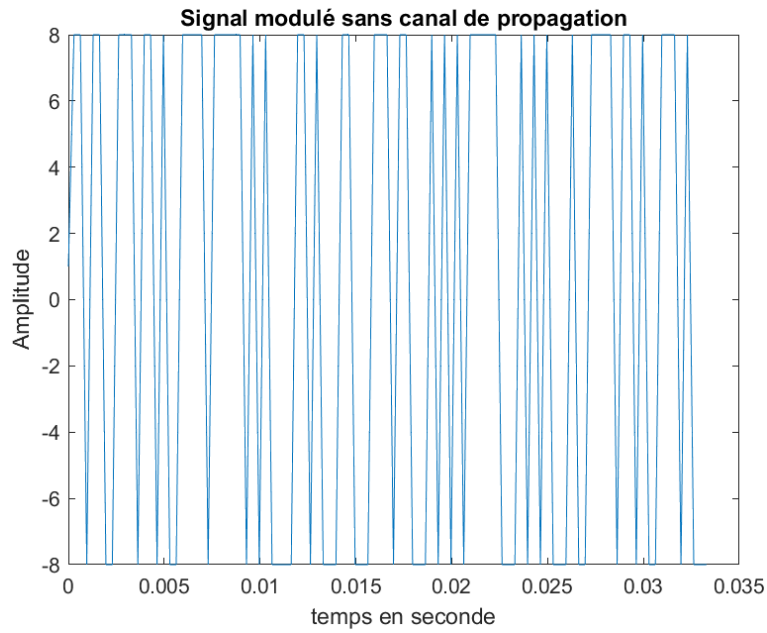


FIGURE 8 – Signal après filtre de réception

Ce signal est bien celui qui est attendu en théorie. En effet la convolution de deux réponse impulsionnelles rectangulaire donne une réponse impulsionnelle triangulaire. La figure 9 nous montre cette réponse impulsionnelle globale.

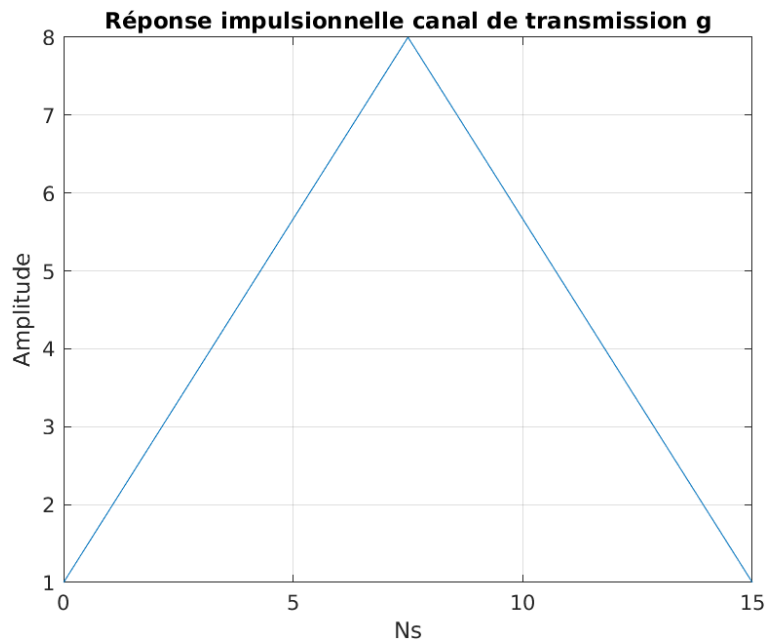


FIGURE 9 – Réponse impulsionnelle globale sans canal de propagation

Afin de respecter le critère de Nyquist il faut échantillonner tous les 8 symboles, cet endroit est représenté par le sommet de la figure 9. Afin de confirmer cela il est possible de tracer un diagramme de l'oeil (figure 10).

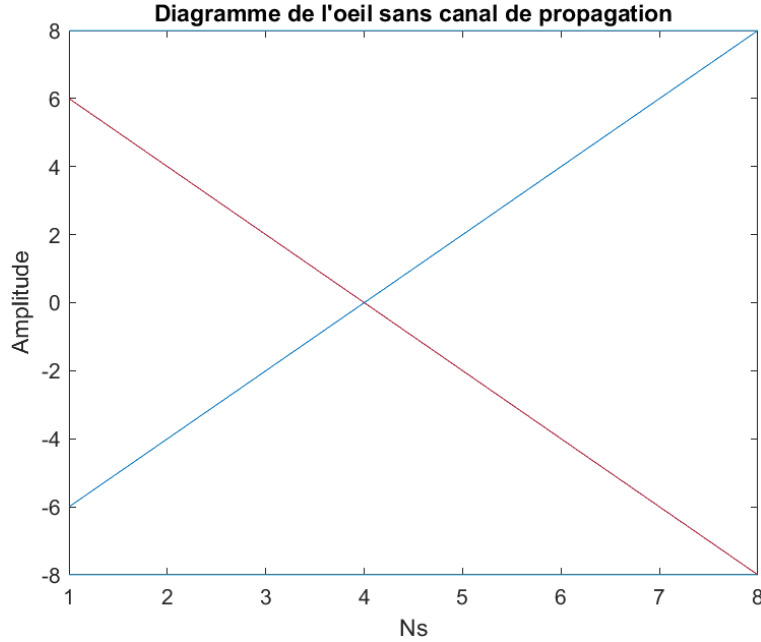


FIGURE 10 – Diagramme de l'oeil sans canal de propagation

Sur la figure 10 on peut lire qu'il est possible d'échantillonner pour $n_0 = 8$, ce qui confirme la réponse précédente. En échantillonnant aux instants optimaux déterminé précédemment on obtient un $TEB = 0$. De plus, lorsque l'on modifie l'instant optimal le TEB n'est plus nul, ce qui est normal car des interférences entre symboles ont alors lieu.

3.2 Étude avec canal de transmission

Maintenant que la chaîne de transmission précédente a été implantée nous allons ajouter un canal de propagation à bande limitée mais sans bruit, cela dans le but de voir l'effet de la bande passante sur un signal émis. Pour simuler ce canal de propagation nous allons implanter un filtre passe-bas ayant la réponse impulsionnelle suivante :

$$h_c = 2 \frac{f_c}{F_e} \text{sinc}\left(2 \frac{f_c}{F_e}\right) \mathbb{1}_{\left[-\frac{N-1}{2}; \frac{N-1}{2}\right]}$$

où f_c représente la fréquence de coupure et N l'ordre du filtre.

Nous implanterons un filtre avec une fréquence de coupure $f_c = 8000$ Hz et un autre avec une fréquence de coupure $f_c = 1000$ Hz.

3.2.1 Fréquence de coupure $BW = 8000$ Hz

En ajoutant ce canal de propagation la chaîne de transmission est modifiée. On obtient donc pour ce premier cas la figure 11. Le diagramme de l'oeil est lui aussi modifié : la figure 12 en est sa nouvelle représentation.

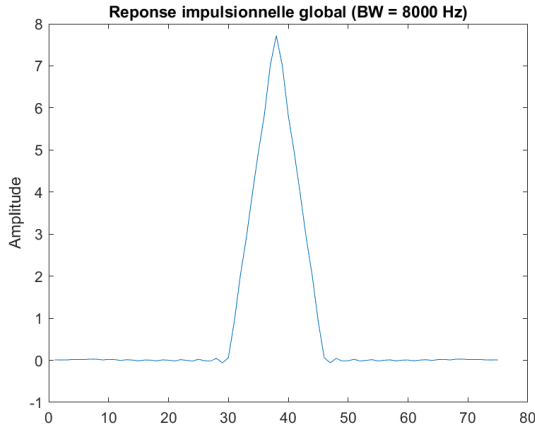


FIGURE 11 – Réponse impulsionnelle
 $f_c = 8000$ Hz

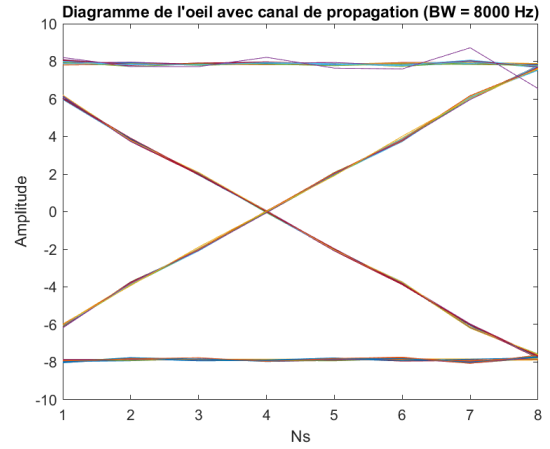


FIGURE 12 – Diagramme de l'oeil pour
 $f_c = 8000$ Hz

Afin de mieux observer et prédire l'effet de la mise en place du canal de propagation, il est possible de tracer la réponse fréquentielle du canal de propagation, noté $H_c(f)$, ainsi que le produit des réponses fréquentielles des filtres de mise en forme et de réception noté respectivement $H(f)$ et $H_r(f)$. La figure 13 en est la représentation.

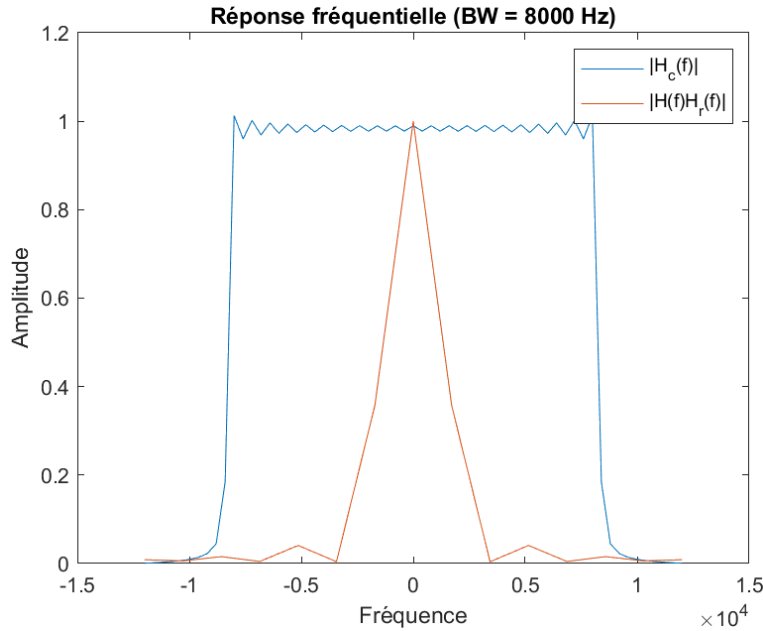


FIGURE 13 – Réponse fréquentielle pour $f_c = 8000$ Hz

On observe bien sur la figure 13 que la réponse fréquentielle du canal englobe la réponse fréquentielle des filtres de mise en forme et de réception. Ceci implique qu'il n'y a pas d'interférence dues à ce canal de propagation, donc le TEB en présence de ce canal avec cette fréquence de coupure est nul.

3.2.2 Fréquence de coupure $BW = 1000$ Hz

En modifiant la fréquence de coupure on modifie les diagrammes obtenus précédemment. On risque donc de créer des interférences, et c'est ce que nous allons voir dans cette sous-partie.

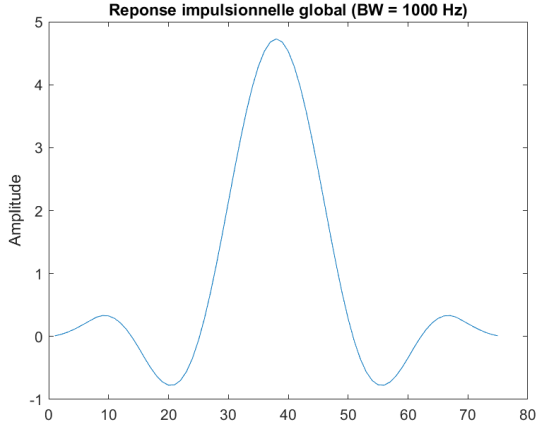


FIGURE 14 – Réponse impulsionnelle
 $f_c = 1000$ Hz

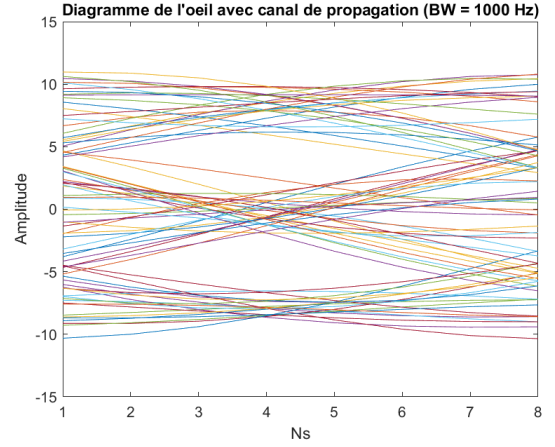


FIGURE 15 – Diagramme de l'oeil pour
 $f_c = 1000$ Hz

Sur la figure 14 on observe que la réponse impulsionnelle est bien différente que celle de la figure 11. De même pour le diagramme de l'oeil, celui de la figure 15 est beaucoup moins clair que celui de la figure 12 : cela s'explique par la présence d'interférences. Sur la figure 16, on peut observer que les réponses fréquentielles se croisent, ce qui provoque des interférences.

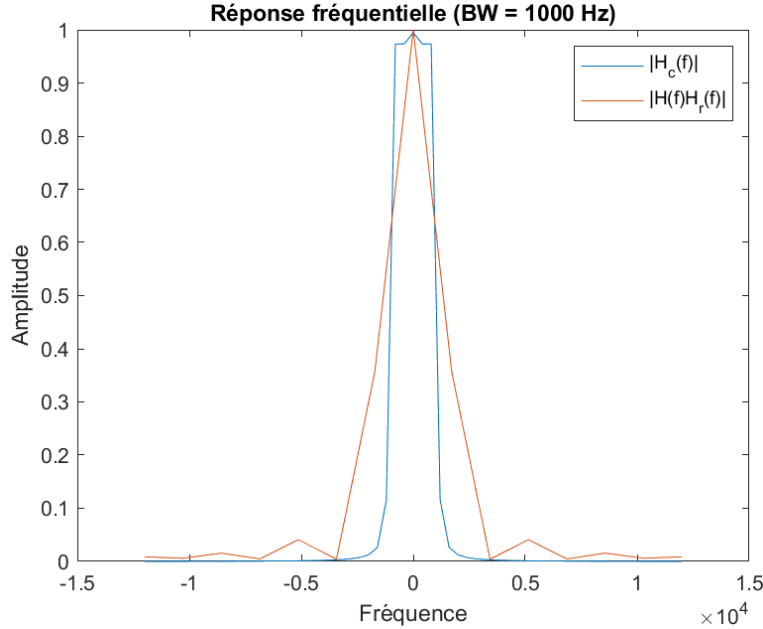


FIGURE 16 – Réponse fréquentielle pour $f_c = 1000$ Hz

A cause de ces interférences, dont on peut observer les causes sur les figures 16 et 15, le TEB n'est plus nul donc tout le message transmis n'est pas lisible.

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

Maintenant que nous avons implanté et étudié différents modulateurs et canaux de propagation nous allons dans cette troisième partie nous intéresser à l'impact du bruit.

4.1 Chaîne de référence

Dans un premier temps nous allons implanter une chaîne de référence, c'est à dire une chaîne sans canal. Pour cela nous allons prendre comme fréquence d'échantillonnage $F_e = 24000$ Hz, et un débit binaire $R_b = 3000$ bits par secondes. Le mapping sera un mapping binaire à moyenne nulle, avec des filtres de mise en forme et de réception rectangulaires de hauteur 1 et de durée T_s .

Une fois la chaîne implantée on trace le diagramme de l'oeil, ici la figure 17. On peut notamment lire que pour respecter le critère de Nyquist il faut échantillonner à $n_0 = 8$.

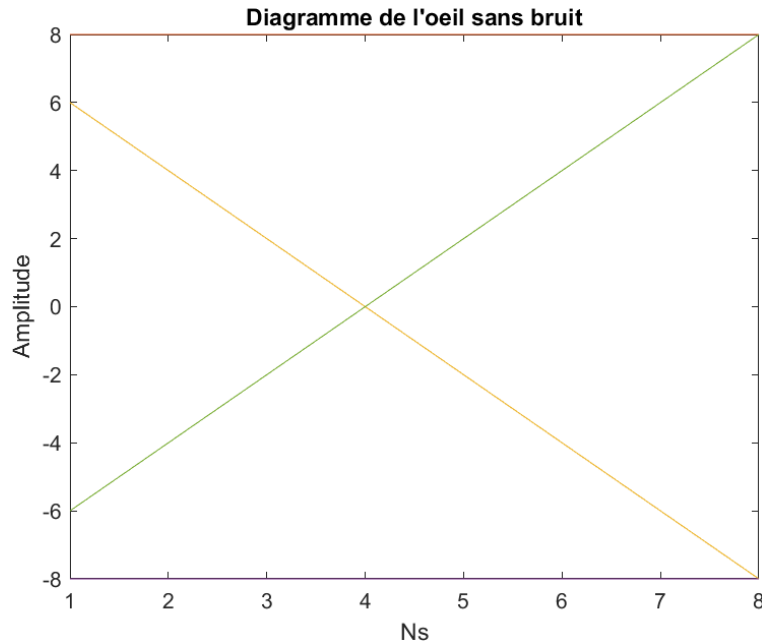


FIGURE 17 – Diagramme de l'oeil sans canal de propagation

Maintenant que nous avons déterminé l'instant d'échantillonnage optimal nous allons étudier l'effet du bruit sur notre signal, notamment en regardant différents diagrammes de l'oeil tracés pour des valeurs de $\frac{E_b}{N_0}$ allant de 0 dB à 8 dB. Pour des questions de lisibilité des diagrammes de l'oeil le choix de réduire le nombre de bits émis a été diminué.

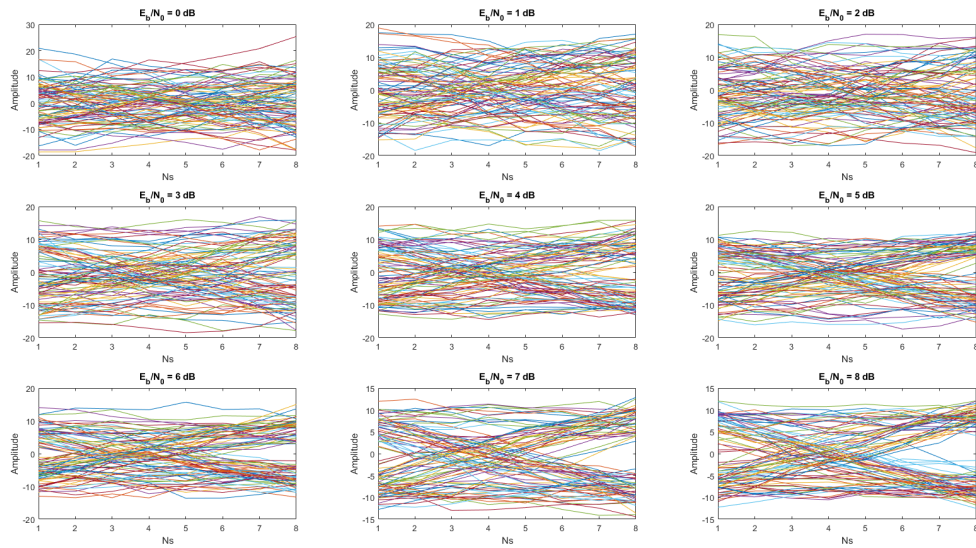


FIGURE 18 – Diagramme de l’oeil pour different puissance de bruit

Sur la figure 18 on observe bien que plus le rapport signal sur bruit est important moins les interférences sont importantes. On peut mieux observer cet diminution des interférences grâce a la figure 19 où le taux d’erreur binaire théorique et simulé ont été tracé en fonction du rapport signal sur bruit. Pour rappel le TEB théorique vaut $TEB = Q(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}})$.

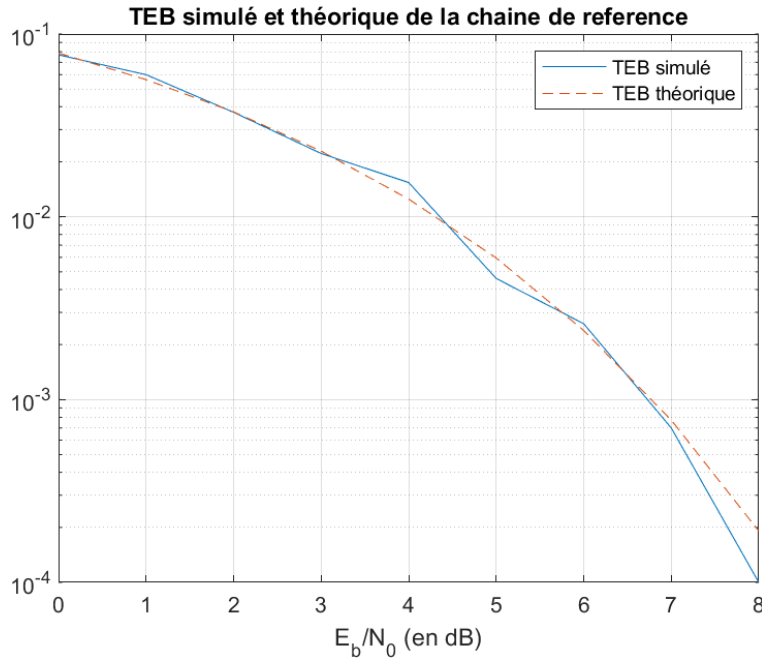


FIGURE 19 – TEB simulé et théorique en fonction de $\frac{E_b}{N_0}$

Sur la figure 19 on observe bien que plus le rapport signal à bruit est élevé plus le TEB diminue. On peut donc jouer sur ce rapport afin d’améliorer nos transmissions. De plus les TEB théorique

et simulé correspondent : on a donc une chaîne fonctionnelle.

4.2 Première chaîne à étudier

Maintenant que la chaîne de référence est implantée nous allons implanter la première chaîne d'étude où le filtre d'émission sera rectangulaire de durée T_s et de hauteur 1, tandis que le filtre de réception sera une porte de durée $\frac{T_s}{2}$ et de hauteur 1.

4.2.1 Chaîne sans bruit

Sans bruit et avec un autre filtre de réception, on doit de nouveau déterminer les instants d'échantillonnage optimaux. Comme précédemment on trace le diagramme de l'oeil que l'on retrouve figure 20.

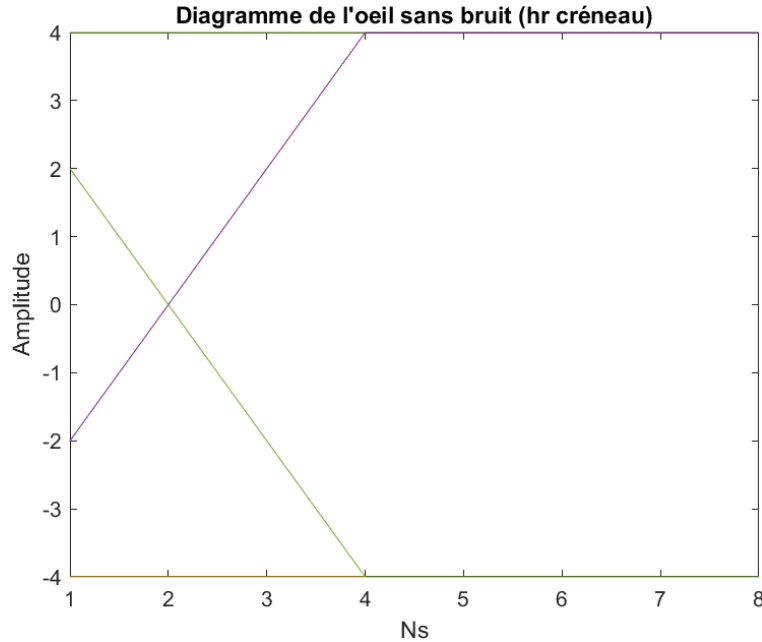


FIGURE 20 – Diagramme de l'oeil sans canal de propagation

En lisant le diagramme de l'oeil de la figure 20, on trouve que les instants optimaux se situent entre 4 et 8. Cependant nous choisirons $t_0 = 8$ car c'est pour cette valeur que le critère de Nyquist est respecté. Maintenant que nous avons cette valeur nous pouvons échantillonner et ainsi vérifier que le TEB vaut 0.

4.2.2 Chaîne avec bruit

En ajoutant une comparaison à faire DSP, en présence de bruit le TEB risque de ne pas être nul et varier en fonction. Pour observer ce phénomène, nous allons faire varier ce bruit afin de quantifier le TEB, comme pour la chaîne de référence.

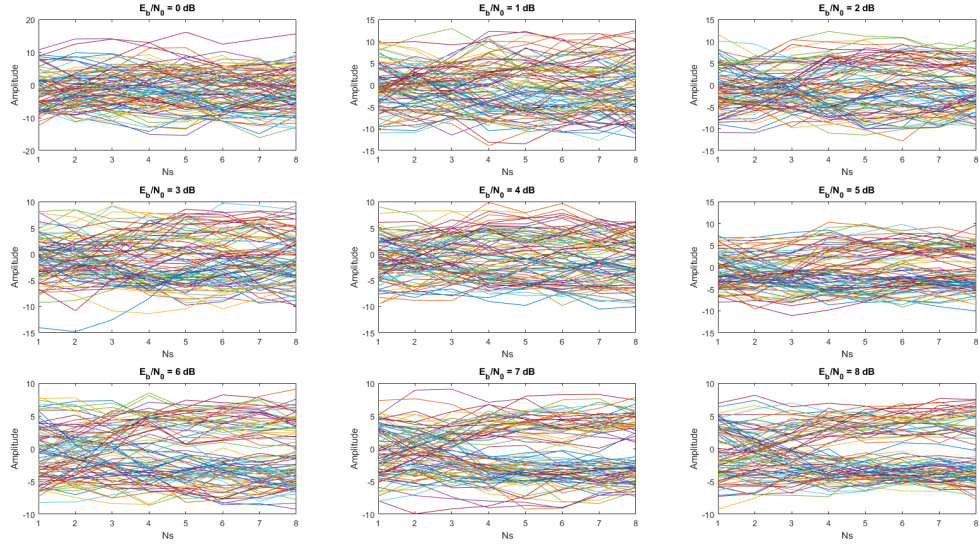


FIGURE 21 – Diagramme de l’œil pour différentes puissances de bruit

le

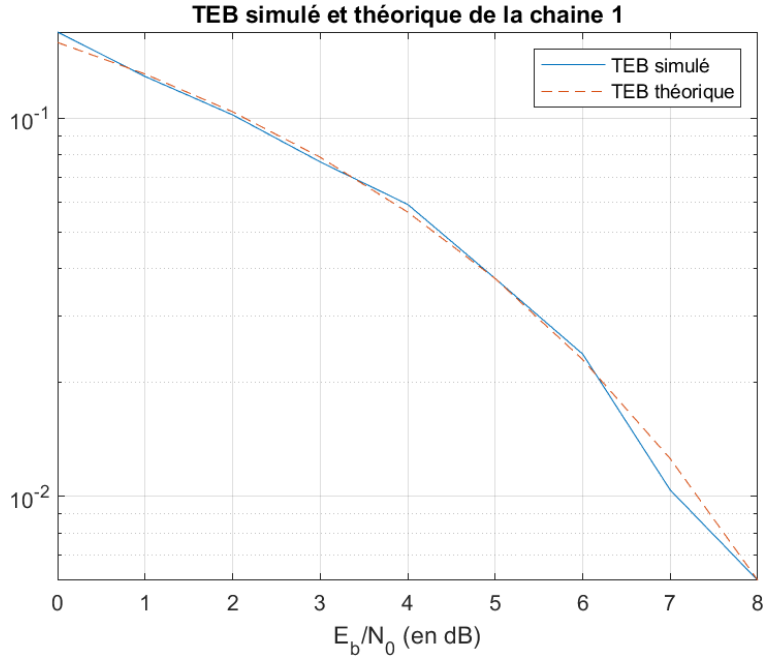


FIGURE 22 – TEB simulé et théorique en fonction de $\frac{E_b}{N_0}$

4.3 Deuxième chaîne à étudier

Pour cette deuxième chaîne il s’agira d’un mapping 4-aires à moyenne nulle, avec des filtres de mise en forme et de réception rectangulaires de durée T_s et de hauteur 1.

4.3.1 Chaîne sans bruit

Le mapping ayant changé des précédentes chaîne implémentées le diagramme de l'oeil est différent. Il est donc nécessaire de le retracer, cela dans le but de déterminer les nouveaux instants d'échantillonnage optimaux. La figure 23 en est la représentation et d'après cette figure l'instant d'échantillonnage optimal vaut 8. En effet, pour cette valeur il n'est possible d'obtenir que 4 symboles différents. Étant donné que nous avons un mapping 4-aires cette valeur est celle qui satisfait le critère de Nyquist.

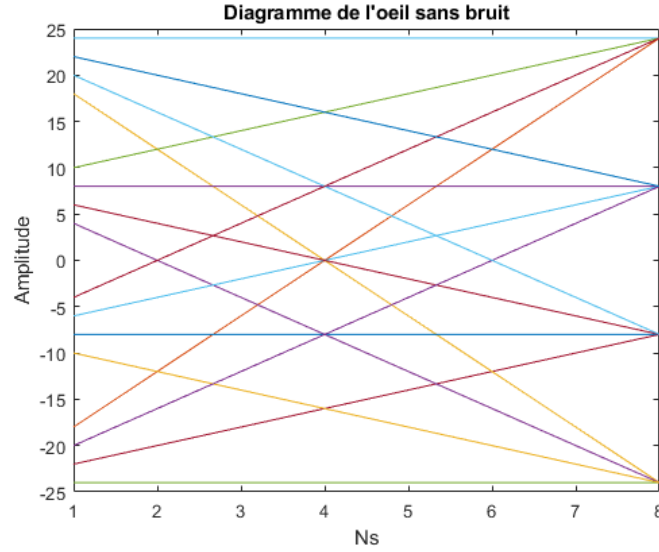


FIGURE 23 – Diagramme de l'oeil sans canal de propagation

En échantillonnant avec la valeur optimale déterminée grâce à la figure 23, le TEB est bien nul.

4.3.2 Chaîne avec bruit

Nous allons maintenant ajouter un bruit gaussien à cette chaîne de transmission. En théorie, nous sommes censés obtenir des résultats de la forme suivante :

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

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

On peut alors observer la différence entre ces TEB et TES théoriques et leur valeur simulée sur les figures 24 et 25.

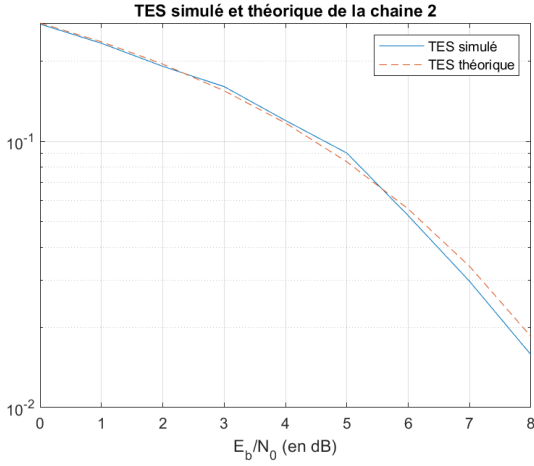


FIGURE 24 – TES simulé et théorique en fonction de $\frac{E_b}{N_0}$

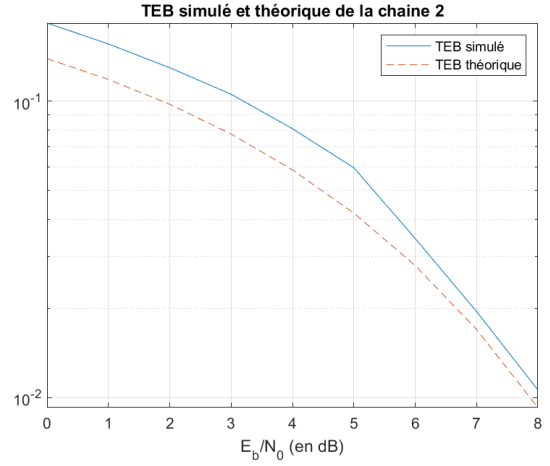


FIGURE 25 – TEB simulé et théorique en fonction de $\frac{E_b}{N_0}$

4.4 Comparaison efficacité

Maintenant que nous avons implanté les différentes chaînes de transmission nous pouvons les comparer.

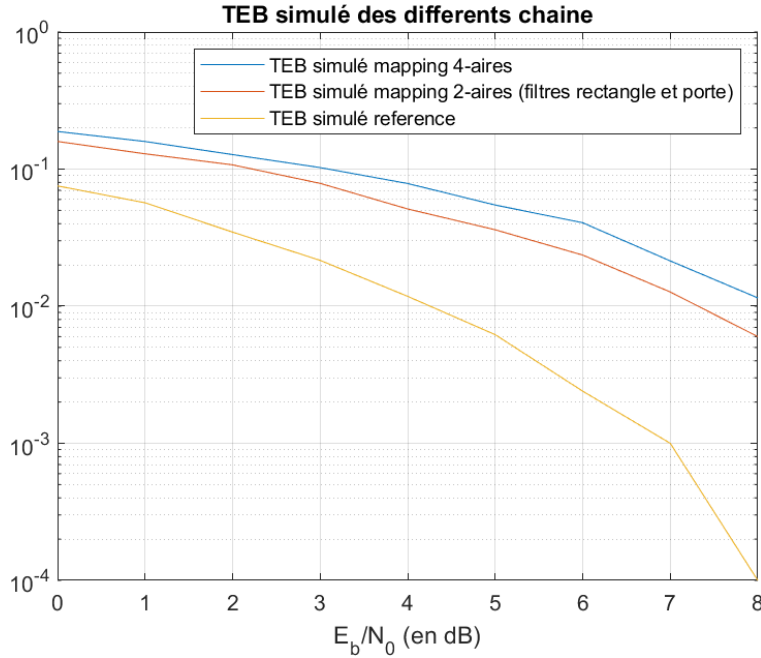


FIGURE 26 – TEB simulé et théorique en fonction de $\frac{E_b}{N_0}$

Premièrement, on peut observer que la chaîne de référence, conformément au résultat attendu (puisque sans canal), a un TEB en dessous des deux autres chaînes. Cependant, le TEB de la chaîne avec le mapping en 2-aires est moins élevé que celui de la chaîne avec le mapping en 4-aires, indiquant que cette dernière fait plus d'erreur de traduction symboles/bits ; ce résultat est cohérent puisque pour la chaîne en 4-aires, on réunit 2 bits sur le même symbole, réduisant le nombre de symboles à transmettre, mais en contrepartie augmentant le taux d'erreur.

5 Études de chaînes de transmission sur fréquence porteuse

Dans cette partie, nous allons nous intéresser à la transmissions sur fréquence porteuse. Pour cela, nous allons dans un premier temps implanter deux chaînes de transmissions avec la même modulation sur des chaînes différentes mais équivalentes. Puis, nous implanterons quatre modulateurs différents afin de les comparer et déterminer les facteurs qui influent sur la qualité des signaux transmis.

5.1 Utilisation de la chaîne passe-bas équivalente pour le calcul et l'estimation du taux d'erreur binaire

Pour la première implantation sur fréquence porteuse nous utiliserons une chaîne de transmission QPSK avec un mapping de Gray. Les chaînes de transmission équivalente sont représenté sur les figure 27 et 28.

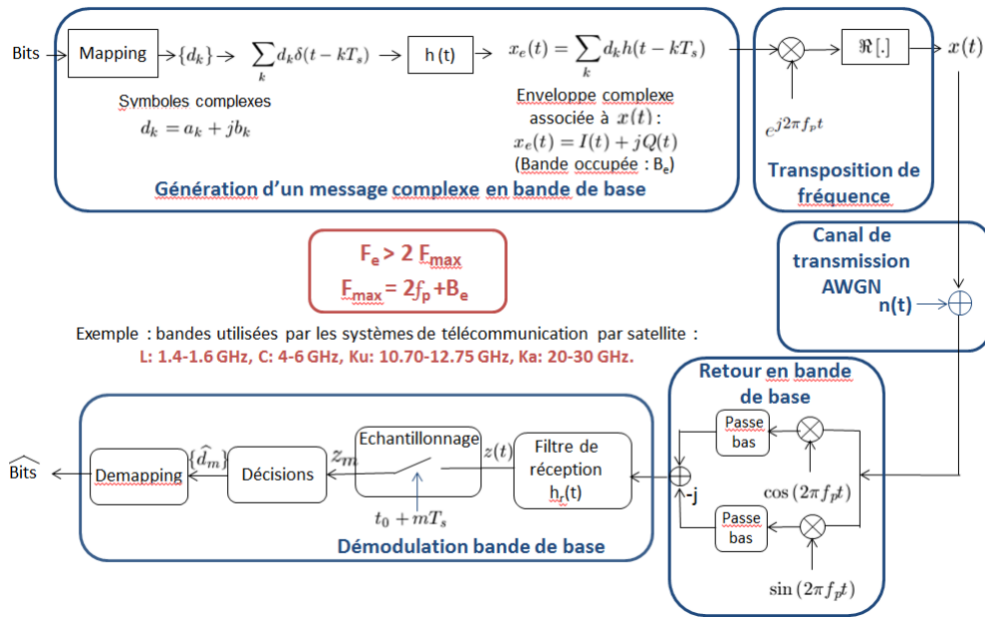


FIGURE 27 – Chaîne de transmission sur porteuse

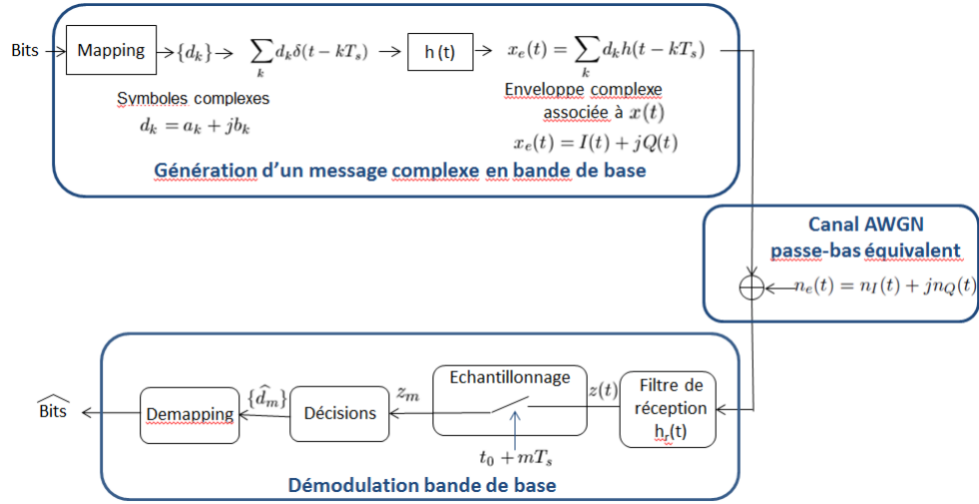


FIGURE 28 – Chaîne de transmission passe-bas équivalente

5.1.1 Implantation de la chaine sur fréquence porteuse

Pour la première chaine implanté nous allons nous appuyer sur la figure 27. Le signal aura un mapping de Gray. Les filtres de mise en forme et de réception seront des filtres en racine de cosinus surélevées avec comme roll-off $\alpha = 0.35$. Ce signal sera mis sur une fréquence porteuse $f_p = 2$ kHz. La figure 29 nous montre le signal après avoir été mis sur fréquence porteuse.

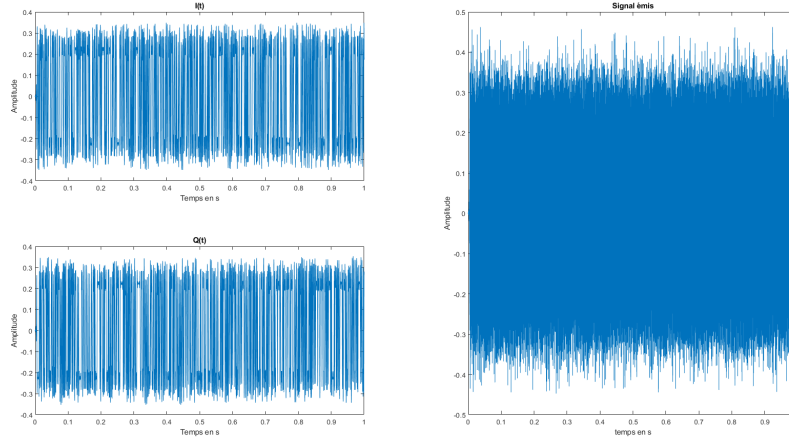


FIGURE 29 – Signal sur fréquence porteuse

Afin de vérifier que le signal soit bien sur la bonne fréquence nous allons nous intéresser a sa DSP, représenté sur la figure 30.

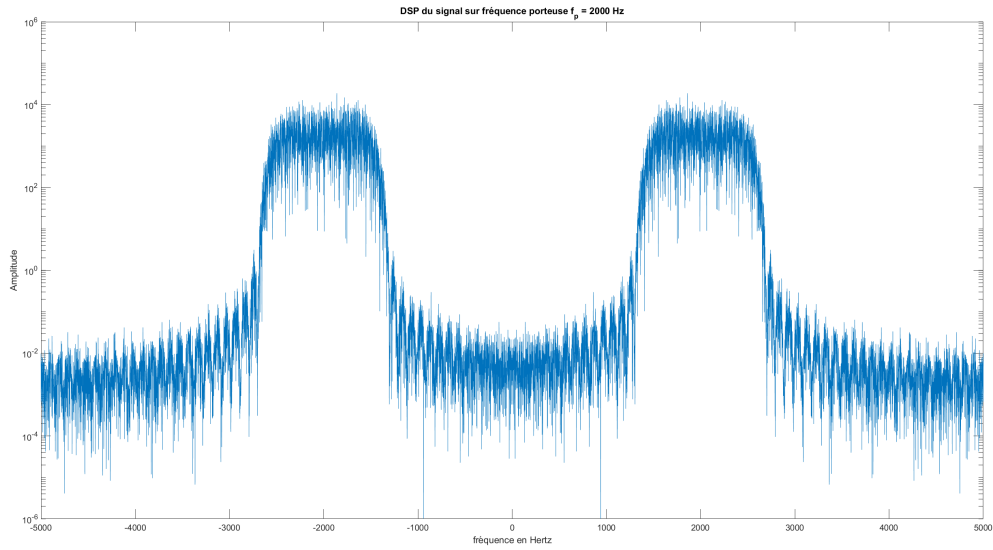


FIGURE 30 – DSP du signal sur fréquence porteuse

On observe effectivement 2 pics dont la fréquence correspond à la fréquence porteuse, ce qui correspond au résultat attendu.

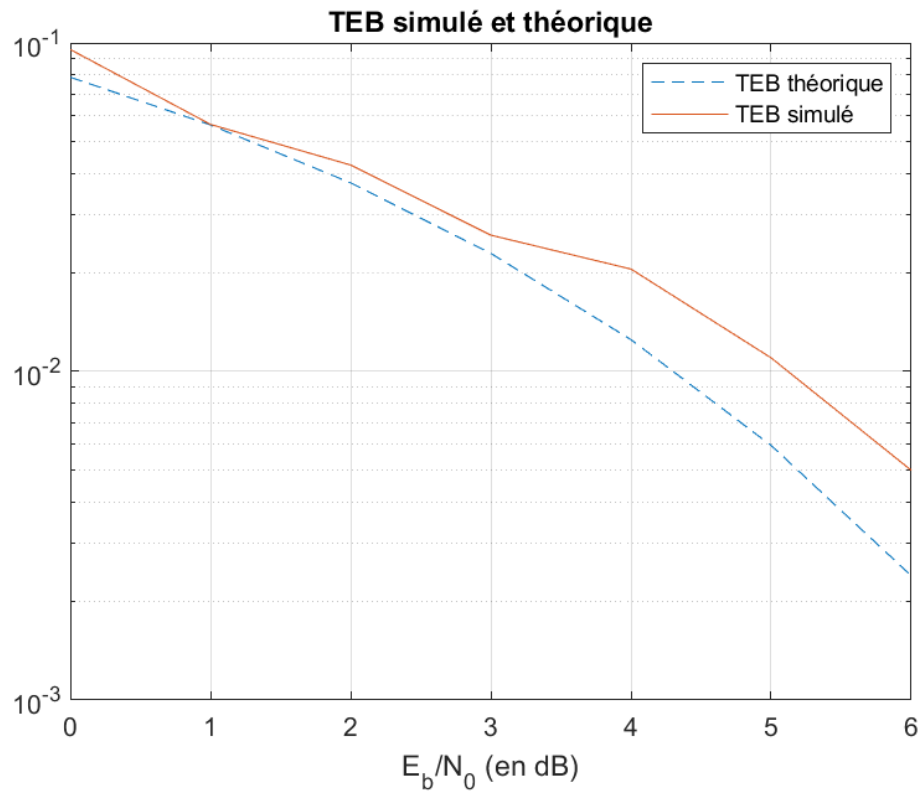


FIGURE 31 – TEB simulé et théorique en fonction de $\frac{E_b}{N_0}$

5.1.2 Implantation de la chaîne passe-bas équivalente

Nous allons maintenant modifier la chaîne précédente sur le modèle de la figure 28. Nous obtenons ainsi le signal transmis figure 32.

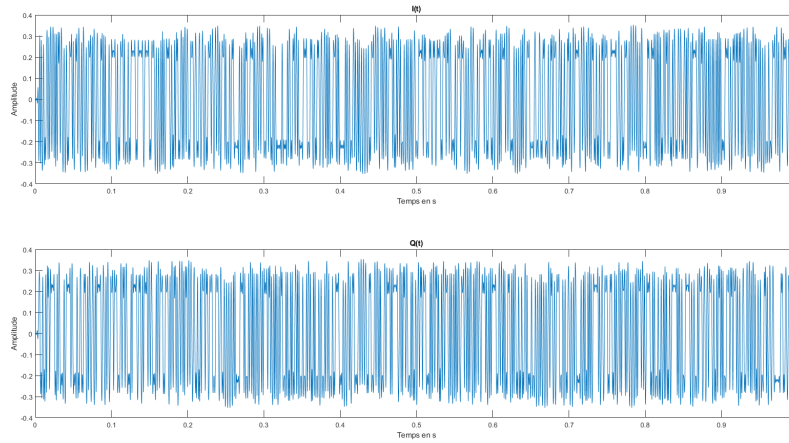


FIGURE 32 – Signal sur fréquence porteuse

Afin d’observer d’éventuelle changements nous traçons également la DSP du signal de la figure 32.

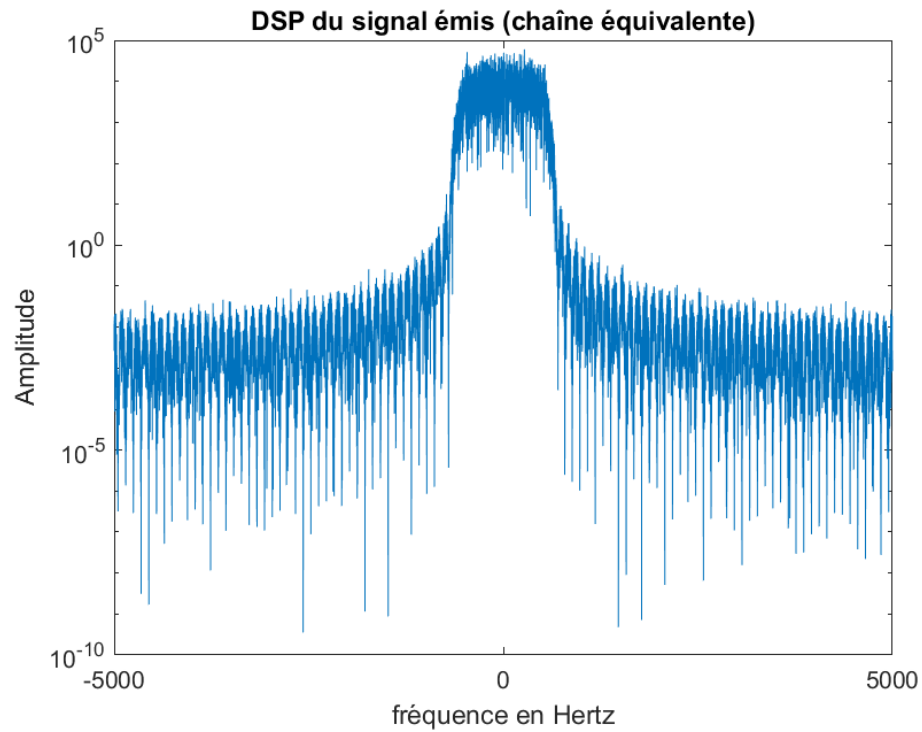


FIGURE 33 – DSP du signal sur fréquence porteuse

Cette DSP, contrairement à celle de la figure 30, n’est composé que d’un seul pic centré en 0. Cela est dû au fait que sur la seconde chaîne de transmission, on n’utilise l’exponentielle complexe

(qui provoque les deux pics de la première DSP). Ici, les parties transposition de fréquence, canal de transmission et retour en bande de base de la première chaîne sont réunis dans le passe-bas équivalent.

Maintenant que la chaîne est implantée sans bruit nous allons pouvoir la tester avec des valeurs de $\frac{E_b}{N_0}$ allant de 0 à 6 dB. En plus d'observer l'effet de la variation du bruit sur le signal nous allons également voir l'effet sur la constellation du mapping après échantillonnage.

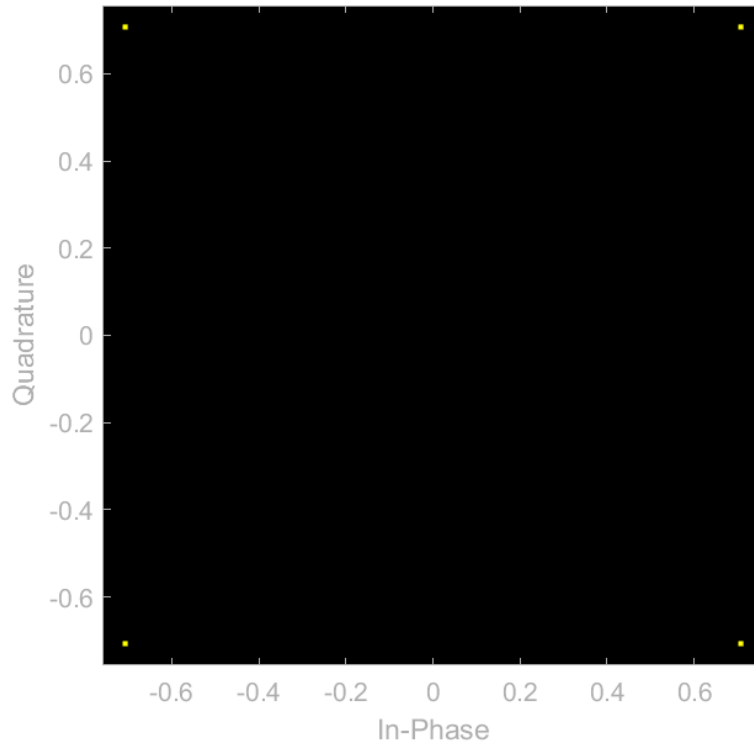


FIGURE 34 – Constellation chaîne de reference sortie de mapping

Sur la figure 34 on peut voir que la constellation est parfaite, il n'y a que 4 valeurs possible. Cette constellation est tracé en sortie de mapping.

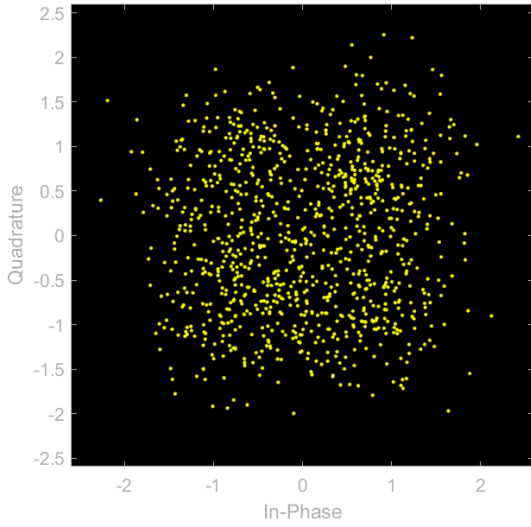


FIGURE 35 – Constellation chaîne de référence sortie d'échantillonneur $\frac{E_b}{n_0} = 0$ dB

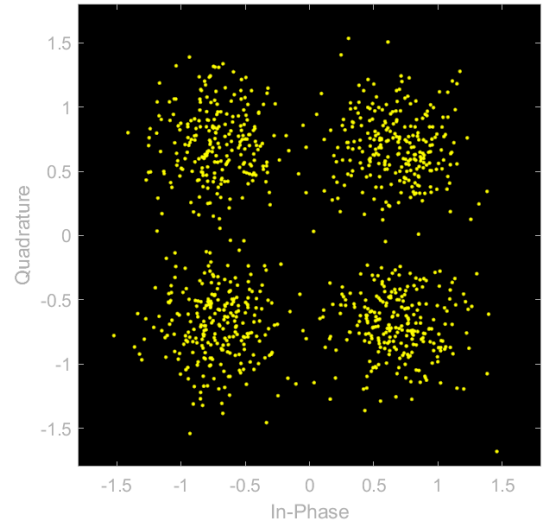


FIGURE 36 – Constellation chaîne de référence sortie d'échantillonneur $\frac{E_b}{n_0} = 6$ dB

Sur les figures 35 et 36 nous avons le tracé de la constellation pour deux valeurs de bruit. On observe que plus le rapport signal à bruit $\frac{E_b}{n_0}$ est élevé plus la constellation tend vers la constellation de la figure 34. On devrait donc par la suite observer un TEB décroissant.

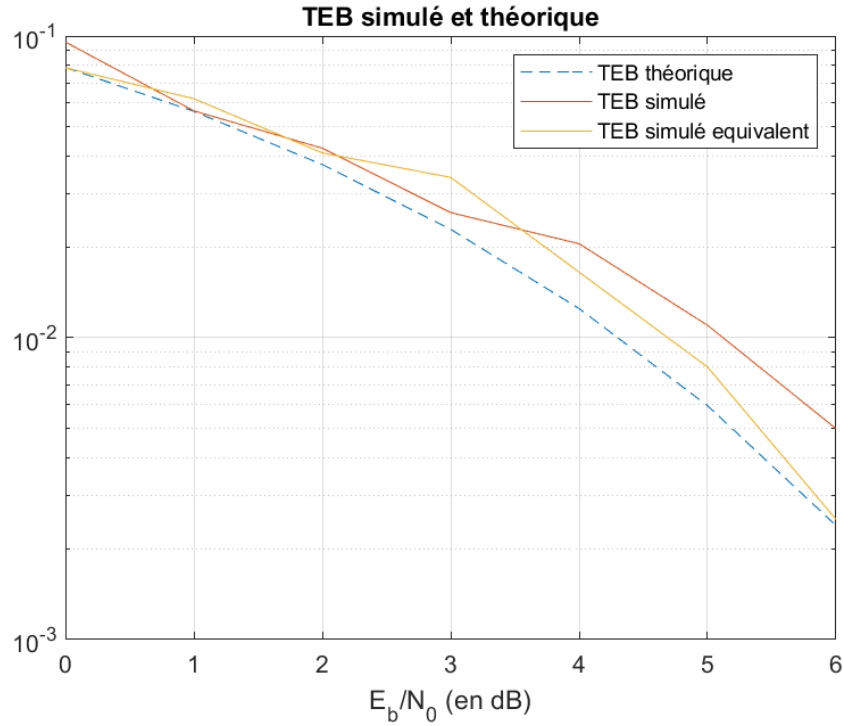


FIGURE 37 – Comparaison TEB de la chaîne équivalente et la chaîne sur fréquence porteuse

On peut voir sur la figure 37 que le TEB de la chaîne sur fréquence porteuse et la chaîne équivalente ont un TEB qui suivent la même courbe. Cependant, on remarque quelques écarts entre ces deux courbes, cela est dû au retour en bande base du signal sur fréquence porteuse.

En effet, le filtre de réception de la chaîne figure 27 fait office de passe-bas mais il ne coupe pas parfaitement il y a donc des résidus dû à cela.

5.2 Comparaison de modulations sur fréquence porteuse

Nous avons étudié précédemment les deux chaînes en fréquence porteuse, on va maintenant pouvoir étudier différents types de mapping. Ainsi, nous allons pouvoir les comparer et les classer en termes d'efficacité en puissance. Pour chacune des chaînes nous allons avoir un filtre de mise en forme et de réception en racine de cosinus surélevée avec un roll-off $\alpha = 0.5$. De plus, le débit binaire sera de 48 kbps. En implantant ces chaînes sans bruit nous obtenons bien un TEB nul.

5.2.1 Modulation 4-ASK

La constellation avec la modulation 4-ASK en sortie du mapping est tracée figure 38. De plus, sur les figures 39 et 40 nous pouvons observer cette constellation pour une valeur de $\frac{E_b}{n_0} = 0$ dB, respectivement $\frac{E_b}{n_0} = 6$ dB. On peut notamment observer que plus cette valeur est élevée plus les constellations se rapprochent de celle en sortie de mappeur.

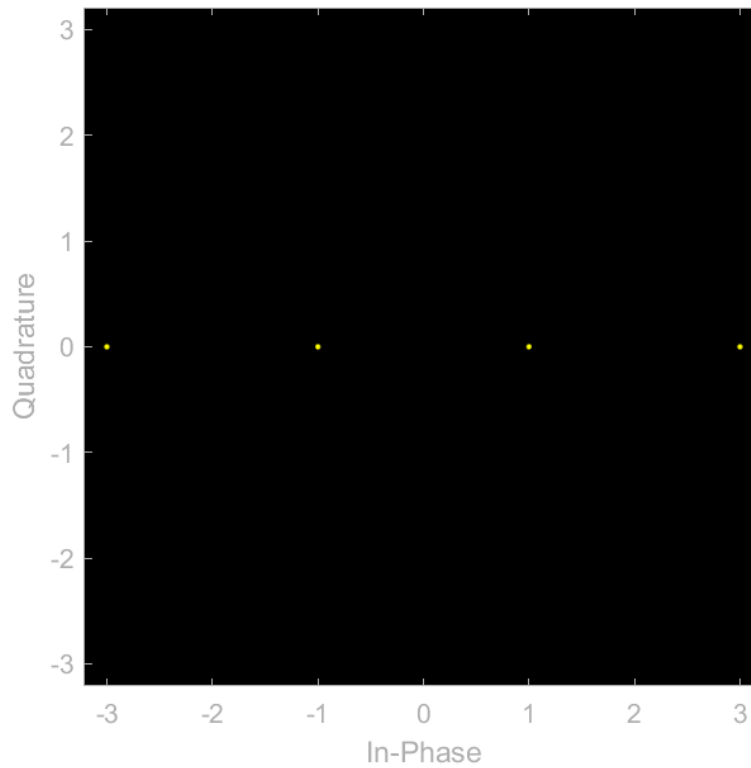


FIGURE 38 – Comparaison TEB de la chaîne équivalente et la chaîne sur fréquence porteuse (4-ASK)

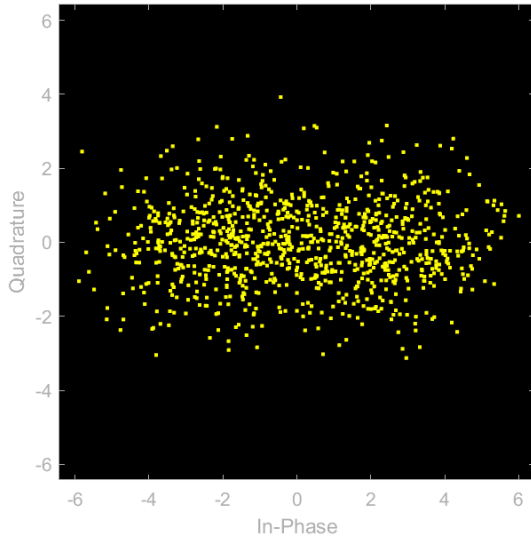


FIGURE 39 – Constellation chaîne de référence sortie d'échantillonneur $\frac{E_b}{n_0} = 0$ dB (4-ASK)

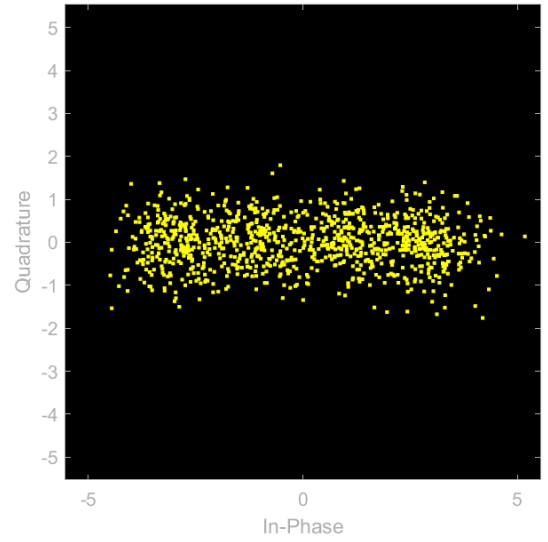


FIGURE 40 – Constellation chaîne de référence sortie d'échantillonneur $\frac{E_b}{n_0} = 6$ dB (4-ASK)

Le TEB théorique de ce modulateur est donné par la formule $TEB = \frac{3}{4}Q(\sqrt{\frac{4}{5}\frac{E_b}{N_0}})$

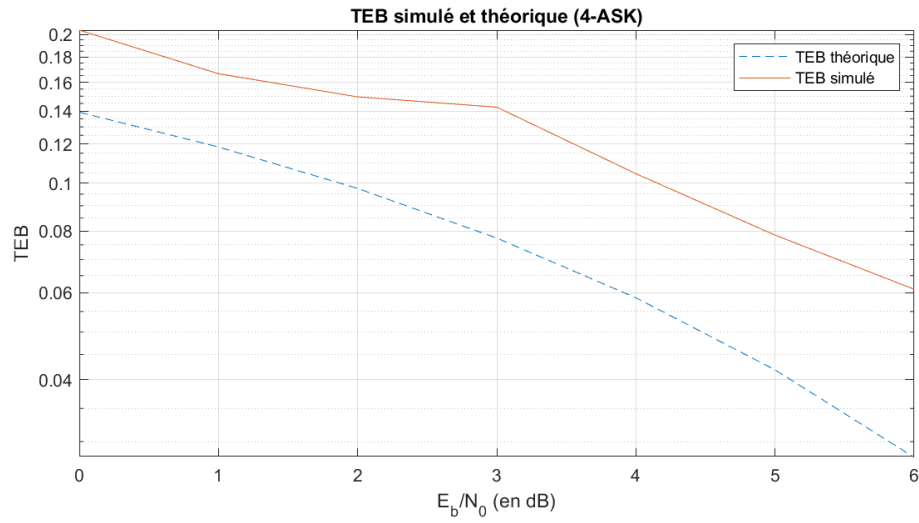


FIGURE 41 – TEB simulé et théorique modulateur 4-ASK

5.2.2 Modulation QPSK

Les observations faites dans la section de la modulation 4-ASK restent vraies pour la modulation QPSK.

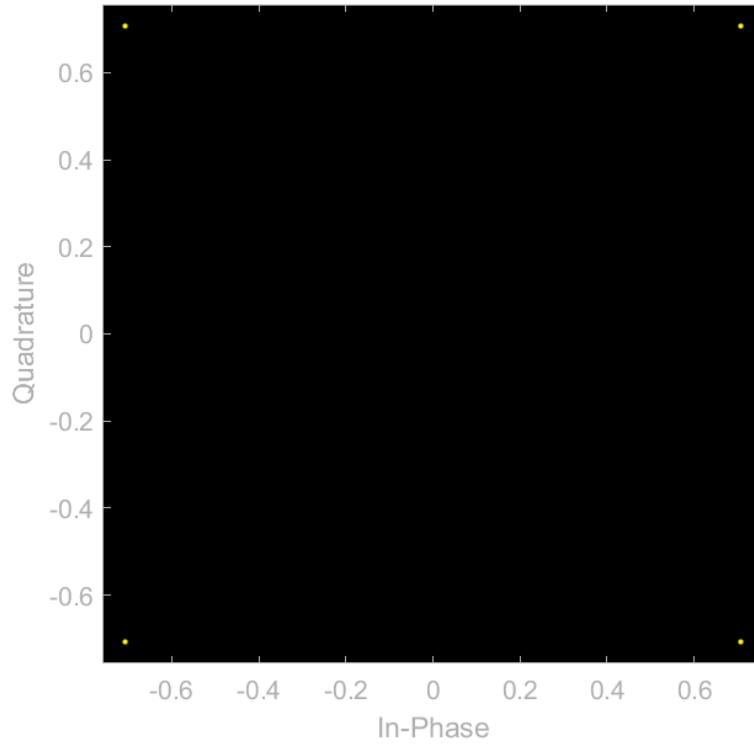


FIGURE 42 – Comparaison TEB de la chaine équivalente et la chaine sur fréquence porteuse (QPSK)

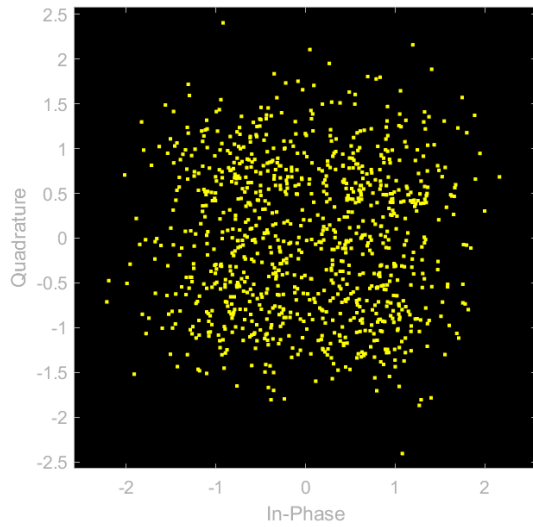


FIGURE 43 – Constellation chaine de référence sortie d'échantillonneur $\frac{E_b}{n_0} = 0$ dB (QPSK)

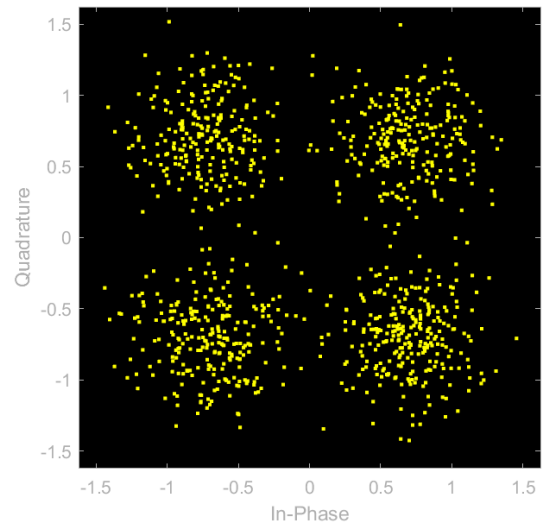


FIGURE 44 – Constellation chaine de référence sortie d'échantillonneur $\frac{E_b}{n_0} = 6$ dB (QPSK)

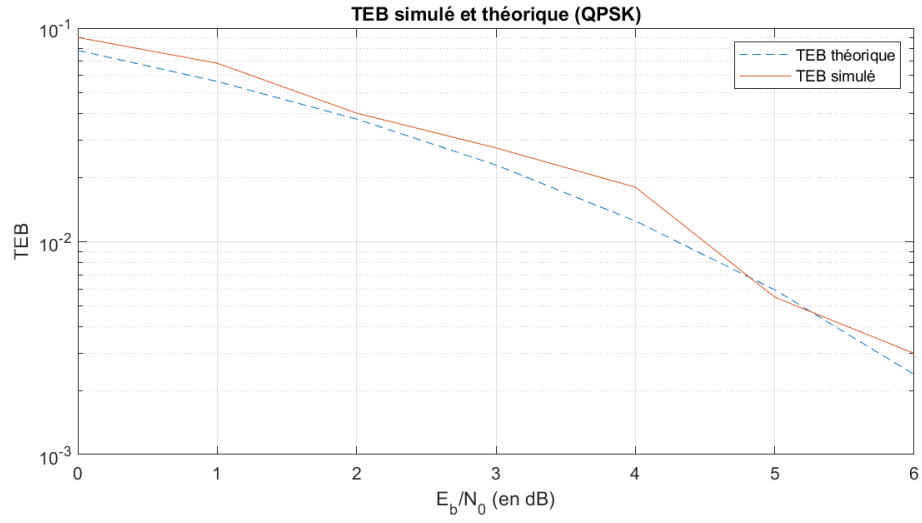


FIGURE 45 – TEB simulé et théorique modulateur QPSK

5.2.3 Modulation 8-PSK

Les observations faites dans la section de la modulation 4-ASK restent vraies pour la modulation 8-PSK.

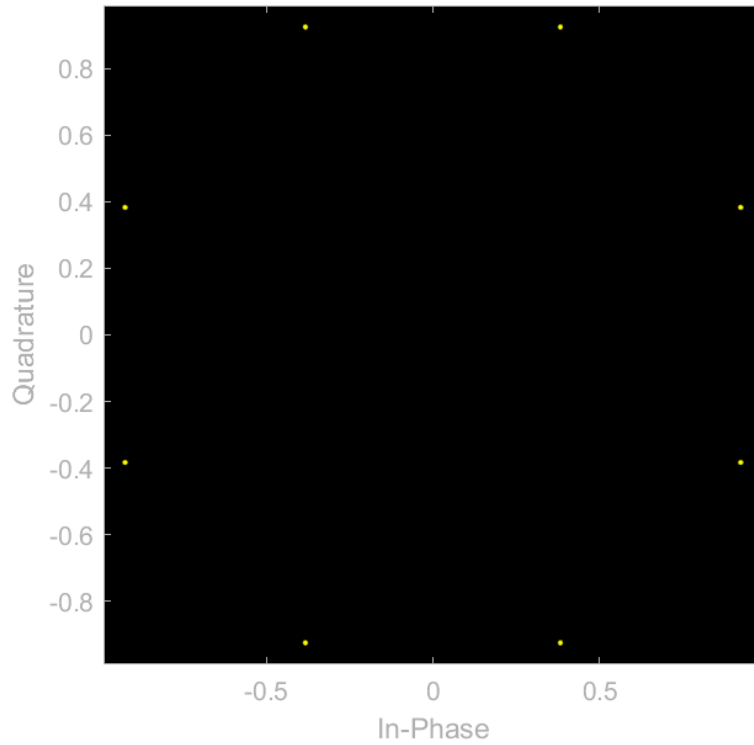


FIGURE 46 – Comparaison TEB de la chaîne équivalente et la chaîne sur fréquence porteuse (8-PSK)

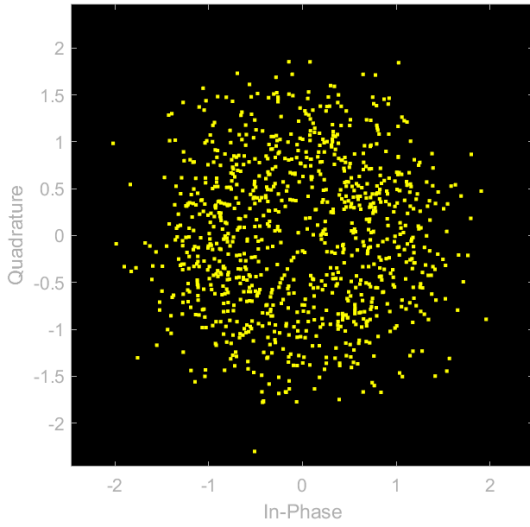


FIGURE 47 – Constellation chaîne de référence sortie d'échantillonneur $\frac{E_b}{n_0} = 0$ dB (8-PSK)

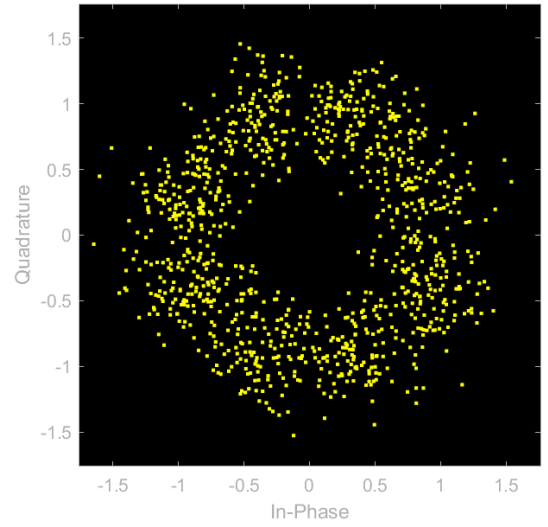


FIGURE 48 – Constellation chaîne de référence sortie d'échantillonneur $\frac{E_b}{n_0} = 6$ dB (8-PSK)

Le TEB théorique de ce modulateur est donné par la formule $TEB = \frac{2}{3}Q(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0}} \sin(\frac{\pi}{8}))$

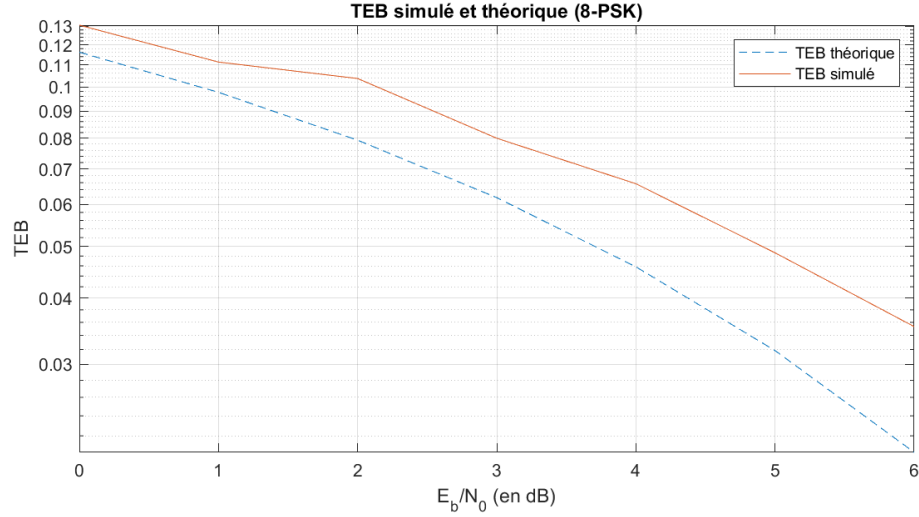


FIGURE 49 – TEB simulé et théorique modulateur 8-PSK

5.2.4 Modulation 16-QAM

Les observations faites dans la section de la modulation 4-ASK restent vraies pour la modulation 16-QAM.

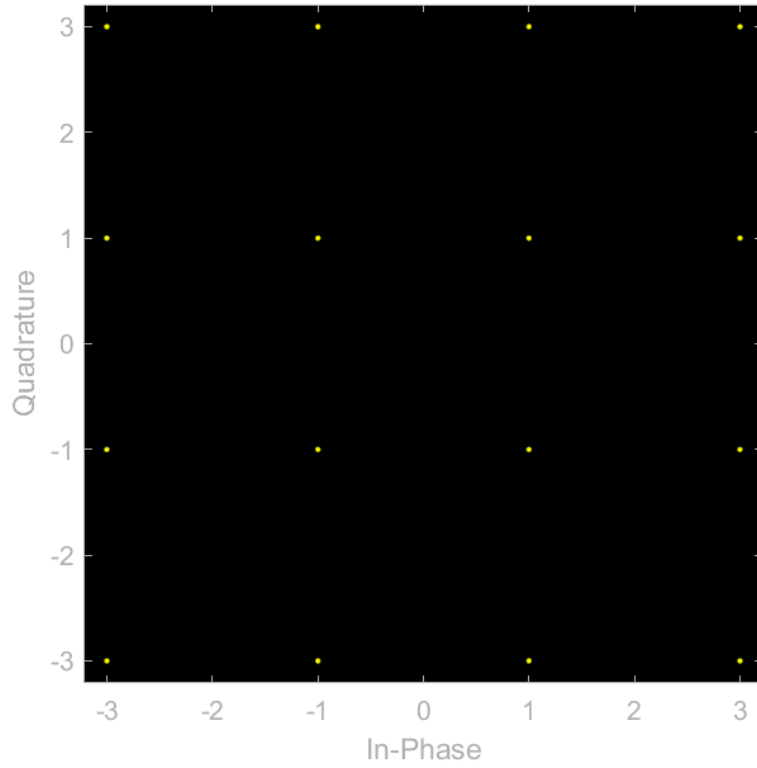


FIGURE 50 – Comparaison TEB de la chaine équivalente et la chaine sur fréquence porteuse (16-QAM)

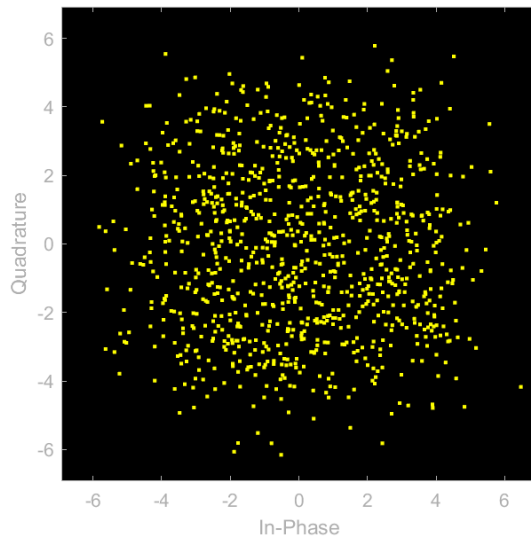


FIGURE 51 – Constellation chaine de référence sortie d'échantillonneur $\frac{E_b}{n_0} = 0$ dB (16-QAM)

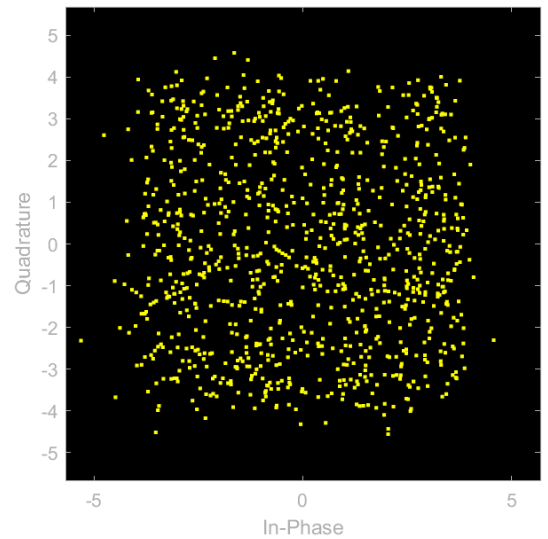


FIGURE 52 – Constellation chaine de référence sortie d'échantillonneur $\frac{E_b}{n_0} = 6$ dB (16-QAM)

Le TEB théorique de ce modulateur est donné par la formule $TEB = \frac{3}{4}Q(\sqrt{\frac{4}{5}\frac{E_b}{N_0}})$

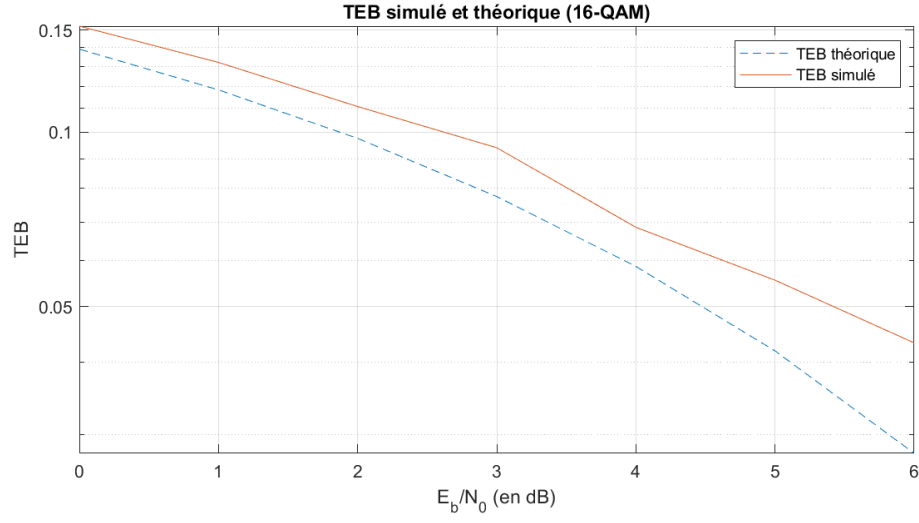


FIGURE 53 – TEB simulé et théorique modulateur 16-QAM

5.2.5 Comparaison des chaines de transmission

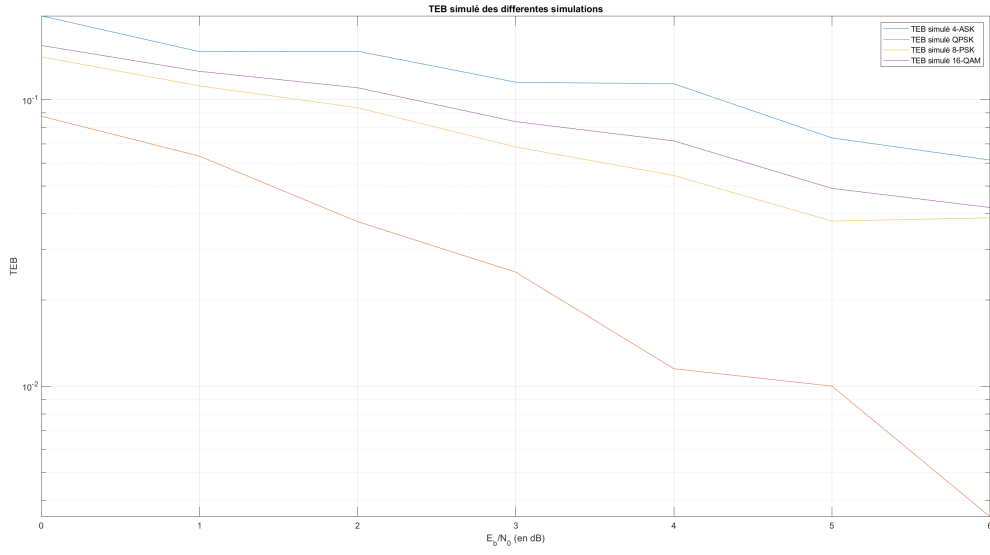


FIGURE 54 – Comparaison du TEB des différents modulateurs

efficacité en puissance :

$$\eta = \frac{1}{T_b} \cdot \log_2(M)$$