

Titre du rapport

Nom des auteurs

Département Sciences du Numérique - Première année
2019-2020

Contents

1	Introduction	3
1.1	Objectifs du travail réalisé	3
1.2	Schéma général des chaines à étudier (canal AWGN)	3
1.2.1	Génération de l'information binaire à transmettre	3
1.2.2	Mapping	3
1.2.3	Suréchantillonnage	3
1.2.4	Filtrage de mise en forme	3
1.2.5	Canal de transmission AWGN	3
1.2.6	Filtrage de réception	4
1.2.7	Echantillonnage	4
1.2.8	Décisions	4
1.2.9	Demapping	4
2	Première chaine à étudier : "chaine de référence"	4
2.1	Etude théorique	4
2.2	Implantation sous Matlab (cette chaine servira de chaine de référence pour la suite)	5
3	Deuxième chaine à étudier : impact du choix du filtre de réception	5
3.1	Etude théorique	6
3.2	Implantation sous Matlab	6
4	Troisième chaine à étudier : impact du choix du filtre de mise en forme et d'un canal de propagation à bande limitée	7
4.1	Etude théorique	7
4.2	Implantation sous Matlab	7
5	Quatrième chaine à étudier : impact du choix du mapping	8
5.1	Etude théorique	8
5.2	Implantation sous Matlab	9
6	Conclusion	9
7	Références	9

List of Figures

1	Chaîne de transmission en bande de base	3
2	Produit de convolution entre $h(t)$ et $h_r(t)$	4
3	Réponses impulsionnelles des filtres d'émission et de réception.	5
4	Produit de convolution entre $h(t)$ et $h_r(t)$	6

1 Introduction

1.1 Objectifs du travail réalisé

[A compléter](#)

1.2 Schéma général des chaines à étudier (canal AWGN)

La figure 1 présente le schéma général des chaines à étudier.

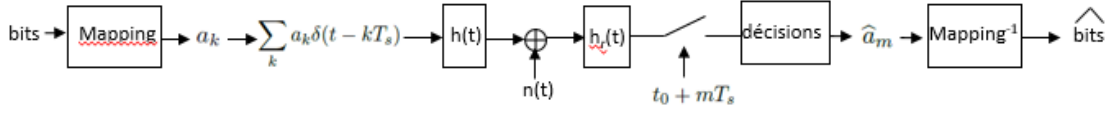


Figure 1: Chaîne de transmission en bande de base

1.2.1 Génération de l'information binaire à transmettre

La génération de l'information binaire à transmettre (bits 0 et 1 équiprobables et indépendants) pourra être réalisée grâce à la fonction *randi* de Matlab.

1.2.2 Mapping

Un mapping devra être réalisé afin de passer de l'information binaire aux symboles a_k . Le mapping est un des éléments qui pourra différer selon les chaines de transmission à étudier et implanter.

1.2.3 Suréchantillonnage

La suite d'impulsions de Dirac espacées de la durée symbole T_s et pondérées par les symboles a_k issus du mapping sera générée, en numérique, en insérant $N_s - 1$ zéros entre deux symboles a_k , si N_s représente le nombre d'échantillons utilisés par symbole (ou facteur de suréchantillonnage : $T_s = N_s T_e$, T_e étant la période d'échantillonnage). N_s devra être déterminé pour que le signal numérique généré respecte la condition d'échantillonnage de Shannon.

1.2.4 Filtrage de mise en forme

La réponse impulsionnelle, $h(t)$, du filtre de mise en forme est un des éléments qui pourra différer selon les chaines de transmission à étudier et implanter. Ne seront implantés que des filtres de type RIF (à réponse impulsionnelle finie). Une fois la réponse impulsionnelle numérique générée ($h = [h(0)h(1)...h(N-1)]$, si N représente l'ordre du filtre), le filtrage pourra être réalisé en utilisant la fonction *filter* de matlab : `signal_filtre=filter(h,1,signal_a_filtre)` (attention alors au retard dû à la causalité du filtre) ou bien en utilisant la fonction *conv.m*, comme lors des TP de traitement du signal.

1.2.5 Canal de transmission AWGN

Le canal de transmission est supposé à bruit, $n(t)$, additif blanc et Gaussien, de densité spectrale de puissance égale à $\frac{N_0}{2}$ quelle que soit la fréquence. Pour les simulations, ce bruit sera généré sur la bande F_e (fréquence d'échantillonnage), grâce à la fonction *randn* de matlab, avec plusieurs puissances différentes, notées σ_n^2 : `bruit = sigma_n * randn(1,length(r))`; si r représente le vecteur d'échantillons de signal à l'entrée du récepteur. On calculera la puissance du bruit σ_n^2 , en fonction des rapports signal à bruit par bit souhaités à l'entrée du récepteur $\frac{E_b}{N_0}$, de la manière suivante (voir démonstration en annexe):

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

où N_s représente le facteur de suréchantillonnage, M l'ordre de la modulation et P_r la puissance du signal r qui peut être obtenue sous matlab de la manière suivante : `P_r = mean(abs(r).^2)`.

1.2.6 Filtrage de réception

La réponse impulsionnelle, $h_r(t)$, du filtre de mise de réception est un des éléments qui pourra différer selon les chaînes de transmission à étudier et implanter. Ne seront implantés que des filtres de type RIF (à réponse impulsionnelle finie). Une fois la réponse impulsionnelle numérique générée ($hr = [hr(0)hr(1)...hr(N-1)]$, si N représente l'ordre du filtre), le filtrage pourra être réalisé en utilisant la fonction *filter* de matlab : `signal_filtre=filter(hr,1,signal_a_filtre)` (attention alors au retard dû à la causalité du filtre) ou bien en utilisant la fonction *conv.m*, comme lors des TPs de traitement du signal.

1.2.7 Echantillonnage

Le signal filtré devra être échantillonné à $t_0 + mT_s$ pour revenir au rythme symbole. L'instant d'échantillonnage optimal t_0 pourra être déterminé dans l'étude théorique de la chaîne à implanter et retrouvé grâce au tracé d'un diagramme de l'oeil sans bruit en sortie du filtre de réception.

1.2.8 Décisions

Un détecteur à seuil permettra de prendre les décisions sur les symboles à partir du signal échantillonné. Le seuil optimal devra être déterminé dans l'étude théorique de la chaîne à implanter et retrouvé grâce au tracé d'un diagramme de l'oeil sans bruit en sortie du filtre de réception.

1.2.9 Demapping

Un demapping devra être réalisé en vue de comparer les bits reçus aux bits émis dans l'objectif de calculer le taux d'erreur binaire simulé de la transmission, TEB simulé qui devra être comparé au TEB théorique déterminé dans l'étude théorique de la chaîne en question.

2 Première chaîne à étudier : "chaîne de référence"

On considérera un mapping binaire à moyenne nulle (symboles $a_k \in \{-1, 1\}$) et des réponses impulsionnelles des filtres de mise en forme et de réception, $h(t)$ et $h_r(t)$, rectangulaires de durée T_s . Le résultat du produit de convolution entre $h(t)$ et $h_r(t)$ est donné dans la figure 2.

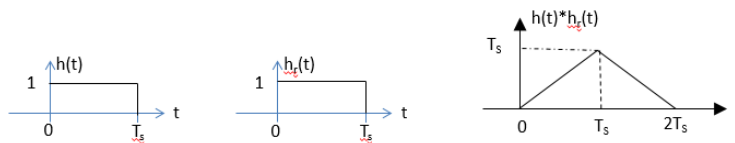


Figure 2: Produit de convolution entre $h(t)$ et $h_r(t)$.

2.1 Etude théorique

1. Calculer la densité spectrale de puissance (DSP) du signal transmis. Quelle est, en théorie, la bande nécessaire à la transmission d'un tel signal ?
2. La chaîne de communication peut-elle vérifier le critère de Nyquist ? Justifiez votre réponse.
3. Sans bruit, tracer le signal $z(t)$ en sortie du filtre de réception $h_r(t)$ pour la suite de bits émise suivante : 0110100. Retrouve-t-on sur ce signal le fait que la chaîne de transmission puisse respecter le critère de Nyquist ?
4. Toujours sans bruit, tracer le diagramme de l'oeil avec une base de temps de T_s . Retrouve-t-on sur le diagramme de l'oeil le fait que la chaîne de transmission puisse respecter le critère de Nyquist ?
5. En supposant que l'on échantillonne aux instants optimaux (sans ISI), calculer le rapport signal sur bruit aux instants d'échantillonnage (on admettra que la puissance du bruit échantillonné et filtré est identique à celle du bruit filtré et on calculera donc cette puissance en sortie du filtre de réception).

6. On choisira d'utiliser un détecteur à seuil. Déterminer le seuil optimal à utiliser en expliquant votre choix.
7. En supposant que l'on échantillonne aux instants optimaux et que l'on utilise le seuil optimal de décision, donner le taux d'erreur binaire de la transmission en fonction de T_s et σ , σ^2 représentant la puissance du bruit en sortie du filtre de réception $h_r(t)$.
8. Calculer la puissance du bruit en sortie du filtre de réception σ^2 en fonction de N_0 et de T_s .
9. Calculer l'énergie des symboles à l'entrée du récepteur, E_s , en fonction de T_s .
10. Dédire des questions précédentes l'expression du taux d'erreur binaire (TEB) en fonction de E_b/N_0 pour la chaîne étudiée.

2.2 Implantation sous Matlab (cette chaîne servira de chaîne de référence pour la suite)

1. Générer dans un premier temps le signal à transmettre en tronquant la bande occupée à une fréquence maximale égale à $\frac{4}{T_s}$. En utilisant un périodogramme estimer puis tracer la densité spectrale de puissance du signal transmis. Expliquer le résultat obtenu.
2. Implantation de la chaîne sans bruit :
 - (a) Tracer le signal en sortie du filtre de réception. Ce tracé est-il conforme à ce que vous attendiez (voir étude théorique) ?
 - (b) Tracer un diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception afin de déterminer les instants optimaux d'échantillonnage. Les résultats obtenus sont-ils conformes à la théorie ? Expliquez votre réponse.
 - (c) En utilisant les instants optimaux d'échantillonnage puis un détecteur à seuil, avec seuil optimal, vérifier que le TEB obtenu est bien nul.
3. Implantation de la chaîne avec bruit : rajouter le bruit et tracer le taux d'erreur binaire obtenu en fonction du rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur (E_b/N_0) en décibels¹. On prendra des valeurs de $(E_b/N_0)_{dB}$ allant de 0 à 6 dB.
4. Comparer le TEB simulé au TEB théorique de la chaîne étudiée (tracé superposés sur une même figure). Ce tracé doit permettre de valider le bon fonctionnement de votre chaîne de transmission. La fonction $Q(x)$ peut-être obtenue sous Matlab en utilisant *qfunc.m*.

3 Deuxième chaîne à étudier : impact du choix du filtre de réception

On considérera un mapping binaire à moyenne nulle (symboles $a_k \in \{-1, 1\}$) et les réponses impulsionnelles des filtres de mise en forme et de réception, $h(t)$ et $h_r(t)$, données par la figure 3. Le résultat du produit de convolution entre $h(t)$ et $h_r(t)$ est donné dans la figure 4.

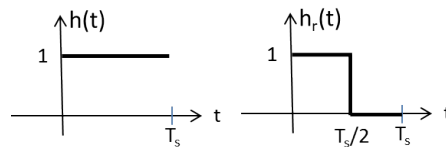


Figure 3: Réponses impulsionnelles des filtres d'émission et de réception.

¹Attention les TEBs devront être tracés en échelle log et on fera attention à la précision des mesures réalisées (voir en annexe)

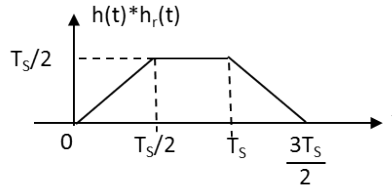


Figure 4: Produit de convolution entre $h(t)$ et $h_r(t)$.

3.1 Etude théorique

1. La chaîne de communication peut-elle vérifier le critère de Nyquist ? Justifiez votre réponse.
2. Sans bruit, tracer le signal $z(t)$ en sortie du filtre de réception $h_r(t)$ pour la suite de bits émise suivante : 0110100. Retrouve-t-on sur ce signal le fait que la chaîne de transmission puisse respecter le critère de Nyquist ? Expliquez votre réponse.
3. Toujours sans bruit, tracer le diagramme de l'oeil avec une base de temps de T_s . Retrouve-t-on sur le diagramme de l'oeil le fait que la chaîne de transmission puisse respecter le critère de Nyquist ? Justifiez votre réponse.
4. En supposant que l'on échantillonne aux instants optimaux (sans ISI), calculer le rapport signal sur bruit aux instants d'échantillonnage (on admettra que la puissance du bruit échantillonné et filtré est identique à celle du bruit filtré et on calculera donc cette puissance en sortie du filtre de réception). Comparer le rapport signal sur bruit obtenu ici avec celui obtenu dans la chaîne de référence. Que peut-on supposer sur la comparaison des TEBs des deux chaînes de transmission ?
5. On choisira d'utiliser un détecteur à seuil. Déterminer le seuil optimal à utiliser en expliquant votre choix.
6. En supposant que l'on échantillonne aux instants optimaux et que l'on utilise le seuil optimal de décision, donner le taux d'erreur binaire de la transmission en fonction de T_s et σ , σ^2 représentant la puissance du bruit en sortie du filtre de réception $h_r(t)$.
7. Calculer la puissance du bruit en sortie du filtre de réception σ^2 en fonction de N_0 et de T_s .
8. Calculer l'énergie des symboles à l'entrée du récepteur, E_s , en fonction de T_s .
9. Dédurre des questions précédentes l'expression du taux d'erreur binaire en fonction de E_b/N_0 pour la chaîne étudiée.

3.2 Implantation sous Matlab

1. Implantation de la chaîne sans bruit (le signal à transmettre sera généré en tronquant la bande occupée à une fréquence maximale égale à $\frac{4}{T_s}$)
 - (a) Tracer le signal en sortie du filtre de réception. Ce tracé est-il conforme à ce que vous attendiez (voir étude théorique) ?
 - (b) Tracer un diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception afin de déterminer les instants optimaux d'échantillonnage. Les résultats obtenus sont-ils conformes à la théorie ? Expliquez votre réponse.
 - (c) En utilisant les instants optimaux d'échantillonnage puis un détecteur à seuil, avec seuil optimal, vérifier que le TEB obtenu est bien nul.
2. Implantation de la chaîne avec bruit : rajouter le bruit et tracer le 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. On prendra des valeurs de $(E_b/N_0)_{dB}$ allant de 0 à 6 dB.
3. Comparer le TEB simulé au TEB théorique de la chaîne étudiée (tracé superposés sur une même figure). Ce tracé doit permettre de valider le bon fonctionnement de votre chaîne de transmission.

4. Comparer le TEB obtenu par simulation pour la chaîne de transmission étudiée au TEB obtenu par simulation (ou au TEB théorique) de la chaîne de référence (comparaison en termes d'efficacité en puissance). La similitude ou différence obtenue devra être expliquée. La chaîne éventuellement la plus efficace en puissance devra être identifiée, en expliquant pourquoi.
5. Comparer l'efficacité spectrale de la chaîne étudiée avec celle de la chaîne de référence (en traçant, par exemple, les DSPs des signaux transmis dans les deux cas pour un même débit binaire). La similitude ou différence obtenue devra être expliquée. La chaîne éventuellement la plus efficace spectralement devra être identifiée, en expliquant pourquoi.

4 Troisième chaîne à étudier : impact du choix du filtre de mise en forme et d'un canal de propagation à bande limitée

On considérera un mapping binaire à moyenne nulle (symboles $a_k \in \{-1, 1\}$) et des réponses impulsionnelles des filtres de mise en forme et de réception, $h(t)$ et $h_r(t)$, en racine de cosinus surélevé de même roll off $\alpha = 0.5$. Le résultat du produit de convolution entre $h(t)$ et $h_r(t)$ est donc un cosinus surélevé de roll off 0.5.

4.1 Etude théorique

1. La chaîne de communication peut-elle vérifier le critère de Nyquist ? Justifiez votre réponse.
2. La chaîne de communication vérifie-t-elle le critère de filtrage adapté ? Justifiez votre réponse.
3. Donner (sans le calculer) le taux d'erreur binaire théorique de la transmission, en justifiant votre choix de formule.
4. A quelle condition, sur le rythme symbole R_s , pourrait-on transmettre le signal généré par le modulateur proposé dans un canal de transmission idéal de bande $BW = 1500$ Hz, tout en continuant de respecter le critère de Nyquist ?
5. Afin d'implanter la chaîne de transmission en numérique, quelle est la fréquence d'échantillonnage minimum à utiliser ? En déduire le facteur de suréchantillonnage minimal à utiliser.

4.2 Implantation sous Matlab

1. On utilisera les paramètres suivants : fréquence d'échantillonnage $F_e = 12000$ Hz, rythme symbole $R_s = 3000$ symboles par seconde, roll off du filtre de mise en forme et du filtre de réception $\alpha = 0.5$.
2. Implantation de la chaîne sans bruit :
 - (a) Le facteur de suréchantillonnage utilisé ici permet-il de respecter la condition d'échantillonnage de Shannon ? Justifiez votre réponse.
 - (b) Tracer le signal en sortie du filtre de réception. Ce tracé est-il conforme à ce que vous attendiez (voir étude théorique) ? Expliquez votre réponse.
 - (c) Tracer un diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception afin de déterminer les instants optimaux d'échantillonnage. Les résultats obtenus sont-ils conformes à la théorie ? Justifiez votre réponse.
 - (d) En utilisant les instants optimaux d'échantillonnage puis un détecteur à seuil, avec seuil optimal, vérifier que le TEB obtenu est bien nul. Attention ici aux retards introduits par les filtres de la chaîne de transmission qui excèdent la durée d'un symbole.
3. Implantation de la chaîne avec bruit : rajouter le bruit et tracer le taux d'erreur binaire (TEB) obtenu en fonction du rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur (E_b/N_0) en décibels. On prendra des valeurs de $(E_b/N_0)_{dB}$ allant de 0 à 6 dB.
4. Comparer le TEB simulé au TEB théorique de la chaîne étudiée (tracé superposés sur une même figure). Ce tracé doit permettre de valider le bon fonctionnement de votre chaîne de transmission.

5. Comparer le TEB obtenu par simulation pour la chaîne de transmission étudiée au TEB obtenu par simulation (ou au TEB théorique) de la chaîne de référence (comparaison en termes d'efficacité en puissance). La similitude ou différence obtenue devra être expliquée. La chaîne éventuellement la plus efficace en puissance devra être identifiée, en expliquant pourquoi.
6. Comparer l'efficacité spectrale de la chaîne étudiée avec celle de la chaîne de référence (en traçant les DSPs des signaux transmis dans les deux cas pour un même débit binaire). La similitude ou différence obtenue devra être expliquée. La chaîne éventuellement la plus efficace spectralement devra être identifiée, en expliquant pourquoi.
7. Reprendre à la chaîne de transmission sans bruit et introduire un passage dans un canal de transmission
 - (a) de bande $BW = 1500$ Hz (implanté comme un filtre passe bas de fréquence de coupure 1500 Hz : voir TPs et projet de traitement du signal).
 - (b) de bande $BW = 3000$ Hz (implanté comme un filtre passe bas de fréquence de coupure 3000 Hz : voir TPs et projet de traitement du signal).

Dans chaque cas tracer un diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception et expliquer les résultats obtenus, les différences observées. Sont-ils conformes avec votre étude théorique ?

5 Quatrième chaîne à étudier : impact du choix du mapping

On considérera un mapping 4-aire à moyenne nulle (symboles $a_k \in \{-3, -1, 1, 3\}$) et des réponses impulsionnelles des filtres de mise en forme et de réception, $h(t)$ et $h_r(t)$, rectangulaire de durée T_s .

5.1 Etude théorique

1. Proposer un instant optimal t_0 pour démarrer l'échantillonnage en expliquant votre choix. On échantillonnera alors aux instants optimaux $t_0 + mT_s$, $m = 0, 1, 2, \dots$
2. En supposant que l'on utilise un détecteur à seuil pour prendre les décisions, quels sont les seuils optimaux à utiliser ? Justifiez votre réponse.
3. On suppose que l'on échantillonne aux instants optimaux et que l'on utilise un détecteur à seuil avec seuils optimaux. En utilisant le mapping suivant : 00 : -3, 01 : -1, 11 : +1, 10 : +3 :
 - (a) Calculer la probabilité de détecter (en sortie du bloc décision) le symbole -1 alors que l'on a émis -3.
 - (b) Calculer la probabilité de détecter (en sortie du bloc décision) le symbole +1 alors que l'on a émis -3.
 - (c) Calculer la probabilité de détecter (en sortie du bloc décision) le symbole +3 alors que l'on a émis -3.
 - (d) AN : $N_0 = 10^{-3} V^2 / Hz$, $R_b = 1$ kbps.
 - (e) La règle de codage choisie pour le mapping vous paraît-elle intéressante ? Si oui, quel est son intérêt ?
 - (f) Sachant que le taux d'erreur symbole de la liaison est donné par :

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

Avec la règle de codage choisie pour le mapping donnez le taux d'erreur binaire (TEB) de la liaison, en expliquant votre réponse.

5.2 Implantation sous Matlab

1. Implantation de la chaine sans bruit : on l'implantera en utilisant le mapping suivant : 00 : -3, 01 : -1, 10 : +1, 11 : +3 (voir en annexe). Attention le mapping est différent de celui proposé dans l'étude théorique précédente.
 - (a) Tracer le signal en sortie du filtre d'émission, ainsi que sa densité spectrale de puissance. Ces tracés sont-ils conformes à la théorie ?
 - (b) Comparer l'efficacité spectrale de la chaine étudiée avec celle de la chaine de référence (en superposant les tracés des DSPs des signaux transmis dans les deux cas pour un même débit binaire). La similitude ou différence obtenue devra être expliquée. La chaine éventuellement la plus efficace spectralement devra être identifiée, en expliquant pourquoi.
 - (c) Tracer un diagramme de l'oeil en sortie du filtre de réception afin de déterminer les instants optimaux d'échantillonnage et les seuils optimaux de décision (détecteur à seuil). Les résultats obtenus sont-ils conformes à la théorie ? Expliquez votre réponse.
 - (d) En utilisant les instants optimaux d'échantillonnage puis un détecteur à seuil, avec seuils optimaux, vérifier que le TEB obtenu est bien nul.
2. Rajouter le bruit et tracer le taux d'erreur symbole (TES) obtenu en fonction du rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur (E_b/N_0) en décibels. On prendra des valeurs de $(E_b/N_0)_{dB}$ allant de 0 à 6 dB.
3. Comparer le TES obtenu par simulation sur la chaine implantée au TES donné pour la chaine étudiée dans l'étude théorique. La similitude ou différence obtenue devra être expliquée.
4. Tracer le taux d'erreur binaire (TEB) obtenu en fonction du rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur (E_b/N_0) en décibels. On prendra des valeurs de $(E_b/N_0)_{dB}$ allant de 0 à 6 dB.
5. Comparer le TEB obtenu par simulation sur la chaine implantée au TEB donné pour la chaine étudiée dans l'étude théorique. La similitude ou différence obtenue devra être expliquée. La chaine éventuellement la plus efficace en puissance devra être identifiée, en expliquant pourquoi.

6 Conclusion

[A compléter](#)

7 Références

[A compléter](#)