



Rapport de projet : Télécommunications - Étude de transmissions en bande de base

Emile Devos
Paul Croizet

*Département Sciences du Numérique - Première année
2022-2023*

Table des matières

1	Introduction	3
2	Étude de modulateurs bande de base	3
2.1	Premier modulateur	4
2.2	Second modulateur	5
2.3	Troisième modulateur	7
2.4	Comparaison des modulateurs	8
3	Étude des interférences entre symbole et du critère de Nyquist	9
3.1	Étude sans canal de propagation	9
3.2	Étude avec canal de propagation sans bruit	11
4	Étude de l'impact du bruit et du filtrage adapté, notion d'efficacité en puissance	13
4.1	Étude de chaque chaîne de transmission	14
4.1.1	1ère chaîne de transmission	14
4.1.2	2nd chaîne de transmission	16
4.1.3	3ème chaîne de transmission	19
4.2	Comparaison des chaînes de transmission implantées	21
4.2.1	Comparaison des chaînes 1 et 2	21
4.2.2	Comparaison des chaînes 1 et 3	22
5	Conclusion	23
5.1	Conclusion du projet	23
5.2	Bilan de Émile	23
5.3	Bilan de Paul	23

Table des figures

1	Schéma du modulateur 1	5
2	Schéma du modulateur 2	6
3	Schéma du modulateur 3	7
4	Comparaison des 3 modulateurs	8
5	Chaîne de transmission sans canal de propagation : réponse impulsionnelle globale	10
6	Chaîne de transmission sans canal de propagation : diagramme de l'oeil	10
7	Chaîne de transmission avec canal de propagation : réponses en fréquence	12
8	Chaîne de transmission avec canal de propagation : diagramme de l'oeil	12
9	Chaîne de transmission avec canal de propagation : réponse impulsionnelle globale	13
10	Chaîne 1 : Diagramme de l'oeil	15

TABLE DES FIGURES

11	Chaîne 1 : Diagramme de l’oeil pour différentes valeurs de $\frac{E_b}{N_0}$. .	15
12	Chaîne 1 : Comparaison du TEB calculé et du TEB théorique . .	16
13	Chaîne 2 : Diagramme de l’oeil	17
14	Chaîne 2 : Diagramme de l’oeil pour différentes valeurs de $\frac{E_b}{N_0}$. .	17
15	Chaîne 2 : Comparaison du TEB calculé et du TEB théorique . .	18
16	Chaîne 3 : Diagramme de l’oeil	19
17	Chaîne 3 : Diagramme de l’oeil pour différentes valeurs de $\frac{E_b}{N_0}$. .	20
18	Chaîne 3 : Comparaison du TEB calculé et du TEB théorique . .	20
19	Comparaison TEB chaînes 1 et 2	21
20	Comparaison TEB chaînes 1 et 3	22

1 Introduction

Dans cette première partie, nous avons étudié plusieurs chaînes de transmission en bande de base. En effet, nous sommes partis d'un modulateur, auquel, à chaque étape nous avons rajouté différentes parties d'une chaîne de transmission pour au final en avoir une complète. Que cela soit en simulant le canal de propagation à l'aide de bruit ou d'un filtre, ou encore en simulant le filtre de réception ainsi que la prise de décision sur les symboles, nous avons pu comprendre chaque objectifs des différents éléments qui composent une chaîne de transmission.

À chaque étape, nous avons pu évaluer l'efficacité, qu'elle soit spectrale ou en puissance, pour voir si ce que nous faisons été correcte. Évaluer les solutions possibles pour optimiser notre simulation en termes d'efficacité (spectrale et en puissance). Et pour finir, nous avons comparé 3 chaînes de transmission entre elles et nous avons pu identifier les facteurs clé qui jouent sur l'efficacité de ces dernières.

2 Étude de modulateurs bande de base

Le premier travail que nous avons eu à effectuer été d'implémenter 3 modulateurs bande de base différents. Voici les valeurs génériques que nous avons utilisées pour les 3 modulateurs :

- La fréquence d'échantillonnage $F_e = 24000Hz$ et la période d'échantillonnage $T_e = \frac{1}{F_e}$
- Le débit binaire $R_b = \frac{1}{T_b} = 3000$ bits par seconde ainsi que $T_b = \frac{1}{R_b}$
- Le facteur de sur-échantillonnage N_s , il correspond à $N_s = \frac{T_b}{T_e}$. Or dans notre cas, nous avons $T_s = T_b$, donc $N_s = \frac{T_b}{T_e}$.
- La période de sur-échantillonnage T_s qui sera aussi à déterminer pour chaque modulateur.

Pour implémenter nos 3 modulateurs, nous avons procédé de la manière suivante :

- Génération d'un échantillon binaire (la taille de notre échantillon binaire varie entre ces 3 valeurs : 100, 1 000 et 10 000)
- Création du mapping adapté au modulateur
- Le sur-échantillonnage du signal, cette étape permet de créer les symboles.
- La création de notre filtre du modulateur, qui dépend du modulateur à implémenter
- Le filtrage du signal, dans cette étape on met notre signal sur-échantillonné dans notre filtre précédemment créé
- Puis pour finir, on calcule la DSP associé à notre signal et on la compare à la DSP théorique

2.1 Premier modulateur

Pour le premier modulateur, voici les caractéristiques que nous avons utilisées :

- Mapping : Pour ce modulateur, nous avons utilisé un mapping à symboles binaires à moyenne nulle. Voici le tableau correspondant :

bits	symbole
0	-1
1	1

- Filtre de mise en forme : est rectangulaire de hauteur 1 et de durée égale à la durée d'un symbole T_s .

Ensuite, nous avons dû calculer la DSP théorique du signal généré pour pouvoir la comparer à notre DSP calculée. En partant des formules de cours :

$$S_x(f) = \frac{\sigma_a^2}{T_s} |H(f)|^2 + 2 \frac{\sigma_a^2}{T_s} |H(f)|^2 \sum_{k=1}^{\infty} \Re [R_a(k) e^{j2\pi f k T_s}]$$

$$+ \frac{|m_a|^2}{T_s^2} \sum_k \left| H\left(\frac{k}{T_s}\right) \right|^2 \delta\left(f - \frac{k}{T_s}\right)$$

Or le filtre est à moyenne nul et les symboles a_k sont indépendants. On a alors les deux derniers termes qui s'annulent, la formule devient alors :

$$S_x(f) = \frac{\sigma_a^2}{T_s} |H(f)|^2$$

Ici h est le filtre de mise en forme, et H est sa transformée de Fourier. Or, ce filtre est rectangulaire, de durée T_s et de hauteur 1. la transformée de ceci est donc une fonction sinus cardinal, ainsi, on a :

$$S_x(f) = \frac{\sigma_a^2}{T_s} T_s^2 \text{sinc}(\pi f T_s)^2 = T_s \text{sinc}(\pi f T_s)^2$$

Voici les différents tracés que nous avons obtenus pour le premier modulateur :

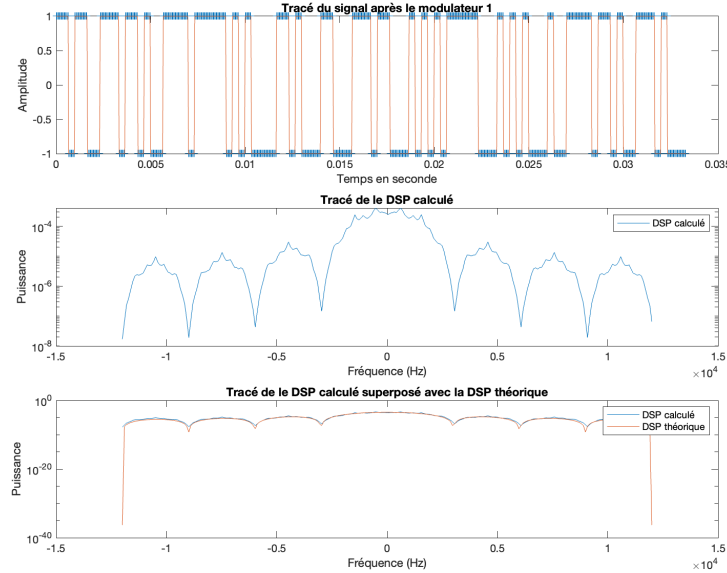


FIGURE 1 – Ces figures ont été obtenues avec le modulateur 1 pour un échantillon de 100 bits.

Nous pouvons voir que la DSP théorique et la DSP calculée se superposent, on peut donc en conclure que notre premier modulateur fonctionne correctement. De plus, sur le premier tracé, on voit que le signal est codé avec les symboles du mapping (ie -1 et 1).

2.2 Second modulateur

Le second modulateur que nous avons implémenté est un modulateur 4-aires à moyenne nulle. Voici ces différentes caractéristiques :

- Mapping : il est effectué en regroupant les éléments du signal binaire par 2, puis après les avoir converties en valeur décimal, on utilise un tableau afin d'associer les 4 couples de valeurs binaires différentes (01, 00, 10, 11) au valeur 1, -1, -3, 3 comme le tableau suivant :

bits	symbole
00	3
01	1
10	-1
11	-3

- Filtre de mise en forme : rectangulaire de hauteur 1 et de durée égale à la durée symbole T_s .

Nous devons également pour ce modulateur calculer la DSP du signal modulé. On va procéder de la même façon que pour le premier modulateur. On se sert de la même formule afin de calculer la DSP, et les mêmes termes s'annulent car la moyenne est nulle et les a_k sont indépendants. La formule est donc directement :

$$S_x(f) = \frac{\sigma_a^2}{T_s} |H(f)|^2$$

Il nous faut maintenant calculer la variance σ_a^2 . Cette variance vaut 5 avec les valeurs choisies. Le filtre de mise en forme est identique à celui du modulateur 1. La DSP vaut donc :

$$S_x(f) = 5T_s \text{sinc}(\pi f T_s)^2$$

Nous avons obtenu pour le modulateur les figures suivantes :

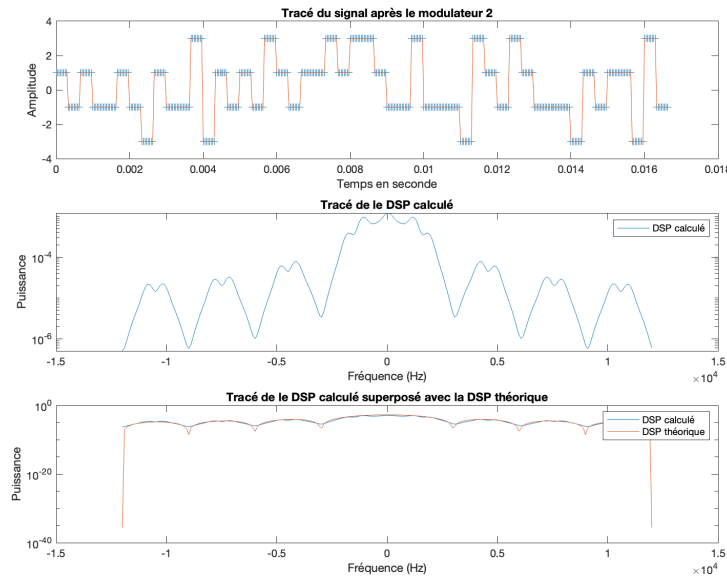


FIGURE 2 – Ces figures ont été obtenues avec le modulateur 2 pour un échantillon de 100 bits

Comme pour le modulateur 1, nous pouvons voir que la DSP théorique et la DSP calculée se superposent, ce qui justifie la bonne implantation de notre deuxième modulateur. Nous pouvons aussi voir les différents symboles qui codent notre échantillon binaire sur le tracé 1 (-3, -1, 1 et 3).

2.3 Troisième modulateur

Pour le dernier modulateur, voici les caractéristiques associées :

- Mapping : C'est le même que pour le premier modulateur, c'est un mapping à symboles binaires à moyenne nulle. Voici le tableau correspondant :

bits	symbole
0	-1
1	1

- Filtre de mise en forme : Particularité sur le filtre de mise en forme ici, c'est la fonction cosinus surélevé, qui peut être appelée par la fonction $rcosdesign(\alpha, L, N_s)$ de Matlab.

Nous avons également du tracer la DSP correspondant à ce filtre. La formule de cette DSP était donnée dans le sujet :

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

Voici les figures que nous avons obtenues pour le modulateur 3 :

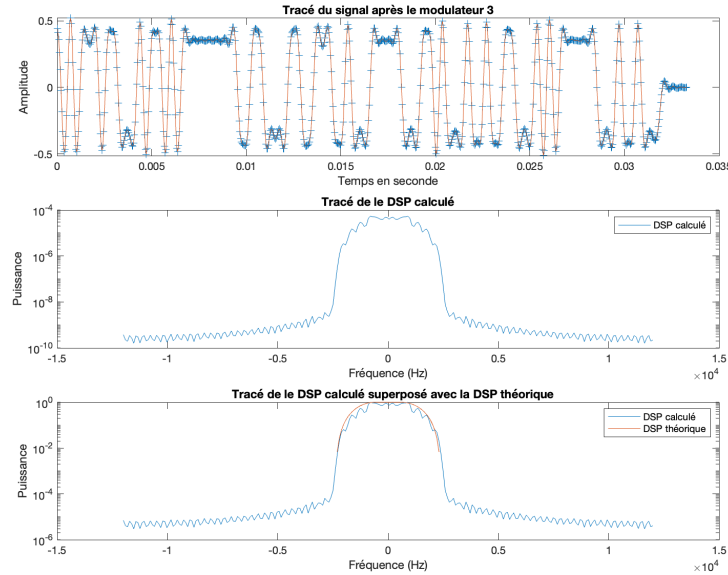


FIGURE 3 – Ces figures ont été obtenues avec le modulateur 3 pour un échantillon de 100 bits

Nous pouvons aussi voir que la DSP théorique et la DSP calculée se superposent, nous pouvons donc en conclure que notre troisième modulateur est juste.

Ici, nous avons normalisé nos deux DSP car un facteur apparaissait durant nos calculs.

2.4 Comparaison des modulateurs

Maintenant que nous avons implémenté nos trois modulateurs, nous allons les comparer en terme d'efficacité spectrale. Elle se définit comme :

$$\eta = \frac{R_b}{B}$$

Avec R_b le débit binaire et B la bande passante.

Nous voyons donc que pour que l'efficacité spectrale soit grande pour une même valeur de débit binaire, la bande passante doit être la plus faible possible. Or le lobe central comporte de 95% à 99% de l'information.

Le meilleur modulateur sera donc celui qui aura le lobe central le plus faible. Voici le tracé faisant apparaître les DSP de nos 3 modulateurs superposées :

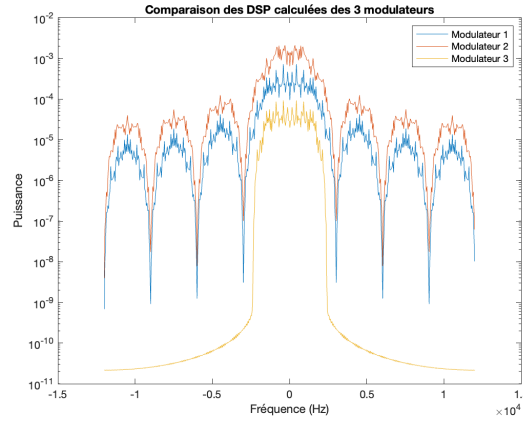


FIGURE 4 – Nous pouvons voir sur cette figure les DSP des 3 modulateurs superposées pour un échantillon binaire de taille égale à 1000. En rouge nous avons la DSP du modulateur 2, en bleu celle du modulateur 1 et en jaune celle du modulateur 3

Pour le modulateur 1, on voit sur la figure 4 que la bande passante est entre -3000Hz et +3000Hz, donc $B = 6000\text{Hz}$.

Sur cette figure où les 3 DSP sont tracées, on voit que le modulateur 2 a également une bande de 6000Hz.

Cependant, le modulateur 3 semble être le plus performant. En effet, le lobe principal va de -2500Hz à +2500Hz. Ce qui en fait donc la bande passante la plus faible, et donc le meilleur modulateur en terme d'efficacité spectrale

3 Étude des interférences entre symbole et du critère de Nyquist

La seconde étape a été d'implanter une chaîne de transmission en bande de base sans bruit. Le but était d'analyser les interférences entre les différents symboles en regardant notamment leur impact sur la transmission et l'influence du respect ou non du critère de Nyquist. Nous avons donc implanté deux chaînes de transmission : une sans canal de propagation et l'autre avec le canal.

3.1 Étude sans canal de propagation

Dans cette partie, nous ne simulerons pas le canal de transmission. Nous rajoutons donc simplement à nos modulateurs, un démodulateur un filtre de réception ainsi que la partie détection. Enfin, nous comparons nos symboles transmis avec le signal que nous avons récupéré et nous calculons le Taux d'Erreur Binaire (TEB) pour regarder l'efficacité de notre chaîne.

La transmission du signal entraîne des interférences entre les différents symboles. Pour éviter ce problème est pouvoir récupérer en sortie du démodulateur le signal initial, nous allons chercher le n_0 optimal qui respecte le critère de Nyquist. Ce critère est le suivant :

$$\begin{cases} g(n_0) \neq 0 \\ g(n_0 + mN_s) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Pour trouver ce n_0 optimal, on peut procéder de 2 façons différentes. La première façon utilise le tracé du graphe de g qui nous permettra de trouver un instant initiale d'échantillonnage qui respecte le critère de Nyquist. La seconde méthode se sert du diagramme de l'oeil où nous allons chercher en qu'elle instant nous n'avons pas d'interférences entre symboles.

3 ÉTUDE DES INTERFÉRENCES ENTRE SYMBOLE ET DU CRITÈRE DE NYQUIST

Voici le tracé de g qui est la convolution entre le filtre de mise en forme et le filtre de réception :

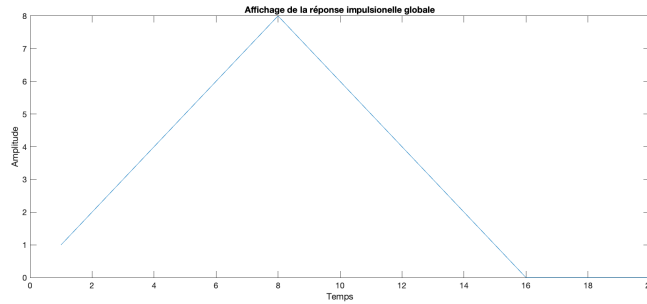


FIGURE 5 – Voici un tracé de la réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission avec 1000 bits comme échantillon

Sur le tracé de g , on peut voir que $g(8) \neq 0$, la première condition est donc respectée. On a également $g(8 + mN_s) = 0$. Donc $n_0 = 8$ est l'instant optimal d'échantillonnage.

Avec le diagramme de l'oeil :

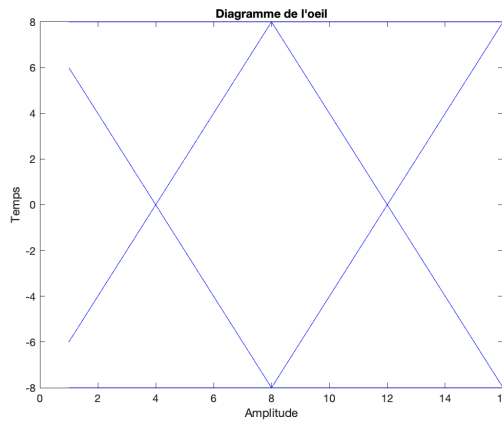


FIGURE 6 – Voici un tracé du diagramme de l'oeil de la chaîne de transmission sans canal de propagation. Ici l'échantillon binaire utilisé est de taille 1000

Le diagramme de l'oeil permet de trouver l'instant n_0 optimal. L'idée est de trouver en quel point on ne peut avoir que deux valeurs possibles pour g . On voit que sur le tracé du diagramme de l'oeil (figure 6), on a seulement deux valeurs possibles à l'instant $n_0 = 8$, ce qui nous montre que c'est l'instant optimal pour

l'échantillonnage, ce qui est bien en accord avec ce que nous avons démontré plus haut.

Après avoir trouvé l'instant n_0 optimal, nous avons procédé à l'échantillonnage de notre signal. Nous avons pris une valeur du signal en sortie du filtre de réception tout les $n_0 + mN_s$ temps. Une fois cette échantillonnage effectué, on a autant de valeurs que de bits transmis initialement. La dernière étape est la prise de décision : elle sert à retrouver le signal que l'on cherche à émettre. Nous avons procédé de la manière suivante : on regarde les éléments un par un et nous regardions le signe de l'élément. Si il était positif, alors on renvoyait un 1, sinon on renvoyait un 0. Pour retrouver les signaux émis, on regarde pour chaque élément si il est positif ou négatif. Pour finir, on compare notre signal à la fin de notre chaîne et au début pour avoir le TEB (qui ici était nul).

On va maintenant modifier l'instant initial d'échantillonnage en prenant $n_0 = 3$. On voit que dans ce cas là, on a 4 valeurs possibles dû aux interférences entre symboles. Le taux d'erreur binaire sera donc plus élevé. En effet, si le taux d'erreur binaire pour $n_0 = 8$ était nul, on trouve en prenant $n_0 = 3$, des valeurs proches de 0.5. Ce qui nous confirme bien que le choix de $N_0 = 8$ est cohérent.

3.2 Étude avec canal de propagation sans bruit

Dans cette partie, nous avons repris le travail précédent auquel nous y avons rajouté un canal.

Le canal est modélisé par une porte fréquentielle de largeur BW . Nous allons étudier ce canal pour des valeurs de BW différentes : 1000 Hz et 8000 Hz.

Dans le cadre d'un canal AWNG, pour continuer à respecter le critère de Nyquist, on doit avoir $R_s < \frac{BW}{k}$. Dans notre cas, comme nous sommes dans le cadre d'un bande de Nyquist, la condition devient : $R_s < 2BW$. Or ici $R_s = 3000$, Donc pour $BW = 8000$, la condition sera bien respectée car $3000 < 16000$. Mais dans le cas où $BW = 1000$, on aura $3000 > 2000$ et donc le critère de Nyquist ne sera pas respecté. On s'attend donc à avoir un problème pour $BW = 1000Hz$, et un traitement normal pour $BW = 8000Hz$.

3 ÉTUDE DES INTERFÉRENCES ENTRE SYMBOLE ET DU CRITÈRE DE NYQUIST

Pour vérifier tout ça, nous avons tracé différentes réponses en fréquence sur la figure suivante :

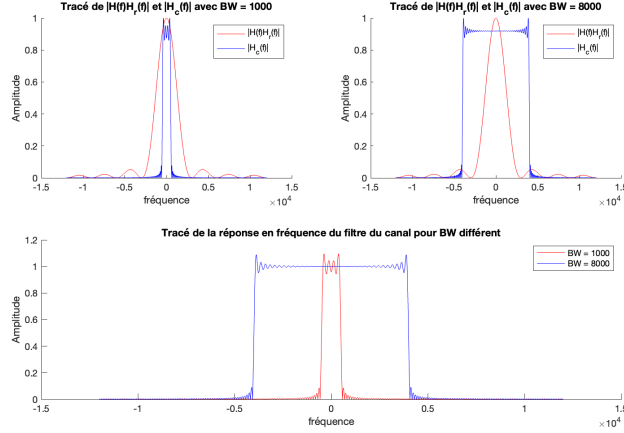


FIGURE 7 – Voici trois tracés de différentes réponses en fréquence pour un échantillon binaire de 1000 bits

Dans le cas où $BW = 8000\text{Hz}$ (figure 7), On voit sur les tracés que la bande passante du canal permet de laisser passer beaucoup d'informations, ce qui nous donne un diagramme de l'oeil avec lequel on peut voir que pour récupérer l'information initiale, il faut échantillonner tout les $n_0 + mN_s$, avec $n_0 = 8$. Voici le tracé du diagramme de l'oeil de notre canal avec BW qui vaut soit 1000 Hz soit 8000 Hz :

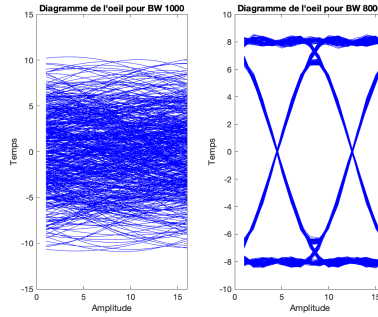


FIGURE 8 – Voici des tracés de diagramme de l'oeil pour des valeurs de BW différentes (1000 et 8000). Nous avons utilisé ici un échantillon binaire de 1000 bits

La réponse impulsionnelle globale montre également qu'en se plaçant au sommet de la courbe, on peut respecter le critère de Nyquist. Voici le tracé de la

4 ÉTUDE DE L'IMPACT DU BRUIT ET DU FILTRAGE ADAPTÉ, NOTION D'EFFICACITÉ EN PUISSANCE

réponse impulsionnelle globale :

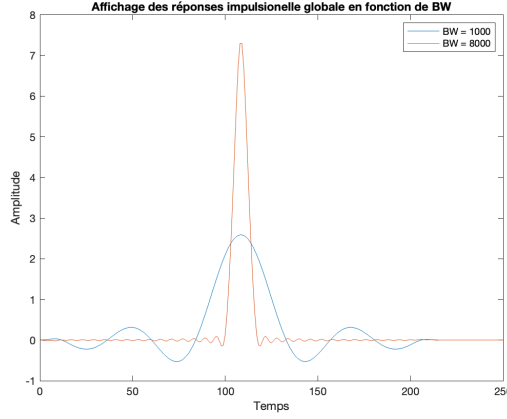


FIGURE 9 – Voici un tracé de la réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission avec canal de propagation pour BW qui varie.

Cependant, à $BW = 1000Hz$, Le critère de Nyquist lui n'est plus respecté selon le calcul fait plus haut. On peut voir sur le tracé de la figure 7 que la bande du filtre passe bas n'est pas assez grande comparé à la bande de transmission. On peut en conclure que les informations ne sont pas transmises correctement. On voit également sur le diagramme de l'oeil qu'aucune valeur n_0 initiale ne nous permettra d'échantillonner d'une façon optimale. De plus, le tracé de la réponse impulsionnelle montre que le critère de Nyquist n'est pas respectable, car on ne peut se placer en aucun point pour faire en sorte que $g(t_0) \neq 0$ et $g(t_0 + kT_s) = 0$. Dans ce cas la, nous obtenons un TEB qui est entre 0.2 et 0.3.

Ceci démontre que le canal de transmission a un effet important sur la qualité de la transmission. C'est donc un paramètre à prendre en compte et qui peut, si certaines conditions ne sont pas respectées, être délétère à la bonne transmission du signal.

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

Cette dernière partie est dédiée à l'étude du bruit dans plusieurs chaînes de transmission numérique, ainsi qu'à l'étude du filtrage adapté. Nous avons donc implanté sur Matlab trois chaînes de transmission de fréquence d'échantillonnage $F_e = 24kHz$ permettant de transmettre un débit binaire $R_b = 3000$ bits par seconde. Voici comment nous avons implanté nos trois chaînes :

- Dans un premier temps, on génère un échantillon binaire qui prend généralement comme taille les valeurs 100, 1000 et 10 000.

- Puis, nous faisons un mapping sur l'échantillon binaire. Ce mapping est différent en fonction des chaînes et sera détaillé dans chaque section.
- Ensuite, nous sur-échantillonons notre signal d'un facteur $N_s = \frac{T_s}{T_b}$
- Une fois notre signal sur-échantillonné, il doit passer dans un filtre de mise en forme. Pour nos trois chaînes, le filtre de mise en forme est rectangulaire de durée égale à la durée d'un symbole et de hauteur égale à 1.
- L'étape d'après est la simulation d'un canal de propagation. Pour les chaînes, nous simulons le canal en ajoutant du bruit gaussien selon la formule suivante :

$$bruit = \sigma_n * randn(1, length(x))$$

Avec σ_n^2 égale à :

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

Les paramètres sont les suivants : M , l'ordre de la modulation, P_x la puissance du signal à bruite et $\frac{E_b}{N_0}$ la consigne que nous allons faire varier pour augmenter ou diminuer le bruit.

- Puis, nous réceptionnons notre signal à l'aide d'un filtre de réception. Vu que ces filtres dépendent de la chaîne, nous les détaillerons plus loin.
- Pour finir, on échantillonne notre signal aux instants optimaux. Puis, une fois nos seuils fixés (les seuils se trouvent notamment en regardant le diagramme de l'oeil), nous faisons la décision sur les symboles à l'aide d'un détecteur à seuil. Et enfin, on fait un démapping adapté au mapping initial. On récupère alors un nouvel échantillon binaire
- L'ultime étape de calculer le TEB à l'aide de la formule suivante :

$$TEB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{initial}(i) - x_{final}(i)$$

Avec n la taille de l'échantillon binaire, $x_{initial}$ l'échantillon binaire initial et x_{final} l'échantillon binaire après la simulation de notre chaîne de transmission.

Nous allons maintenant voir la spécificité de chaque chaîne ainsi que leurs résultats

4.1 Étude de chaque chaîne de transmission

4.1.1 1ère chaîne de transmission

La première chaîne a un mapping à symboles binaires à moyenne nulle, ce qui peut se traduire avec le tableau suivant :

bits	symbole
0	-1
1	1

4 ÉTUDE DE L'IMPACT DU BRUIT ET DU FILTRAGE ADAPTÉ, NOTION D'EFFICACITÉ EN PUISSANCE

De plus, le filtre de réception est le même que celui de mise en forme, soit un filtre rectangulaire de durée égale à la durée d'un symbole et de hauteur 1.

Dans un premier temps, avant d'implémenter le bruit dans cette chaîne, nous avons tracé le diagramme de l'œil afin d'obtenir l'instant d'échantillonnage idéal :

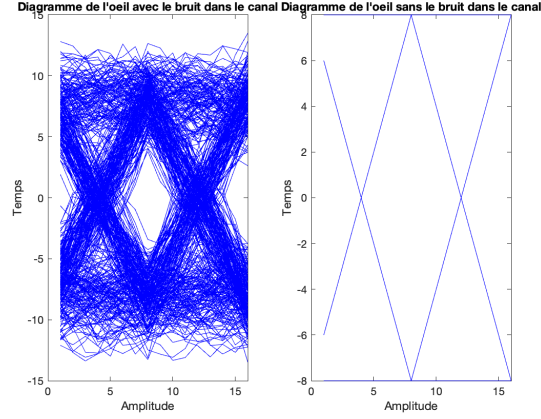


FIGURE 10 – Voici deux tracés de diagramme de l'œil pour la chaîne 1. À droite, du bruit est présent avec $\frac{E_b}{N_0} = 10$ et à droite il n'y a pas de bruit

Ce tracé (figure 10) montre que $N_0 = 8$ est l'instant d'échantillonnage idéal.

Après avoir obtenu ce résultat, nous avons ajouté le bruit à la chaîne de transmission. Nous avons alors tracé à nouveau le diagramme de l'œil, mais, pour différentes valeurs de $\frac{E_b}{N_0}$:

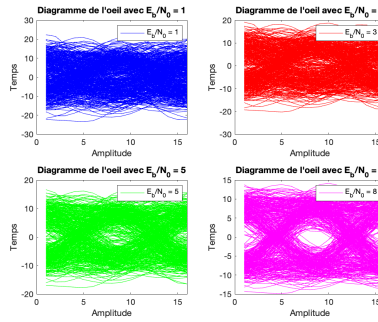


FIGURE 11 – Voici 4 tracés de diagramme de l'œil avec $\frac{E_b}{N_0}$ qui varie. Nous pouvons voir que, plus cette consigne augmente, plus le bruit diminue, et plus la différenciation du seuil est claire. Nous avons utilisé ici un échantillon binaire de 1000 bits.

De plus, pour vérifier que la chaîne que nous avons implémenté est juste,

4 ÉTUDE DE L'IMPACT DU BRUIT ET DU FILTRAGE ADAPTÉ, NOTION D'EFFICACITÉ EN PUISSANCE

nous avons comparé notre TEB calculé pour différentes valeurs de $\frac{E_b}{N_0}$ avec le TEB théorique. Pour ce dernier, la formule est la suivante :

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

Or ici, comme $M = 2$, la formule devient :

$$TEB = Q\left(\sqrt{2 \frac{E_b}{N_0}}\right)$$

Nous obtenons alors le tracé suivant :

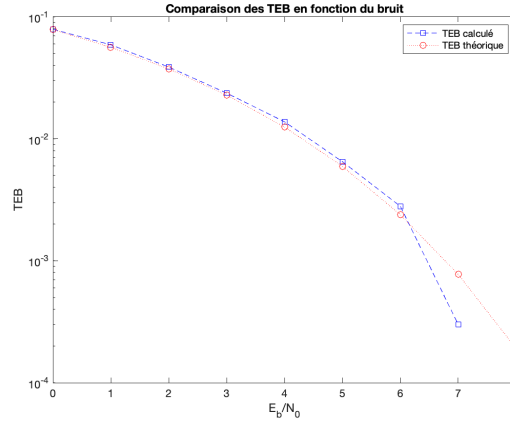


FIGURE 12 – Sur ce tracé, nous avons comparé notre TEB calculé avec le TEB théorique pour des valeurs différentes de $\frac{E_b}{N_0}$ qui varie entre 0 et 8 avec un pas 1

Nous pouvons voir que les deux courbes se superposent, nous pouvons donc affirmer que notre chaîne de transmission fonctionne correctement. Cela est dû au fait que le filtre de réception est le même que le filtre de mise en forme : il est adapté à ce dernier.

4.1.2 2nd chaîne de transmission

Pour la deuxième chaîne de transmission, le mapping utilisé est le même que celui utilisé pour la première chaîne de transmission. Cependant, c'est le filtre de réception qui change : il est rectangulaire de durée égale à la moitié de la durée symbole et de hauteur 1. Nous verrons dans la dernière partie la comparaison entre la première et la seconde chaîne et donc l'impact que peut avoir le filtre de réception.

Comme pour la chaîne précédente, la première étape a été de trouver l'instant optimal N_0 pour l'échantillonnage. Nous avons donc tracé le diagramme de l'oeil pour cette chaîne sans bruit et nous avons obtenu le tracé suivant :

4 ÉTUDE DE L'IMPACT DU BRUIT ET DU FILTRAGE ADAPTÉ, NOTION D'EFFICACITÉ EN PUISSANCE

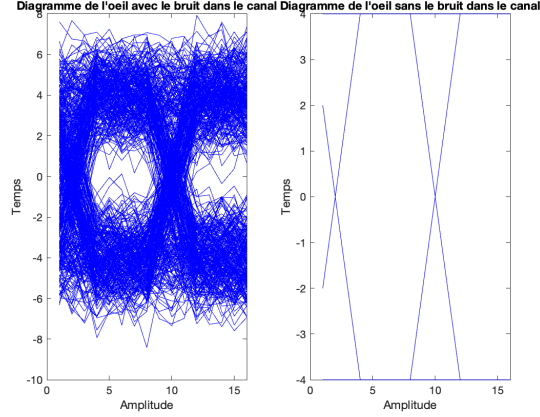


FIGURE 13 – Voici deux tracés de diagramme de l'oeil pour la chaîne 1. À droite, du bruit est présent avec $\frac{E_b}{N_0} = 10$ et à droite il n'y a pas de bruit

Cette figure nous montre que $N_0 = 6$ est l'instant d'échantillonnage optimal. Nous avons ensuite rajouté du bruit sur la chaîne pour regarder son impact sur cette dernière. Voici un tracé qui montre l'impact du bruit sur le diagramme de l'oeil et donc l'impact sur la prise de décision en fin de chaîne :

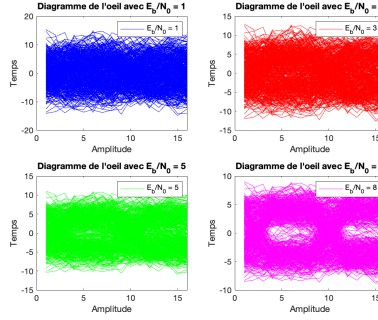


FIGURE 14 – Voici 4 tracés de diagramme de l'oeil avec $\frac{E_b}{N_0}$ qui varie. Nous pouvons voir que, plus cette consigne augmente, plus le bruit diminue, et plus la différenciation du seuil est claire. Nous avons utilisé ici un échantillon binaire de 1000 bits.

Pour finir, pour voir si notre chaîne est correctement implémentée et si elle est efficace, nous devons tracer notre TEB calculé pour différentes valeurs de $\frac{E_b}{N_0}$ avec un tracé du TEB théorique. Nous savons d'avance que notre deuxième chaîne est moins efficace que notre première chaîne car le filtre de réception n'est pas le même que le filtre de mise en forme : il n'est pas adapté

Nous devrions avoir $H_e = H(f)H_c(f)$ et donc, comme nous n'avons pas de

4 ÉTUDE DE L'IMPACT DU BRUIT ET DU FILTRAGE ADAPTÉ, NOTION D'EFFICACITÉ EN PUISSANCE

canal : $h_e = h(f)$, c'est à dire que le filtre de réception devrait être le même que le filtre de mise en forme. Ce qui n'est pas le cas ici.

Voyons tout de suite qu'elle sera l'impact de cette différence sur la formule du TEB :

$$\text{On a } TEB = Q\left(\frac{g(t_0)}{\sigma_w}\right)$$

$$\text{Or, ici } g(t_0) = \frac{T_s}{2}$$

$$\text{et } \sigma_w^2 = \frac{N_0}{2} \int_R |H_r(f)|^2 df \Rightarrow \sigma_w^2 = \frac{N_0}{2} \int_R |h_r(t)|^2 dt \Rightarrow \sigma_w^2 = \frac{N_0}{2} \frac{T_0}{2} = \frac{N_0 T_s}{4}$$

$$\text{Or, } E_s = E_b = T_s (\text{car } M=2)$$

En regroupant ces différentes formules, on obtient alors :

$$TEB = Q\left(\frac{T_s}{2} \times \sqrt{\frac{4}{N_0 T_s}}\right) \Rightarrow TEB = Q\left(\sqrt{\frac{T_s}{N_0}}\right) \Rightarrow TEB = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)$$

Il ne nous reste plus qu'à comparer notre TEB calculé et notre TEB théorique à l'aide du tracé suivant :

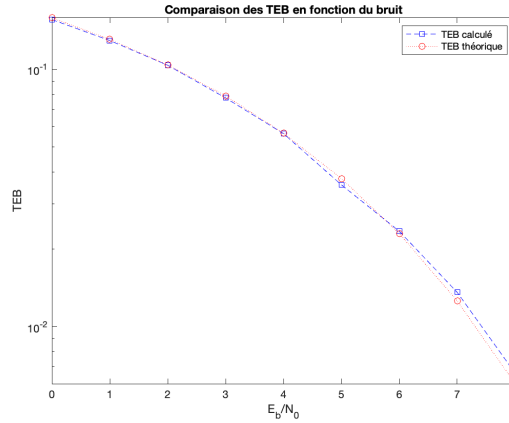


FIGURE 15 – Sur ce tracé, nous avons comparé notre TEB calculé avec le TEB théorique pour des valeurs différentes de $\frac{E_b}{N_0}$ qui varie entre 0 et 8 avec un pas 1

Nous pouvons voir que les deux TEB se superposent, on peut donc conclure que nous avons bien implémenté notre chaîne de transmission. Nous comparerons l'efficacité de la première et de la deuxième chaîne dans la section suivante.

4.1.3 3ème chaîne de transmission

La troisième chaîne a un mapping 4-aires à moyenne nulle, ce qui peut se traduire avec tableau suivant :

bits	symbole
00	3
01	1
10	-1
11	-3

De plus, le filtre de réception est le même que celui de mise en forme, soit un filtre rectangulaire de durée égale à la durée symbole et de hauteur 1.

Dans un premier temps, avant d'implémenter le bruit dans cette chaîne, nous avons tracé le diagramme de l'œil afin d'obtenir l'instant d'échantillonnage idéal N_0 ainsi que les trois seuils S_1 , S_2 et S_3 qui vont nous permettre de prendre une décision sur notre signal. Voici le tracé :

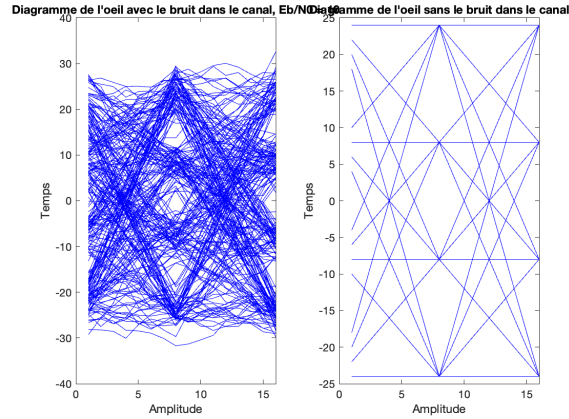


FIGURE 16 – Voici deux tracés de diagramme de l'œil pour la chaîne 3. À droite, du bruit est présent avec $\frac{E_b}{N_0} = 10$ et à droite il n'y a pas de bruit

Nous pouvons voir sur le tracé que l'instant optimal d'échantillonnage est N_0 . pour les seuils, on regarde la médiane entre deux croisements successifs, on obtient alors :

- $S_1 = 0$
- $S_2 = -16$
- $S_3 = 16$

4 ÉTUDE DE L'IMPACT DU BRUIT ET DU FILTRAGE ADAPTÉ, NOTION D'EFFICACITÉ EN PUISSANCE

Ensuite, comme pour les chaînes précédentes nous avons regardé l'impact du bruit sur le diagramme de l'oeil et sur la prise de décision, voici le tracé que nous avons obtenu :

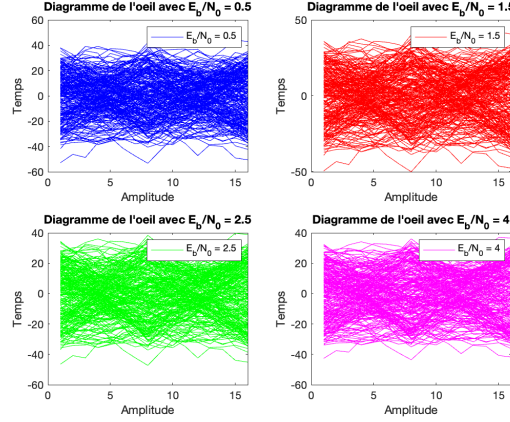


FIGURE 17 – Voici 4 tracés de diagramme de l'oeil avec $\frac{E_b}{N_0}$ qui varie. Nous pouvons voir que, plus cette consigne augmente, plus le bruit diminue, et plus la différenciation du seuil est claire. Nous avons utilisé ici un échantillon binaire de 1000 bits.

Pour finir, nous avons comparé le TEB que nous avons obtenu pour différentes valeurs de $\frac{E_b}{N_0}$ avec le TEB théorique qui vaut la même chose que celui de la chaîne 1 mais avec $M = 4$:

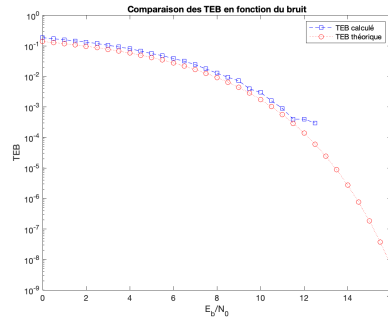


FIGURE 18 – Sur ce tracé, nous avons comparé notre TEB calculé avec le TEB théorique pour des valeurs différentes de $\frac{E_b}{N_0}$ qui varie entre 0 et 16 avec un pas 0,5

Concernant les formules théoriques, la différence vient du fait que nous tra-

vaillons en symboles 4-aires et donc $M = 4$:

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

et donc comme $M=4$, la formule devient :

$$TEB = \frac{3}{4} Q\left(\sqrt{\frac{12}{15} \frac{E_b}{N_0}}\right)$$

Nous pouvons voir que notre TEB calculé se superpose avec le TEB théorique, on peut donc en conclure du bon fonctionnement de notre chaîne. Cependant, on peut voir qu'à partir d'une consigne environ égale à 11 les courbes ne se superposent plus et que le TEB calculé tombe à 0. Cela est probablement dû au fait que notre échantillon binaire est trop petit (ici seulement 10 000 bits).

4.2 Comparaison des chaînes de transmission implantées

Dans cette ultime partie, nous allons comparer les différentes chaînes entre elles.

4.2.1 Comparaison des chaînes 1 et 2

Voici le tracé comparant le TEB entre la chaîne 1 et la chaîne 2 :

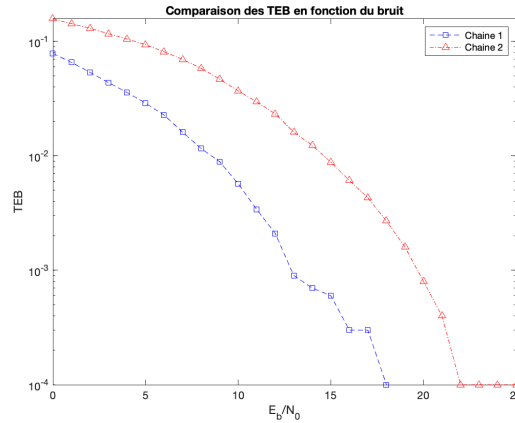


FIGURE 19 – Sur ce tracé, nous avons comparé le TEB calculé de la chaîne 1 et de la chaîne 2 pour $\frac{E_b}{N_0}$ qui varie entre 0 et 16 avec un pas de 0.5.

La figure 19 montre que la chaîne 1 est plus efficace que la chaîne 2. En effet, dans les formules théoriques du TEB on a que : $Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) > Q\left(\sqrt{2 \frac{E_b}{N_0}}\right)$. Pour comparer l'efficacité en puissance, il suffit de se fixer une valeur fixe pour

le TEB. Ensuite, La chaîne la plus efficace en puissance est celle qui demande le rapport $\frac{E_b}{N}$ le plus faible pour atteindre la valeur fixée. On voit alors sur le tracé (figure 19) que selon cette définition, la chaîne 1 est plus efficace que la 2. Or, la seule différence entre ces deux chaînes est le filtre de réception : dans la chaîne 2, il n'est pas adapté au filtre de mise en forme. Nous pouvons conclure que le filtrage adapté a un impact sur l'efficacité d'une chaîne de transmission.

4.2.2 Comparaison des chaînes 1 et 3

Voici le tracé comparant le TEB entre la chaîne 1 et la chaîne 3 :

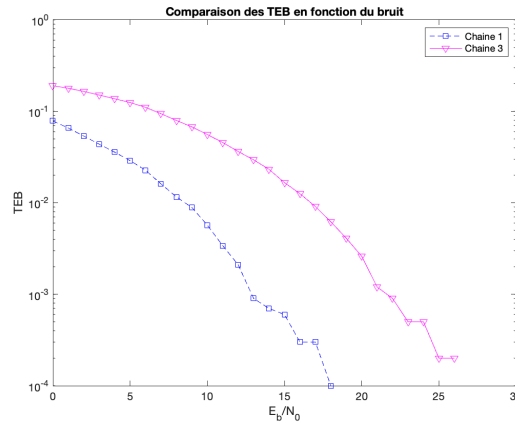


FIGURE 20 – Sur ce tracé, nous avons comparé le TEB calculé de la chaîne 1 et de la chaîne 3 pour $\frac{E_b}{N_0}$ qui varie entre 0 et 16 avec un pas de 0.5.

Comme pour les chaînes 1 et 2, nous pouvons voir que la chaîne 1 est plus efficace en puissance que la chaîne 3. En effet, on a : $\frac{3}{4}Q(\sqrt{\frac{12}{15}\frac{E_b}{N_0}}) > Q(\sqrt{2\frac{E_b}{N_0}})$.

De plus, le tracé montre bien, comme plus haut, que en se fixant une valeur pour le TEB, c'est avec la chaîne 1 que l'on atteint cette valeur pour le rapport $\frac{E_b}{N}$ le plus faible. Ceci montre donc que la chaîne 1 est la plus efficace en puissance.

Entre ces deux chaînes, la différence notable n'est pas le filtrage (qui ici est adapté), mais le mapping : pour la chaîne 1, c'est un mapping 2-aire tandis que pour la chaîne 3 c'est un mapping 4-aire. On peut donc en conclure que le mapping a un impact sur l'efficacité d'une chaîne, et que, plus on cherche à transmettre des signaux variés (4 symboles plutôt que 2) moins on sera efficace (ie M grand \Rightarrow TEB grand).

5 Conclusion

5.1 Conclusion du projet

Durant cette première partie nous avons pu implémenter des chaînes de transmission en bande de base.

Nous sommes partis des premiers modules qui composent les chaînes avec le modulateur, le mapping et le démodulateur. Puis, nous avons complexifié notre chaîne en rajoutant le canal de propagation (avec un filtre passe-bas ou du bruit Gaussien) et toute la phase de prise de décision.

À la fin, nous avons pu comparer nos trois chaînes que nous avons implémentées et ainsi faire différentes conclusions quand à la construction d'une chaîne de transmission en bande de base. Par exemple, pour gagner en efficacité il faut que le filtre de réception soit adapté au filtre de mise en forme. Ou encore, que faire du 4-aire permet peut-être de transmettre plus de variation de données, mais, il y aura une perte d'efficacité comparé à du 2-aire.

5.2 Bilan de Émile

Ce premier TP de télécommunication m'a permis d'approfondir cette matière en appliquant un exemple concret. J'ai pu m'entraîner, autant sur le calcul théorique que sur l'analyse pratique des résultats que nous avons obtenus. Il était également intéressant de faire ces programmes sur Matlab, afin de s'exercer sur ce logiciel.

5.3 Bilan de Paul

Ce projet m'a permis de comprendre en profondeur le concept de chaîne de transmission en bande de base. J'ai pu notamment approfondir ce que j'avais vu en traitement du signal et en cours de télécommunications. De plus, j'ai bien aimé implanter les différents modules et les chaînes, car c'est une matière très concrète où l'on voit concrètement qu'est que chaque modules apportent à la chaîne de transmission. .