

# TP de communications numériques

## module TS113 – année 2013/2014

Guillaume Ferré

### 1 Objectifs et évaluation

L'objectif des TP de communications numériques est de simuler à l'aide du logiciel Matlab plusieurs chaînes de communications numériques (en bande de base et sur fréquence porteuse) afin d'évaluer notamment leurs performances en termes de probabilité d'erreur binaire.

Les TP se font en **binôme ou monôme** et l'évaluation porte sur une note de rapport et une note de travail continu (en séances).

Concernant le rapport, il ne doit pas excéder **15 pages**, vous devez fournir un document scientifique et technique, qui doit présenter votre travail, vos choix techniques et dans lequel tous les résultats obtenus doivent être interprétés et commentés. Les codes Matlab doivent également être transmis à votre enseignant. Ils doivent pouvoir être compris rapidement. Cela passe par l'utilisation de commentaires. Les commentaires doivent permettre de répondre au moins à la question : que fait la ligne de code ? Une attention particulière doit être portée à la lisibilité du programme. Les rapports doivent être au format NOM1\_NOM2.pdf et les codes au format NOM1\_NOM2.zip. Ces deux fichiers doivent être transmis à votre encadrant par Email au **plus tard deux semaines après la dernière séance de TP, sachant que la date exacte vous sera fixée par votre encadrant.**

*Remarque : chaque jour de retard dans la remise des livrables sera sanctionné de 2 points en moins sur la note finale du TP.*

### 2 Squelette des codes Matlab

Afin d'avoir une formalisation homogène de vos codes Matlab, veuillez respecter le squelette d'implémentation suivant :

```
%% noms des binômes
clear all;close all;
%% Initialisation des variables
%% Emetteur
%% Canal
%% Récepteur
%% Figures de résultats
```

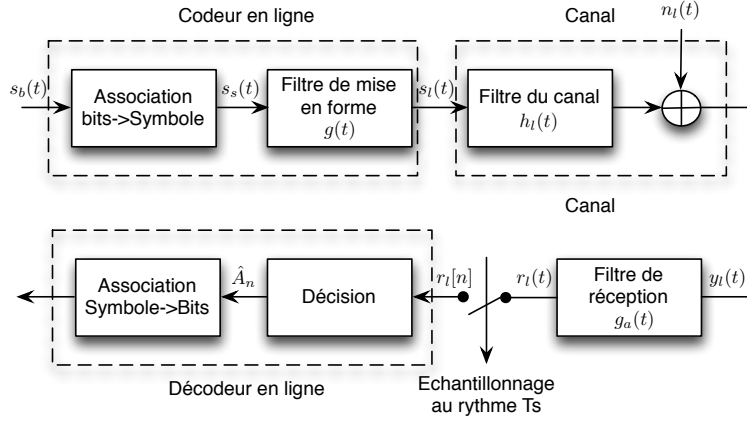


FIGURE 1 – Architecture Bande de base simplifiée

### 3 Communications numériques en bande de base

Dans cette première partie vous allez vous intéresser au cas des communications numériques en bande de base émettant des symboles  $M$ -PAM. L'architecture bande de base à considérer est présentée sur la figure 1.

A travers la simulation Matlab, vous vérifierez entre autre une partie de vos résultats théoriques de TD et évalueriez les performances de la chaîne de communications numériques en terme de probabilité d'erreur binaire.

**Paramètres de simulation :**

- Fréquence d'échantillonnage :  $f_e = \frac{1}{T_e} = 10\text{kHz}$ ,
- Le débit symbole  $D_s = 1\text{kSymboles/s} \Rightarrow T_s = 1\text{ms}$ ,
- Le filtre de mise en forme est :

$$g(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < T_s \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}.$$

- La séquence de bits doit être générée aléatoirement de manière uniforme (i.e.  $\mathbb{P}(b_k = 0) = \mathbb{P}(b_k = 1) = \frac{1}{2}$ ),
- $F_{se} = \frac{T_s}{T_e}$  représente le facteur de sur-échantillonnage permettant d'adapter le rythme du signal présenté en entrée du filtre de mise en forme,
- Les symboles  $A_k$  sont iid et  $A_k \in \{\pm 1, \pm 3, \dots, \pm(M-1)\}$ ,
- Le nombre de symboles à émettre par paquet est  $N_s = 5000$ ,
- Toutes les transformées de Fourier (TF) seront faites sur  $N = 512$  points, et vous représenterez les modules des différents spectres entre  $[-\frac{f_e}{2}, \frac{f_e}{2} - \frac{f_e}{N}]$ .

#### 3.1 Simulation du cas 2-PAM (main\_2PAM.m)

Dans cette partie  $M=2$ , le filtre de mise en forme est  $g(t)$ , les hypothèses sur le canal de propagation et le bruit sont les mêmes que celles de l'étude théorique faite en TD et le mapping est le suivant : si  $b_k = 0 \Rightarrow A_k = -1$  et si  $b_k = 1 \Rightarrow A_k = +1$ .

⇒ A partir des paramètres de simulations et en vous servant des fonctions Matlab

décrites dans la section 5, coder la chaîne de communications numériques en complétant le squelette Matlab présenté dans la section précédente. Vous nommerez votre code Matlab : `main_2PAM.m`. Afin de valider votre chaîne de communications numériques, vérifier que les bits estimés en sortie du bloc "Association Symbole→bits" sont bien les mêmes que les bits émis, lorsque la variance du bruit  $n_l(t)$  vaut  $\sigma_{n_l}^2 = 0$ . Pour cela calculer le taux d'erreur binaire (TEB).

Une fois l'étape précédente validée, tracer et interpréter les figures suivantes sachant que *chaque figure doit être interprétée et doit comporter un titre, des labels, des unités et une légende*.

1. Allure temporelle du signal  $s_l(t)$  pour  $t \in [0, 50T_s - T_e]$ ,
2. Diagramme de l'oeil de  $s_l(t)$  sur les 1000 premiers symboles, en superposant des signaux de durée  $3T_s$ ,
3. L'allure du signal  $r_l(t)$  pour  $t \in [0, 50T_s - T_e]$  en sortie du filtre adapté. En déduire le retard introduit par la causalité des filtres sur la prise de décision du premier symbole reçu.
4. DSP<sup>1</sup> de  $s_s(t)$  et de  $s_l(t)$  à comparer avec les DSP théoriques,
5. L'évolution du TEB<sup>2</sup> en fonction de rapport  $\frac{E_b}{N_0}$  en dB, lorsque ce dernier varie de 0dB à 10dB par pas de 1dB. Superposer cette courbe avec celle de la probabilité d'erreur binaire théorique dans le cas 2-PAM :  $P_b = \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right)$ . Que constatez-vous ?
6. Refaire la même manipulation que précédemment mais en introduisant une erreur de synchronisation temporelle en sortie de filtre adapté au moment de l'échantillonnage de  $r_l(t)$  au rythme  $T_s$ . Cette erreur sera prise égale à 10% de  $T_s$  soit un nombre de  $10\%F_{se}$  échantillons. Que constatez vous ? Quel phénomène introduit cette erreur de synchronisation ?
7. Quelle est en dB la perte de sensibilité du récepteur si la qualité de service de la transmission est telle que le  $\text{TEB} < 10^{-3}$  ?
8. Reprendre toutes les questions précédentes (i.e. de 1 à 7) en prenant cette fois-ci le filtre de mise en forme  $g(t) = g_t(t)$ , sachant que :

$$g_t(t) = \begin{cases} (1 - \frac{t}{T_s}) & 0 \leq t \leq T_s \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}.$$

9. Dresser un bilan comparatif de l'utilisation des deux filtres de mise en forme (DSP, efficacité spectrale,  $P_b$ , sensibilité à la désynchronisation temporelle, etc.).

## 4 Communications numériques sur fréquence porteuse

Dans cette deuxième partie vous allez vous intéresser au cas des communications numériques sur fréquence porteuse émettant des symboles QPSK ( $M = 4$ ), dans le cadre d'un canal à bande passante infinie puis limitée. L'architecture à considérer est présentée sur la figure 2.

---

1. Le calcul des DSP expérimentales se fera en utilisant la méthode du périodogramme de Welch décrite en cours (sans fenêtrage ni chevauchement), pour cela vous découperez le signal  $s_l(t)$  en signaux de  $N$  échantillons.

2. On considère le point  $\text{TEB} = f(\frac{E_b}{N_0})$  comme probable si il est obtenu avec un minimum de 100 erreurs binaires de transmission.

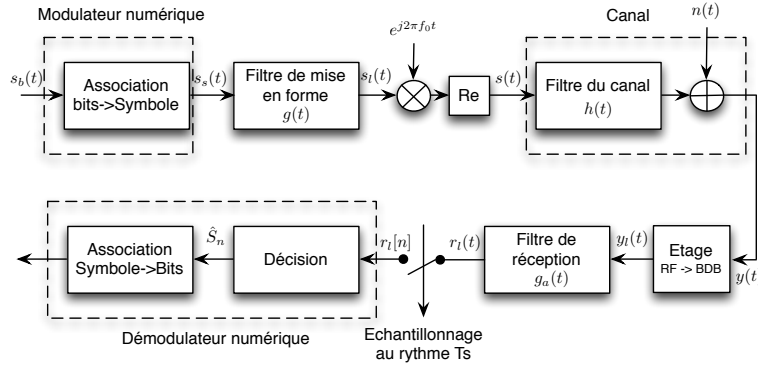


FIGURE 2 – Chaîne de communications numériques sur fréquence porteuse

## 4.1 Etude théorique

1. Décrire le principe de fonctionnement d'un modulateur et d'un démodulateur numérique QPSK respectant le mapping suivant :

$$\begin{aligned}
 \text{"00"} &\rightarrow e^{j\frac{\pi}{4}}, \text{"01"} \rightarrow e^{j\frac{3\pi}{4}}, \text{"11"} \rightarrow e^{j\frac{5\pi}{4}}, \text{"10"} \rightarrow e^{j\frac{7\pi}{4}}.
 \end{aligned}$$

2. Donner l'expression théorique de la fonction de transfert  $G(f)$  d'un filtre en racine de cosinus sur-élevé de roll-off  $\alpha$ ,
3. Donner l'expression de la DSP théorique de  $s(t)$  lorsque le filtre de mise en forme est un filtre en racine de cosinus sur-élevé.

## 4.2 Etude Expérimentale - Canal à bande passante infinie

Pour réaliser cette étude, reprendre et adapter les codes Matlab développés pour le cas 2-PAM.

⇒ Hypothèses :

- le canal de propagation  $h(t)$  est supposé à bande passante infinie,
- le bruit  $n(t)$  est supposé blanc, gaussien de variance  $\sigma_n^2$  et de densité spectrale de puissance (DSP) bilatérale  $\Gamma_n(f) = \frac{N_0}{2}$ .

### 4.2.1 Canal à bande passante infinie (main\_QPSK\_v1.m)

Dans cette section, vous allez simuler une chaîne de communications numériques émettant des symboles QPSK sur un canal à bande passante infinie. Vous vérifierez la cohérence des résultats théoriques obtenus en cours avec la simulation et évaluez les performances de la chaîne de communications numériques en terme de probabilité d'erreur binaire.

**Paramètres de simulation :**

- Fréquence d'échantillonnage :  $f_e = \frac{1}{T_e} = 10\text{kHz}$ ,
- Le débit symbole  $D_s = 1\text{kSymboles/s} \Rightarrow T_s = 1\text{ms}$ ,
- Le nombre de symboles de la constellation est  $M = 4$ ,
- La fréquence de la porteuse  $f_0 = 2,5\text{kHz}$ ,

- Le filtre de mise en forme  $g(t)$  est un filtre en racine de cosinus sur-élevé de roll-off  $\alpha = 0.5$  et de temps de propagation de groupe  $T_g = 4T_s$ ,
  - La séquence de bits doit être générée aléatoirement de manière uniforme (i.e.  $\mathbb{P}(b_k = 0) = \mathbb{P}(b_k = 1) = \frac{1}{2}$ ),
  - $F_{se} = \frac{T_s}{T_e}$  représente le facteur de sur-échantillonnage permettant d'adapter le rythme du signal présenté en entrée du filtre de mise en forme,
  - Le nombre de symboles à émettre par paquet est  $N_s = 5000$ ,
  - Toutes les transformées de Fourier (TF) seront faites sur  $N = 512$  points, et vous représenterez les modules des différents spectres entre  $[-\frac{f_e}{2}, \frac{f_e}{2} - \frac{f_e}{N}]$ .
1. Tracer la réponse impulsionnelle ainsi que le module de la fonction de transfert du filtre en racine de cosinus sur-élevé défini dans les paramètres de simulation. Pour cela utiliser la fonction "rcosfir.m" ( $T_g = 4T_s$  et  $\alpha = 0.5$ ).
  2. A partir notamment des fonctions "bi2de.m", "pskmod.m", "pskdemod.m" et de "de2bi.m", implémenter un modulateur numérique QPSK et son démodulateur en prenant une phase initiale de  $\frac{\pi}{4}$ .  
 ⇒ Remarque : l'utilisation des fonctions précédentes rend le programme adaptable aux modulations M-ASK (M-PAM) et M-APK (M-QAM), puisqu'il suffit de remplacer pskmod() par qammod()/pammod() et pskdemod() par qamdemod()/pamdemod(), etc.
  3. Rester en bande de base (cf Fig. 3) est vérifier le fonctionnement de votre chaîne de communication sans-bruit (TEB=0).  
Indications : En sortie du filtre adapté, veillez à tenir compte du retard introduit par la causalité des filtres (mise en forme et adapté) afin de récupérer au bon instant le premier échantillon de symbole détecté.
  4. Tracer le diagramme de l'oeil de  $s_I(t)$ , que constatez-vous ? Interprétez.
  5. Tracer le diagramme de l'oeil de  $r_I(t)$ , que constatez-vous ? Interprétez.
  6. Tracer les constellations de  $s_s(t)$  et de  $r_I[n]$ , que constatez-vous ? Interprétez.
  7. Tracer l'allure de la partie réelle de  $r_I(t)$  sur une durée de  $50T_s$ . Retrouver le retard introduit par la causalité des filtres de mise en forme et adapté sur l'instant de décision du premier symbole reçu.
  8. Générer une porteuse complexe à  $f_0 = 2500\text{Hz}$ , multiplier ce signal à l'enveloppe complexe  $s_I(t)$  puis émettre  $s(t)$  sur un canal de propagation  $h(t)$  à bande passante infinie.
  9. Comparer la DSP théorique de  $s(t)$  avec la DSP expérimentale (obtenue par la méthode de Welch).
  10. Afin de reconstruire l'enveloppe complexe au récepteur, mettre en oeuvre avant le filtrage adapté la méthode par projections orthogonales (cf. Fig. 4).  
 Remarque : dans le cadre de la simulation vous n'avez pas besoin de mettre en oeuvre les filtres passe-bas après les mélangeurs<sup>3</sup>.
  11. Au récepteur, tracer la DSP du PA  $y_I(t)$  obtenu après le mélangeur sur la voix en phase. Interprétez ce résultat expérimental.
  12. Adapter le calcul de  $E_b$  afin d'évaluer correctement la variance du bruit en entrée du récepteur.
  13. Tracer l'évolution  $\text{TEB} = f(\frac{E_b}{N_0})$  et comparer avec le résultat théorique de la probabilité d'erreur binaire  $P_b$  d'une QPSK.

---

3. En effet, le filtrage de la composante à  $2f_0$  après les mélangeurs en réception est obtenu par le filtre adapté.

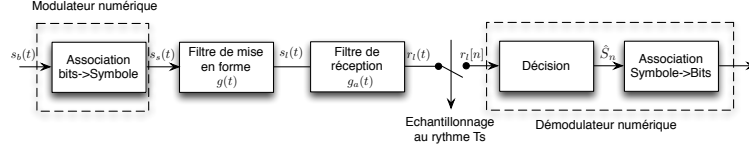


FIGURE 3 – Chaîne de communications numériques complexe BDB

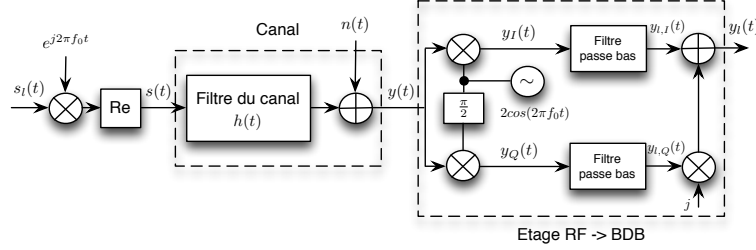


FIGURE 4 – Architecture de réception par projections orthogonales

⇒ **Bonus :**

1. Que se passe-t'il si l'oscillateur local en réception est déphasé par rapport à l'oscillateur local de l'émetteur ?
2. Déphaser l'oscillateur local en réception de  $\frac{\pi}{6}$ , tracer la constellation des symboles estimés après filtrage adapté pour un  $\frac{E_b}{N_0}=10\text{dB}$ , que constatez-vous ? quelle méthode proposez-vous pour corriger cette distorsion ?

#### 4.2.2 Canal à bande passante limitée (main\_QPSK\_v2.m)

Le canal de propagation  $h(t)$  n'est plus supposé à bande passante infinie. En effet, ce dernier se comporte désormais comme un filtre passe bande réel centré en  $f_0$  de bande passante égale à  $D_s$ . Cependant, pour la simulation Matlab nous allons considérer un modèle bande de base (i.e. sans les étages RF Tx/Rx, cf. Fig. 5). L'effet du canal de propagation sera donc celui du filtre  $h_l(t)$  équivalent en BDB à  $h(t)$ .  $h_l(t)$  sera alors modélisé comme un filtre passe-bas de bande passante  $\frac{D_s}{2}$ .

1. Adapter le code "main\_QPSK\_v1.m" afin de simuler le modèle présenté sur la Fig. 5.  
Remarque 1 :  $E_b$  n'est plus seulement fonction de l'énergie de  $g(t)$ , mais de l'énergie de la convolution entre  $g(t)$  et  $h_l(t)$ ,

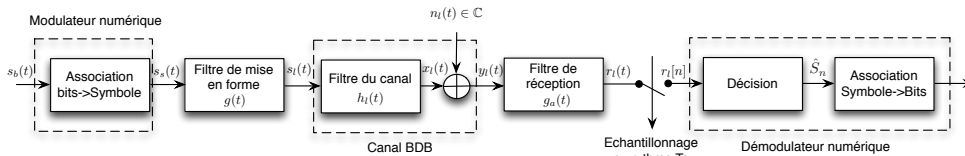


FIGURE 5 – Architecture BDB complexe

Remarque 2 : Le bruit doit être complexe,

Remarque 3 : Afin de simuler l'effet du canal de propagation, convoluer  $s_l(t)$  avec  $h_l(t)$ , sachant que la réponse impulsionnelle de ce dernier se simule ainsi :

---

```

h_order=2*Fse; % ordre du filtre modélisant l'effet du canal
delay_h=floor((h_order)/2); % Temps de propagation de groupe (en échantillons) du filtre du canal
BW_h=Ds/2; % bande passante à 3dB du filtre du canal
h_l=fir1(h_order,(BW_h)/(fe/2)); % RI du canal de propagation

```

---

2. A l'aide de la fonction "freqz.m" tracer le module et la phase de  $h_l(t)$ . En déduire le temps de propagation de groupe du filtre  $T_g = -\frac{1}{2\pi} \frac{d \arg(H_l(f))}{df}$ , où  $H_l(f) = TF(h_l(t))$ .
3. Quel impact va avoir ce canal sur le signal discret  $r_l[n]$  ? comment cela va t'il se traduire sur les courbes de TEB ?
4. Retracer l'évolution du TEB en fonction de  $\frac{E_b}{N_0}$ . Que constatez-vous ?  
Remarque : Le canal est un filtre FIR qui déphase (donc retarde) le signal en sortie de ce dernier de  $T_g$ . Tenez donc compte de ce retard supplémentaire lors de l'échantillonnage de  $r_l(t)$ .
5. Proposer une solution permettant de réduire l'impact du canal sur le TEB,
6. Votre solution présente t'elle un inconvénient ? si oui lequel ?

## 5 Quelques exemples de fonctions Matlab

⇒ Fonctions Matlab utile à l'implémentation du code :

- La fonction "randint.m" vous permet de générer aléatoirement et de manière uniforme les bits d'informations,
- La fonction "upsample.m" vous permet de sur-échantillonner un signal discret,
- La fonction "downsample.m" vous permet de sous-échantillonner un signal discret,
- La fonction "randn.m" vous permet de générer un PA SSL gaussien de moyenne nulle et de variance 1. Ainsi, si vous voulez changer la variance de la loi, il faudra multiplier le résultat de la fonction randn par l'écart-type souhaité,
- La fonction "scatterplot.m" vous permet d'afficher un diagramme de constellation,
- La fonction "eyediagram.m" vous permet de tracer un diagramme de l'oeil.
- Les fonctions "pskmod.m" "pskdemod.m" vous permettent respectivement de générer et de démoduler des symboles M-PSK,
- Les fonctions "pammod.m" "pamdemod.m" vous permettent respectivement de générer et de démoduler des symboles M-PAM (M-ASK),
- Les fonctions "qammod.m" "qamdemod.m" vous permettent respectivement de générer et de démoduler des symboles M-QAM,
- La fonction "fir1.m" vous permet de générer un filtre (passe-bas, passe-haut, passe-bande) à réponse impulsionnelle finie,
- La fonction "rcofsm.m" vous permet de générer la réponse impulsionnelle d'un filtre en racine de cosinus sur-élevé.

## 6 Contact

- Guillaume Ferré - guillaume.ferre@ims-bordeaux.fr
- Abdelhakim Youcef - abdelhakim.youcef@ims-bordeaux.fr