



Rapport du projet bande de base

Eliott Rousset Picard Arthur

Département Sciences du Numérique - Première année
2022-2023

Table des matières

1	Introduction	4
2	Etude de modulateurs bande de base	4
2.1	Construction du modulateur 1	4
2.1.1	Construction du modulateur 2	4
2.1.2	Construction du modulateur 3	5
2.1.3	Comparaison des densités spectrales expérimentales et théoriques des signaux de sortie des 3 modulateurs	6
2.1.4	Comparaison des densités spectrales des signaux de sortie des 3 modulateurs	7
3	Etude des interférences entre symbole et du critère de Nyquist	8
3.0.1	Etude sans canal de propagation	8
3.1	Etude avec canal de propagation sans bruit avec une bande de 8000 Hz	10
3.2	Etude avec canal de propagation sans bruit avec une bande de 1000 Hz	12
4	Etude de l'impact du bruit et du filtrage adapté, notion d'efficacité en puissance	13
4.1	Chaîne 1 sans bruit	14
4.2	Chaîne 2 sans bruit	15
4.3	Chaîne 3 sans bruit	16
4.4	Chaîne 1 avec bruit	18
4.5	Chaîne 2 avec bruit	20
4.6	Chaîne 3 avec bruit	22
4.7	Comparaison des taux d'erreur binaire des chaînes 1, 2 et 3 en fonction du rapport $\frac{E_b}{N_0}$ en envoyant 10^4 bits.	24
4.8	Comparaison des taux d'erreur binaire des chaînes 3 avec et sans mapping de gray avec le taux d'erreur théorique en fonction du rapport $\frac{E_b}{N_0}$ en envoyant 10^4 bits.	26
5	Conclusion	27

Table des figures

1	Tracé du signal modulé du modulateur 1	4
2	Tracé de la densité spectrale du signal modulé du modulateur 1	4
3	Tracé du signal modulé du modulateur 2	4
4	Tracé de la densité spectrale du signal modulé du modulateur 2	5
5	Tracé du signal modulé du modulateur 3	5
6	Tracé de la densité spectrale du signal modulé du modulateur 3	5
7	Tracé de la comparaison des densités spectrales expérimentales et théoriques des signaux de sortie des 3 modulateurs	6

8	Tracé des densités spectrales des signaux de sortie des 3 modulateurs	7
9	Tracé du signal en sortie du filtre de réception	8
10	Tracé de la réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission g	9
11	Tracé du diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception . .	9
12	Tracé de la réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission sans bruit	10
13	Tracé du diagramme de l'oeil avec un canal mais sans bruit . . .	10
14	Tracé de $ H(f)H_r(f) $ et de $ H_c(f) $	11
15	Tracé de la réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission sans bruit	12
16	Tracé du diagramme de l'oeil avec un canal mais sans bruit . . .	12
17	Tracé de $ H(f)H_r(f) $ et de $ H_c(f) $	13
18	Tracé du diagramme de l'oeil sans bruit pour la chaîne 1	14
19	Tracé du diagramme de l'oeil sans bruit pour la chaîne 2	15
20	Tracé du diagramme de l'oeil sans bruit pour la chaîne 3	16
21	Schéma expliquant le choix des indices dans l'échantillonnage . .	17
22	Tracé du diagramme de l'oeil avec bruit pour la chaîne 1 avec différentes valeurs de R.	18
23	Tracé de l'erreur binaire numérique et théorique de la chaîne 1 .	19
24	Tracé du diagramme de l'oeil avec bruit pour la chaîne 2 avec différentes valeurs de R.	20
25	Tracé de l'erreur binaire numérique et théorique de la chaîne 2 .	21
26	Tracé du diagramme de l'oeil avec bruit pour la chaîne 3 avec différentes valeurs de R.	22
27	Tracé de l'erreur binaire numérique et théorique de la chaîne 3 .	23
28	Tracé de l'erreur binaire numérique et théorique de la chaîne 1 et 2	24
29	Tracé de l'erreur binaire numérique et théorique de la chaîne 1 et 3	25
30	Tracé de l'erreur binaire numérique et théorique de la chaîne 3 avec et sans mapping de gray	26

1 Introduction

L'objectif de ce projet est de réaliser différentes chaînes de transmission en bande de base et de les étudier, notamment en terme d'efficacité spectrale et en puissance, pour pouvoir les comparer et d'identifier des pistes d'optimisation.

2 Etude de modulateurs bande de base

2.1 Construction du modulateur 1

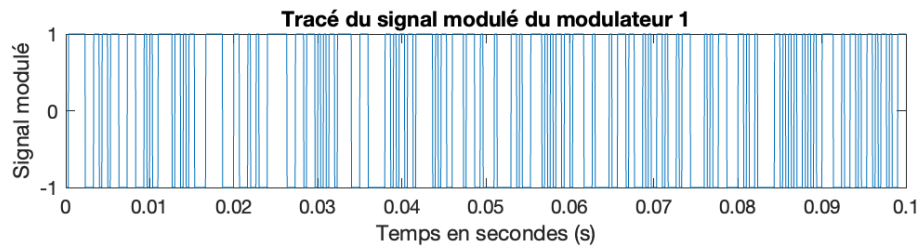


FIGURE 1 – Tracé du signal modulé du modulateur 1

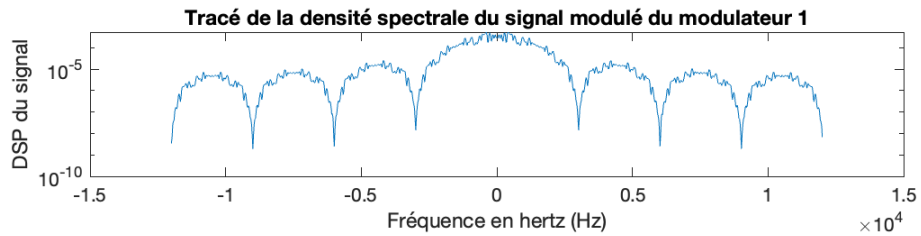


FIGURE 2 – Tracé de la densité spectrale du signal modulé du modulateur 1

2.1.1 Construction du modulateur 2

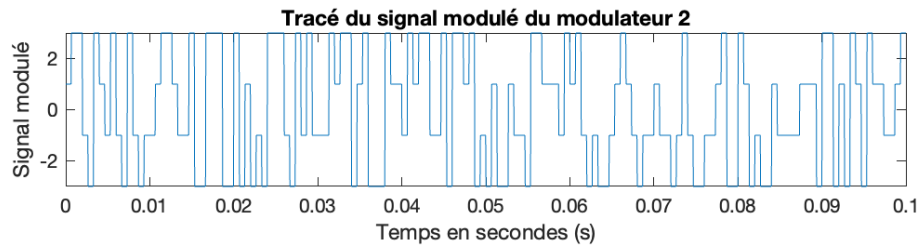


FIGURE 3 – Tracé du signal modulé du modulateur 2

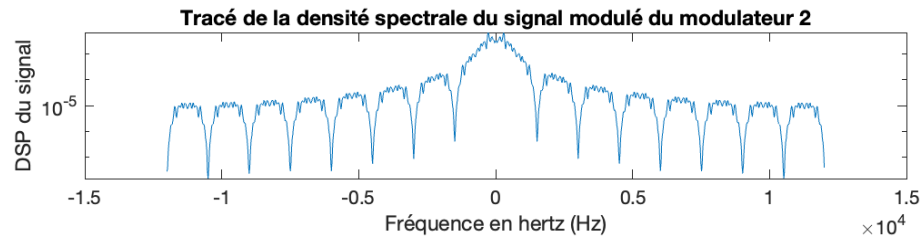


FIGURE 4 – Tracé de la densité spectrale du signal modulé du modulateur 2

2.1.2 Construction du modulateur 3

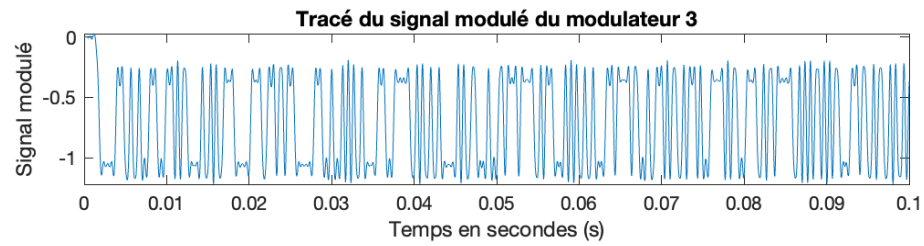


FIGURE 5 – Tracé du signal modulé du modulateur 3

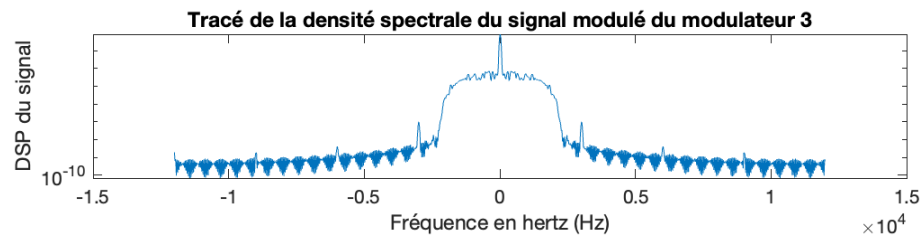


FIGURE 6 – Tracé de la densité spectrale du signal modulé du modulateur 3

2.1.3 Comparaison des densités spectrales expérimentales et théoriques des signaux de sortie des 3 modulateurs

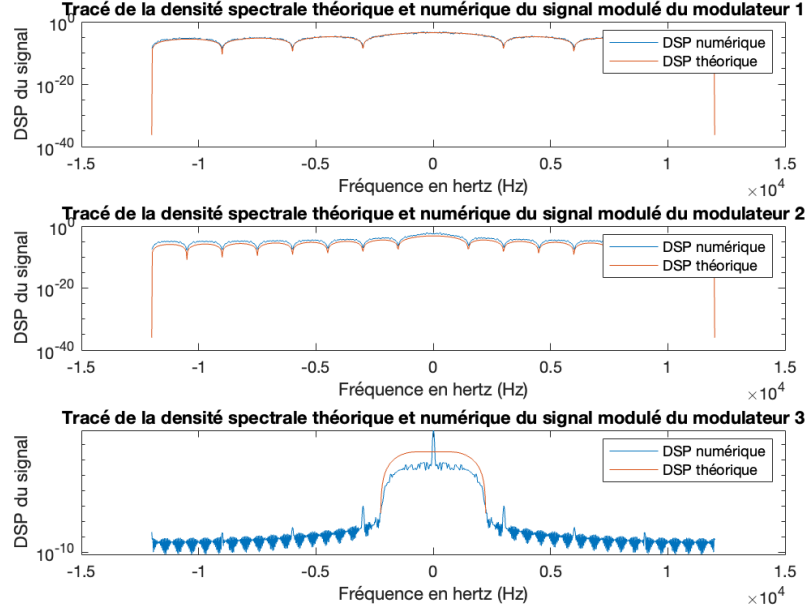


FIGURE 7 – Tracé de la comparaison des densités spectrales expérimentales et théoriques des signaux de sortie des 3 modulateurs

Expressions des différentes densités spectrales :

$$\begin{aligned}
 &— S_{x_1} = T_{s_1} \frac{\sin(\pi F_1 T_{s_1})}{\pi F_1 T_{s_1}} \\
 &— S_{x_2} = T_{s_2} \frac{\sin(\pi F_2 T_{s_2})}{\pi F_2 T_{s_2}} \\
 &— S_{x_3}(f) = \frac{\sigma_a^2}{T_{s_3}} \begin{cases} T_{s_3} & \text{si } |f| \leq \frac{1-\alpha}{2T_{s_3}} \\ \frac{T_{s_3}}{2} (1 + \cos(\frac{\pi T_{s_3}}{\alpha} (|f| - \frac{1-\alpha}{2T_{s_3}}))) & \text{pour } \frac{1-\alpha}{2T_{s_3}} \leq |f| \leq \frac{1+\alpha}{2T_{s_3}} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}
 \end{aligned}$$

2.1.4 Comparaison des densités spectrales des signaux de sortie des 3 modulateurs

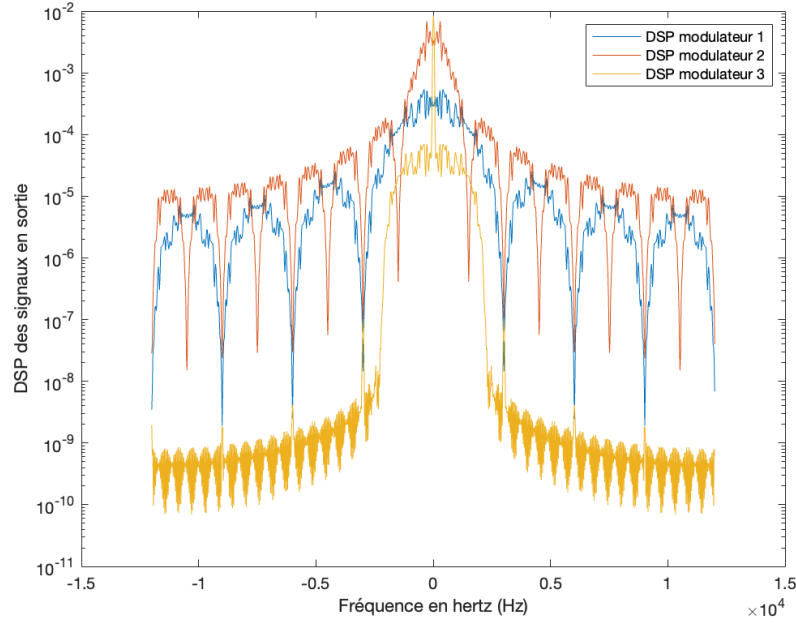


FIGURE 8 – Tracé des densités spectrales des signaux de sortie des 3 modulateurs

Sur la figure 8, on remarque que la densité spectrale du modulateur 1 est située en dessous des densités spectrales du modulateur 2 et 3. Elle est donc moins efficace que les deux autres modulateurs.

De plus, la densité spectrale du modulateur 2 est située au dessus de la densité spectrale du modulateur 1 mais reste en dessous du modulateur 3.

Finalement, le modulateur 3 est situé au dessus des deux modulateurs grâce au pic central, elle présente la meilleure efficacité spectrale des trois modulateurs. L'efficacité supérieure du modulateur 3 est dû au filtre en racine de cosinus surélevé. Ce filtre permet de limiter l'étalement spectral du signal sans altérer la forme des symboles. Alors que les autres modulateurs, eux, à cause de l'étalement spectral vont créer des harmoniques indésirables.

3 Etude des interférences entre symbole et du critère de Nyquist

L'objectif ici est d'implanter une chaîne de transmission en bande de base sans bruit et de l'analyser en se focalisant sur les interférences entre symboles : leur impact sur la transmission et l'influence du respect ou du non respect du critère de Nyquist. La chaîne de transmission aura une fréquence d'échantillonnage $F_e = 24000$ Hz pour transmettre un débit binaire $R_b = 3000$ bits par seconde.

3.0.1 Etude sans canal de propagation

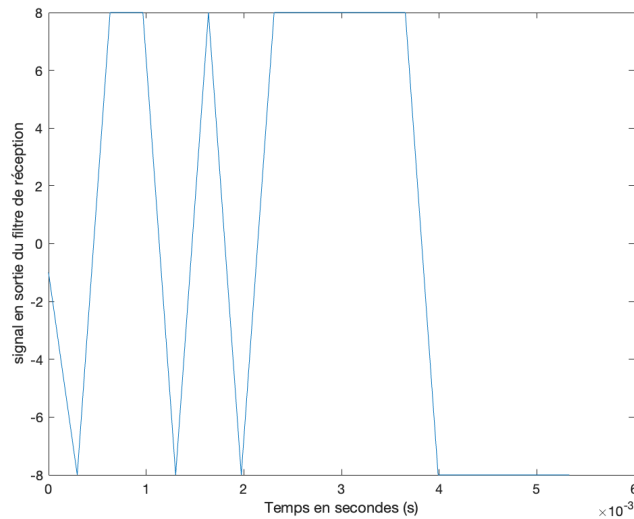


FIGURE 9 – Tracé du signal en sortie du filtre de réception

Tout d'abord, on observe la présence de pics sur le signal car le produit de convolution des filtres est un triangle. Ces pics représentent les bits du signal.

On observe que le signal varie sur un intervalle de $[-8 : 8]$ à cause du passage dans les deux filtres. En observant le tracé de la chaîne de transmission (figure 10), on remarque que le pic présent possède une amplitude de 8.

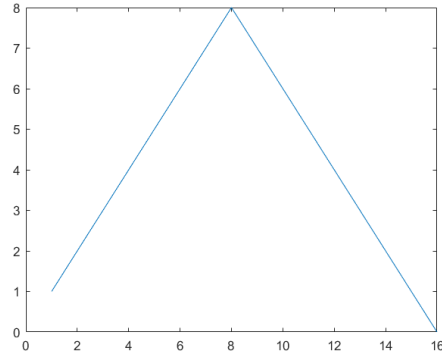


FIGURE 10 – Tracé de la réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission g

Ce pic atteint son maximum en abscisse 8, on utilisera donc $n_0 = 8$ pour déterminer les instants d'échantillonnage optimaux.

On remarque sur le diagramme de l'oeil que les différentes courbes se croisent parfaitement en abscisse 8 sur les symboles ce qui nous confirme que nous devons choisir $n_0 = 8$ pour la détermination des instants optimaux.

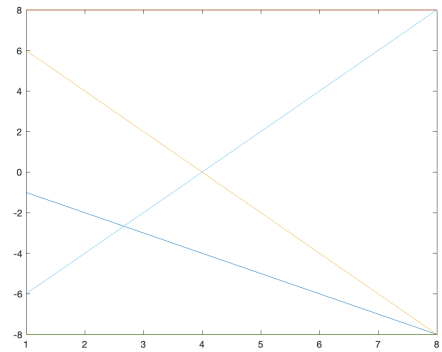


FIGURE 11 – Tracé du diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception

$$g(t) = h(t) * h_r(t)$$

avec : - h la réponse impulsionnelle du filtre de modulation

- h_r la réponse impulsionnelle du filtre de démodulation

Avec $n_0 = 3$, on a un taux d'erreur binaire de 0.48

On obtient ce taux d'erreur binaire car la valeur du bit n'est pas récupéré à l'instant de décision optimal. On a donc des mauvaises interprétations à cause d'une mauvaise stabilité.

3.1 Etude avec canal de propagation sans bruit avec une bande de 8000 Hz

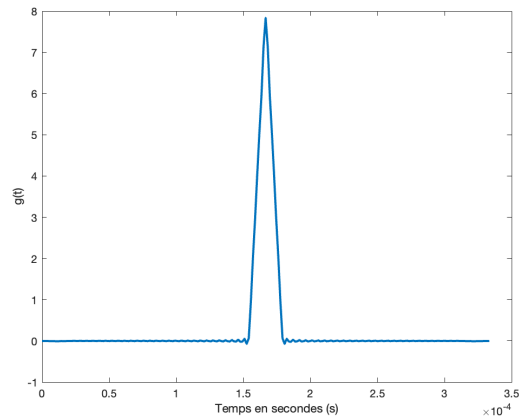


FIGURE 12 – Tracé de la réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission sans bruit

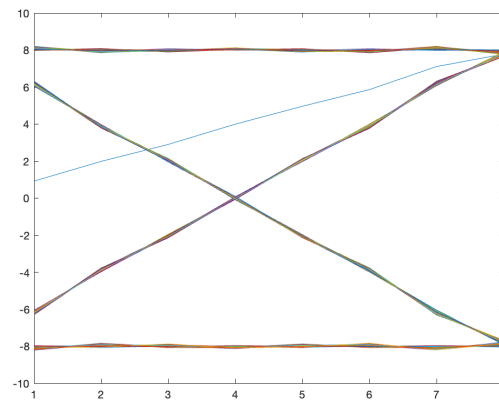


FIGURE 13 – Tracé du diagramme de l'oeil avec un canal mais sans bruit

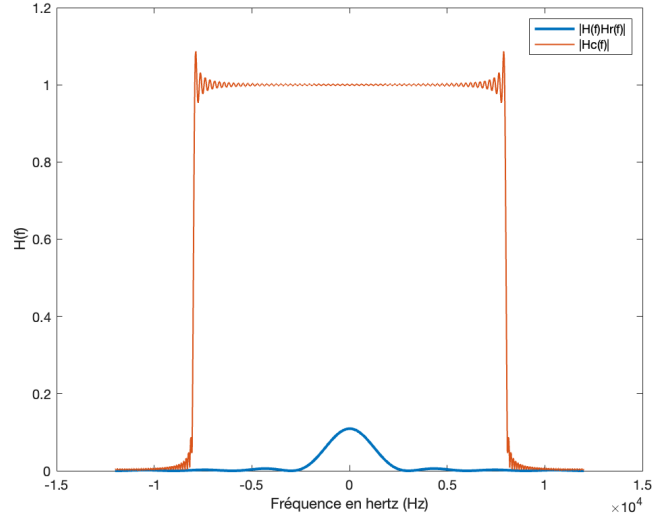


FIGURE 14 – Tracé de $|H(f)Hr(f)|$ et de $|Hc(f)|$

Ici, avec une bande de base de 8000 Hz, on remarque que, sur la figure 14, $|H(f)Hr(f)|$ est pleinement compris dans le tracé de $|Hc(f)|$. Ainsi, aucune des informations émises ne sont supprimées. Ainsi, il en résulte que le taux d'erreur binaire est bien nul.

3.2 Etude avec canal de propagation sans bruit avec une bande de 1000 Hz

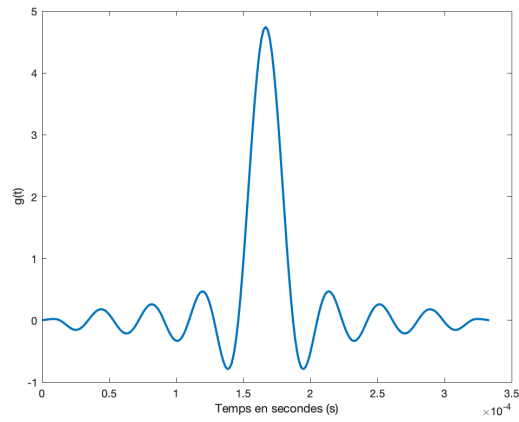


FIGURE 15 – Tracé de la réponse impulsionnelle globale de la chaîne de transmission sans bruit

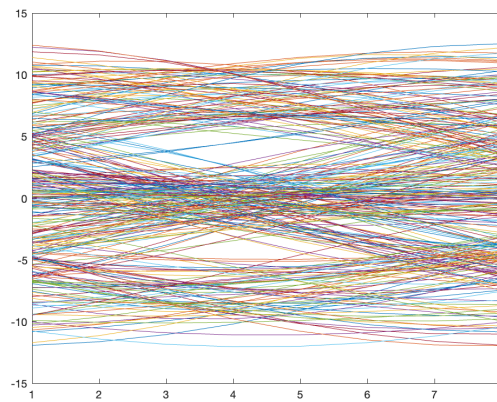


FIGURE 16 – Tracé du diagramme de l'oeil avec un canal mais sans bruit

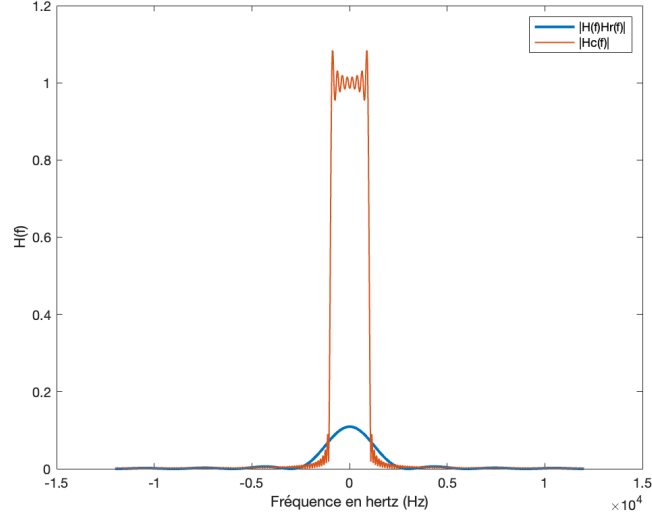


FIGURE 17 – Tracé de $|H(f)Hr(f)|$ et de $|Hc(f)|$

Ici, avec une bande de base de 1000 Hz, on remarque que, sur la figure 14, $|H(f)Hr(f)|$ n'est pas pleinement compris dans le tracé de $|Hc(f)|$. Ainsi, une partie des informations émises est supprimée. Ainsi, il en résulte que le taux d'erreur binaire est d'environ 0.1 expérimentalement.

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

Ici, nous allons nous intéresser à l'étude du bruit dans la chaîne de transmission numérique. Nous allons donc mesurer l'impact du bruit introduit par le canal sur la transmission, l'influence du filtrage adapté et calculer et estimer le taux d'erreur binaire (TEB) pour comparer les chaînes de transmission en termes d'efficacité en puissance. Avec $F_e = 24kHz$, trois chaînes de transmission permettant de transmettre un débit binaire $Rb = 3000$ bits par seconde. Les 3 chaînes sont :

- Chaîne 1 : symboles binaires à moyenne nulle.
- Chaîne 2 : symboles binaires à moyenne nulle.
- Chaîne 3 : symboles 4-aires à moyenne nulle.

4.1 Chaîne 1 sans bruit

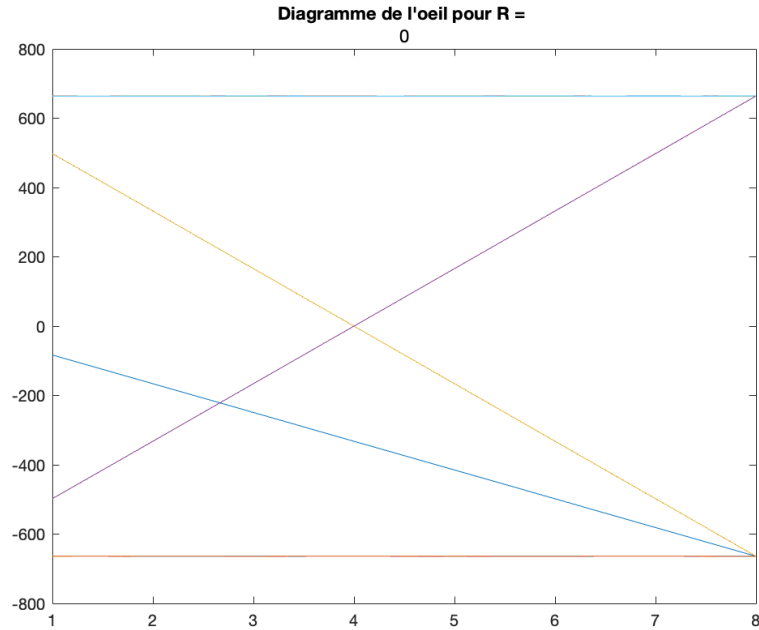


FIGURE 18 – Tracé du diagramme de l'oeil sans bruit pour la chaîne 1

```

1  % Echantillonneur : Demodulateur bande de base
2
3  Mat = reshape(z, Ns, length(z)/Ns);
4  reception = Mat(n0,:);
5  reception(reception <= 0) = 0;
6  reception(reception > 0) = 1;

```

Le signal z est le signal en sortie du filtre de réception. La ligne 3 permet de découper le signal par tranche de N_s . La ligne 4 permet de créer la matrice de réception en ne récupérant que la ligne d'indice n_0 (l'instant optimal) de la matrice Mat . La ligne 5, elle, permet de repérer les valeurs de *reception* tel que ces valeurs soient inférieures ou égales à 0 puis de les remplacer par 0. La ligne 6, elle, permet de repérer les valeurs de *reception* tel que ces valeurs soient supérieures à 0 puis de les remplacer par 1.

4.2 Chaîne 2 sans bruit

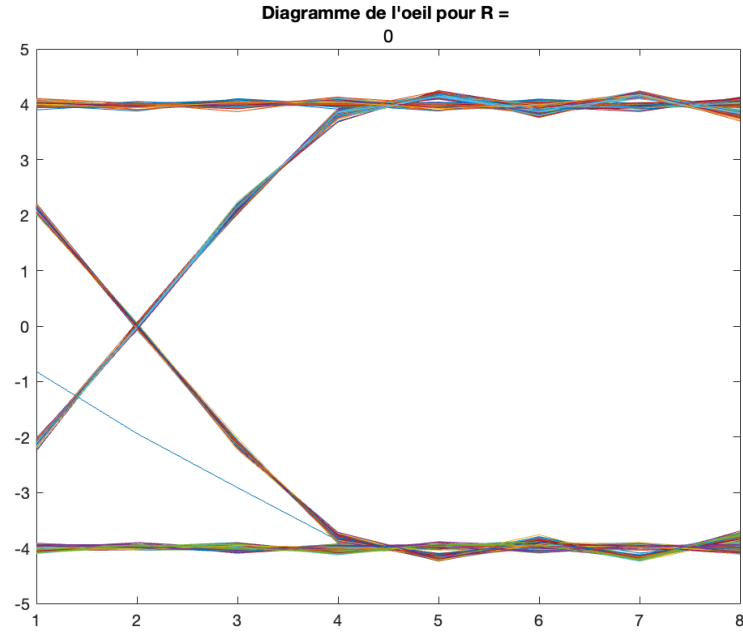


FIGURE 19 – Tracé du diagramme de l'oeil sans bruit pour la chaîne 2

```

1      % Echantillonneur : Demodulateur bande de base
2
3      Mat = reshape(z, Ns, length(z)/Ns);
4      reception = Mat(n0,:);
5      reception(reception <= 0) = 0;
6      reception(reception > 0) = 1;

```

Le signal z est le signal en sortie du filtre de réception. La ligne 3 permet de découper le signal par tranche de N_s . La ligne 4 permet de créer la matrice de réception en ne récupérant que la ligne d'indice n_0 (l'instant optimal) de la matrice Mat . La ligne 5, elle, permet de repérer les valeurs de *reception* tel que ces valeurs soient inférieures ou égales à 0 puis de les remplacer par 0. La ligne 6, elle, permet de repérer les valeurs de *reception* tel que ces valeurs soient supérieures à 0 puis de les remplacer par 1.

4.3 Chaîne 3 sans bruit

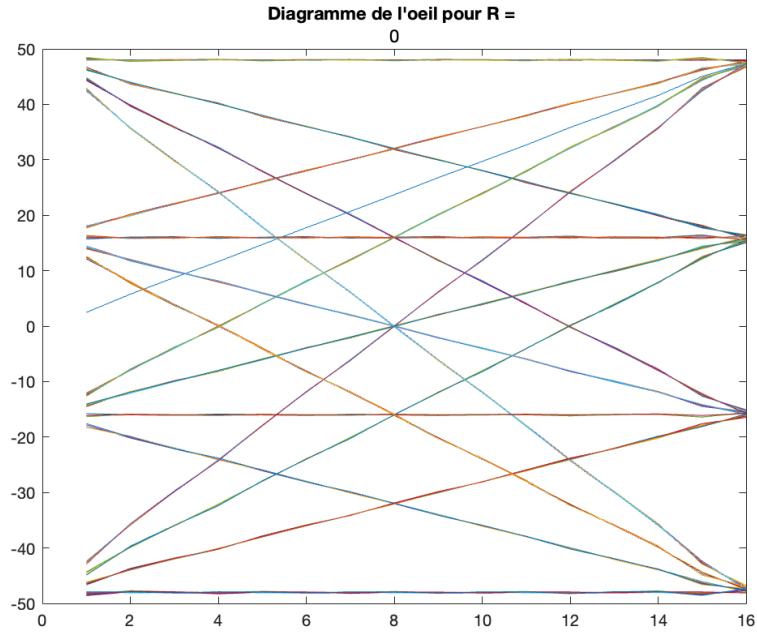


FIGURE 20 – Tracé du diagramme de l’oeil sans bruit pour la chaîne 3

```

1      % Echantillonneur : Demodulateur bande de base
2
3      Mat = reshape(z, Ns, length(z)/Ns);
4      reception = Mat(n0,:)/n0;
5      reception_demapee = zeros(1, 2*length(Mat(n0,:)));
6      I00 = find(reception <= -2);
7      I01 = find(reception <= 0 & reception > -2);
8      I10 = find(reception > 2);
9      I11 = find(reception <= 2 & reception > 0);
10     reception_demapee(2*I01) = 1;
11     reception_demapee(2*I11-1) = 1;
12     reception_demapee(2*I11) = 1;
13     reception_demapee(2*I10-1) = 1;

```

Le signal z est le signal en sortie du filtre de réception.

La ligne 6, elle, permet de repérer les valeurs de *reception* tel que ces valeurs soient inférieures ou égales à -2 . La ligne 7, elle, permet de repérer les valeurs de *reception* tel que ces valeurs soient inférieures ou égales à 0 et supérieures à -2 . La ligne 8, elle, permet de repérer les valeurs de *reception* tel que ces valeurs soient supérieures à 2 . La ligne 9, elle, permet de repérer les valeurs de *reception* tel que ces valeurs soient inférieures ou égales à 2 et supérieures à 0.

Indices du signal en sortie du filtre de réception

Signal des bits en sortie

1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6

Ainsi on en déduit la relation de l'indice du premier bit (i_1) de la valeur d'indice k du signal en sortie : $i_1 = 2 * k - 1$.
De même, pour l'indice du deuxième bit (i_2) : $i_2 = 2 * k$.

17

4.4 Chaîne 1 avec bruit

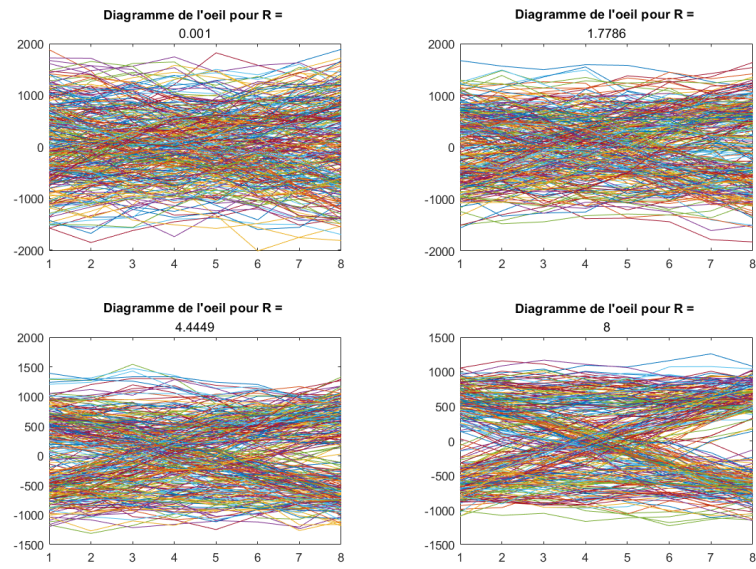


FIGURE 22 – Tracé du diagramme de l'oeil avec bruit pour la chaîne 1 avec différentes valeurs de R .

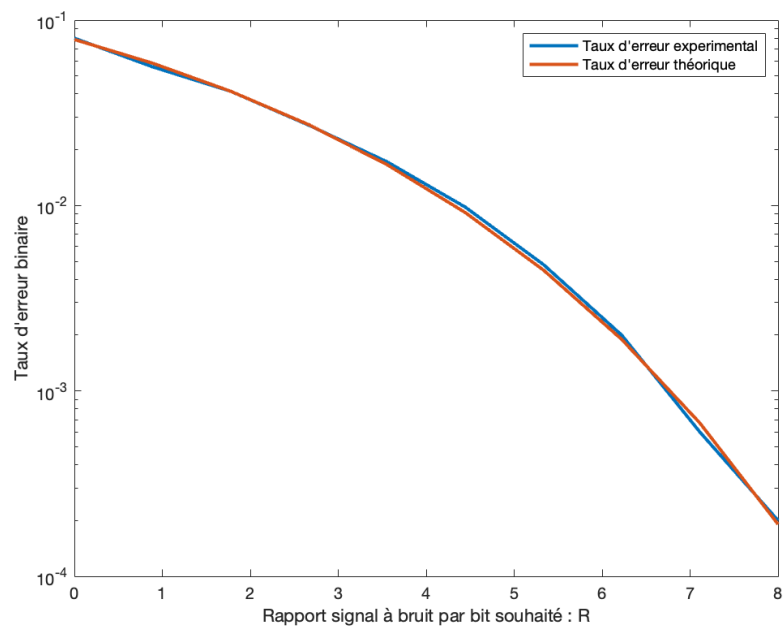


FIGURE 23 – Tracé de l'erreur binaire numérique et théorique de la chaîne 1

D'après la figure ci-dessus , on remarque que le taux d'erreur binaire théorique et expérimental sont très proches en envoyant 10^4 bits.

4.5 Chaîne 2 avec bruit

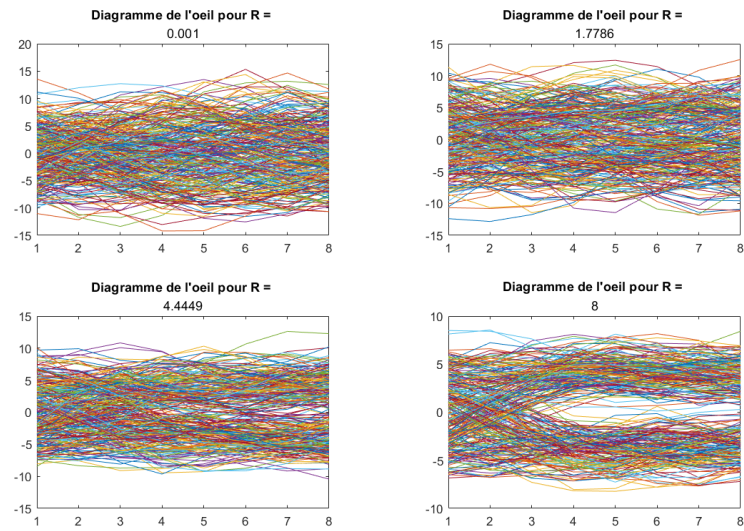


FIGURE 24 – Tracé du diagramme de l'oeil avec bruit pour la chaîne 2 avec différentes valeurs de R .

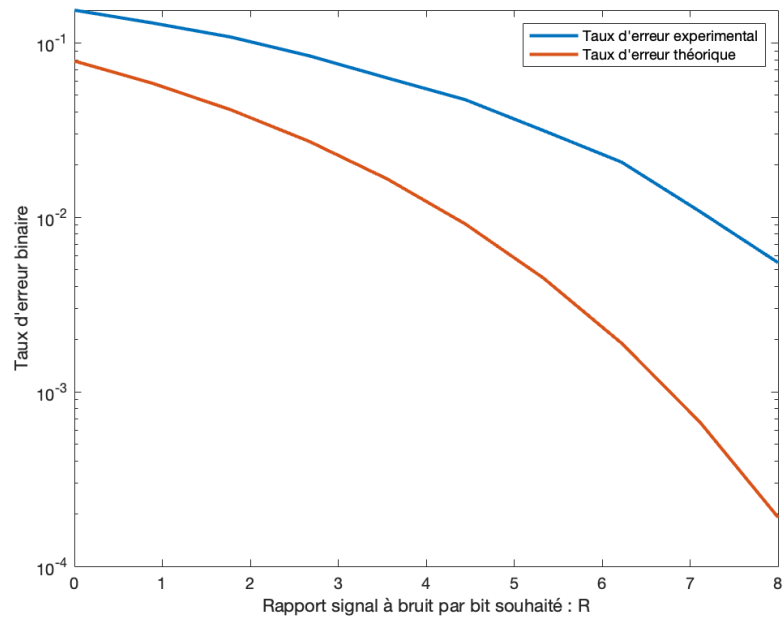


FIGURE 25 – Tracé de l'erreur binaire numérique et théorique de la chaine 2

D'après le figure ci-dessus, on remarque que le taux d'erreur binaire théorique et expérimental sont très éloignés avec un écart important d'environ 2.1×10^{-1} en envoyant 10^4 bits.

4.6 Chaîne 3 avec bruit

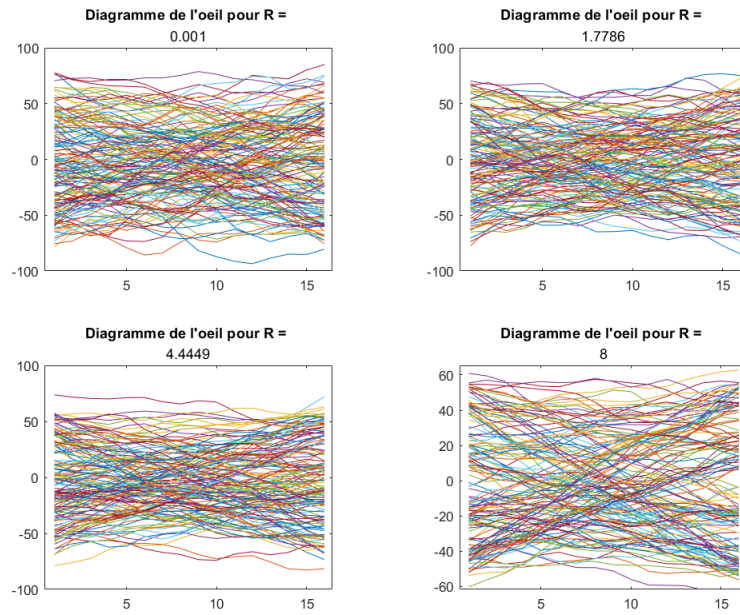


FIGURE 26 – Tracé du diagramme de l'oeil avec bruit pour la chaîne 3 avec différentes valeurs de R .

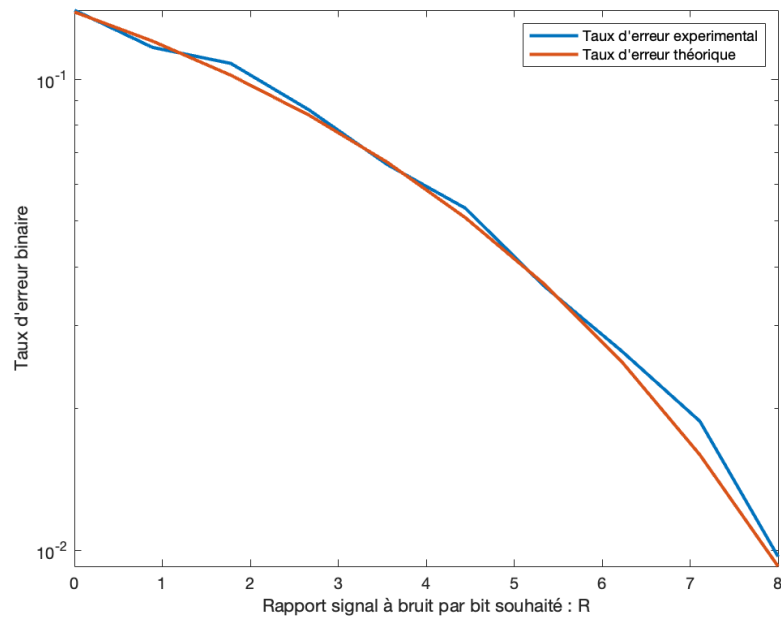


FIGURE 27 – Tracé de l'erreur binaire numérique et théorique de la chaine 3

D'après le figure ci-dessus, on remarque que le taux d'erreur binaire théorique et expérimental sont très proches en envoyant 10^4 bits.

4.7 Comparaison des taux d'erreur binaire des chaines 1, 2 et 3 en fonction du rapport $\frac{E_b}{N_0}$ en envoyant 10^4 bits.

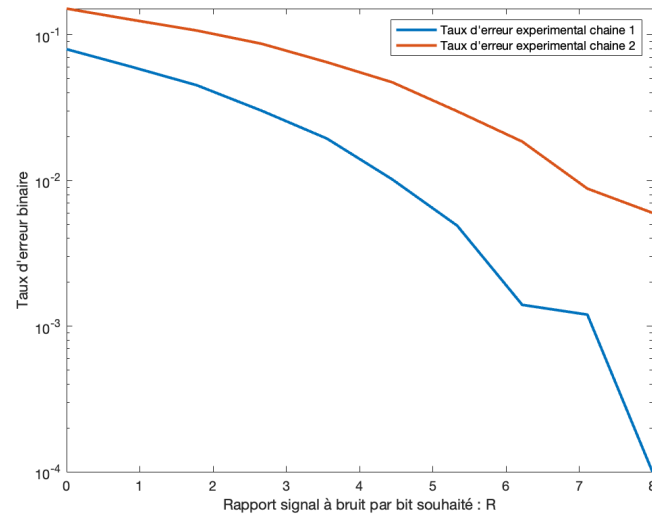


FIGURE 28 – Tracé de l'erreur binaire numérique et théorique de la chaîne 1 et 2

La chaîne 2 ne présente aucun avantage de rapidité ou d'efficacité spectrale mais vu que son filtre n'est pas adapté, on a donc un taux d'erreur binaire en moyenne supérieur à la chaîne 1. On perd donc en précision sans gains.

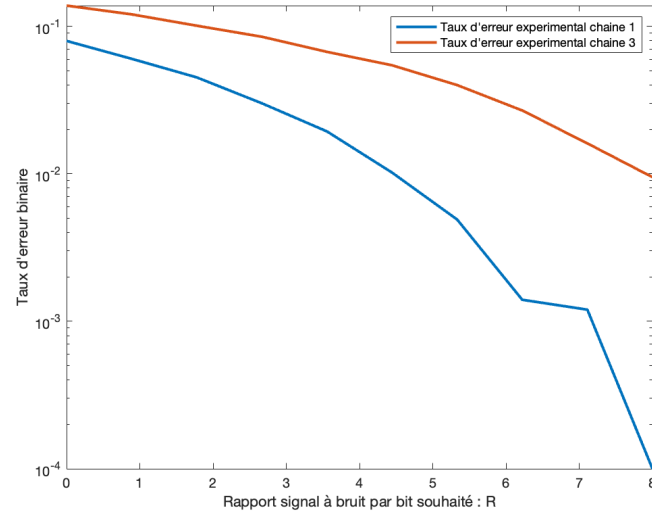


FIGURE 29 – Tracé de l’erreur binaire numérique et théorique de la chaîne 1 et 3

On remarque que les taux d’erreur pour les deux chaînes sont relativement faibles mais on note tout de même que la chaîne 1 a, selon la valeur de R , un taux d’erreur jusqu’à 10 fois plus faible. Cependant la chaîne 3 permet un débit (si l’on ne prend pas en compte le temps de modulation) deux fois plus important.

4.8 Comparaison des taux d'erreur binaire des chaines 3 avec et sans mapping de gray avec le taux d'erreur théorique en fonction du rapport $\frac{E_b}{N_0}$ en envoyant 10^4 bits.

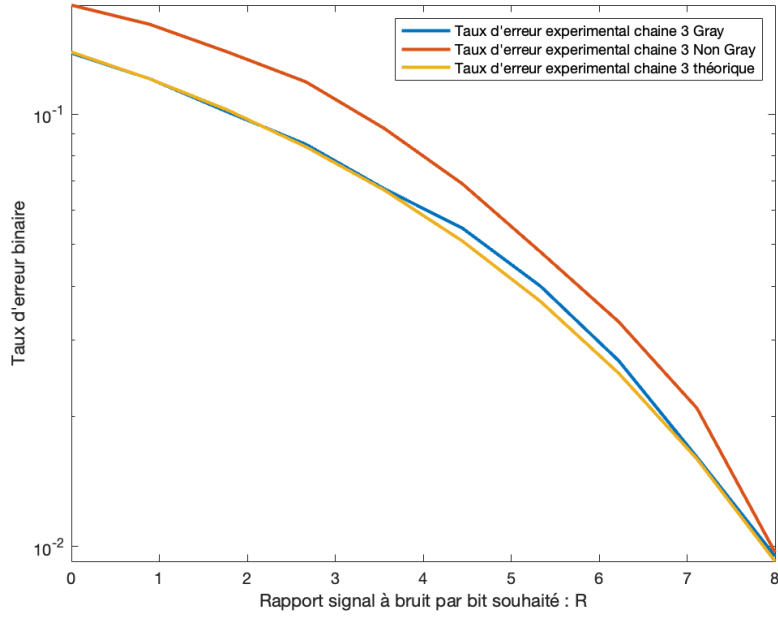


FIGURE 30 – Tracé de l'erreur binaire numérique et théorique de la chaîne 3 avec et sans mapping de gray

Le mapping de Gray permet un gain non négligeable en précision pour une modification mineure et sans impacter le débit binaire .

5 Conclusion

L'étude des densités spectrales nous montre qu'il est préférable de choisir un modulateur avec un faible étalement spectral tout en gardant une forte puissance aux alentours de 0.

De plus, il faut choisir une bande passante assez large pour limiter les pertes, notamment dans les hautes fréquences. Il est également important de choisir une chaîne de transmission adaptée en fonction des caractéristiques que l'on cherche, comme par exemple privilégier le débit ou bien le taux d'erreur binaire. Enfin, il est possible d'optimiser ces chaînes sans en changer la nature en utilisant par exemple le mapping de Gray qui permet des gains en efficacité non négligeables.