



Rapport
Projet de Traitement Numérique du Signal
Simulation d'une transmission au format DVB-RCS
Voie retour par satellite

Nihal BELMAKHFI et Héroïse LAFARGUE

Département Sciences du Numérique - Première année
2021-2022

Table des matières

1	Introduction	3
2	Construction du signal MF-TDMA à décoder	3
2.1	Paramètres	3
2.2	Etude théorique	3
2.2.1	Calcul de la densité spectrale de puissance	3
2.2.2	Expression de la puissance du bruit à ajouter	5
2.3	Implantation	5
2.3.1	Modulation bande base	5
2.3.2	Construction du signal MF-TDMA	6
3	Mise en place du récepteur MF-TDMA	8
3.1	Démultiplexage des porteuses	8
3.1.1	Synthèse du filtre passe-bas	9
3.1.2	Synthèse du filtre passe-haut	10
3.1.3	Filtrage	12
3.2	Retour en bande de base	12
3.3	Détection du slot utile	12
3.4	Démodulation bande de base	12
4	Conclusion	13

Table des figures

1	Construction du signal MF-TDMA à décoder	3
2	Tracé des signaux $m_1(t)$ et $m_2(t)$ avec une échelle temporelle (en s)	5
3	Tracés des densités spectrales de puissance des signaux $m_1(t)$ et $m_2(t)$	6
4	Tracés du signal comportant 5 slots et des deux signaux le générant	6
5	Tracés des messages sur les fréquence porteuses allouées	7
6	Tracé du signal MF-TDMA	7
7	Tracé de la DSP du signal MF-TDMA	8
8	Récepteur MF-TDMA à implanter	8
9	Tracé de la réponse impulsionnelle et de la réponse en fréquence du filtre implanté	9
10	Tracé de la densité spectrale de puissance du signal MF-TDMA reçu et du module de la réponse en fréquence du filtre implanté	10
11	Tracé de la réponse impulsionnelle et de la réponse en fréquence du filtre implanté	11
12	Tracé de la densité spectrale de puissance du signal MF-TDMA reçu et du module de la réponse fréquentielle du filtre implanté	11
13	Tracés des signaux après filtrage	12
14	Messages texte trouvés	13

1 Introduction

L'objectif de ce projet était de simuler une transmission de type DVB-RCS avec deux utilisateurs, chacun émettant sur une porteuse et dans un time slot donné.

2 Construction du signal MF-TDMA à décoder

La figure 1 présente la trame MF-TDMA à étudier, implanter puis décoder.

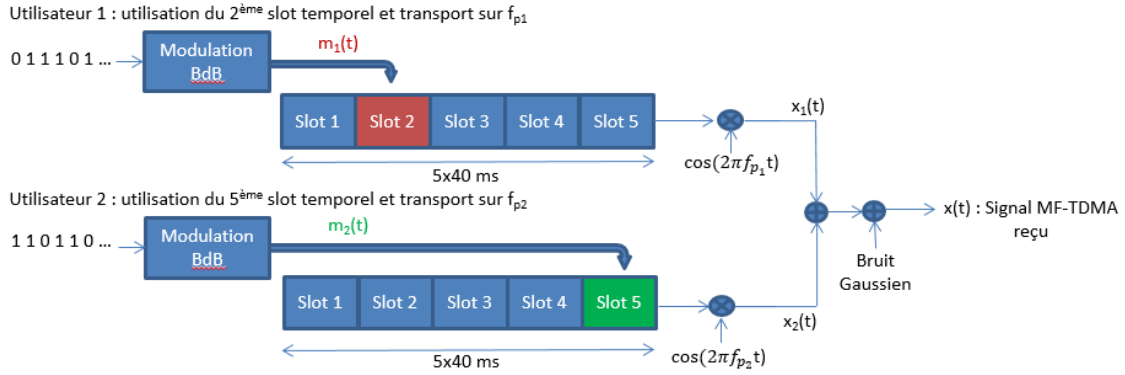


FIGURE 1 – Construction du signal MF-TDMA à décoder

2.1 Paramètres

La trame MF-TDMA est composée de 2 porteuses, $f_{p1} = 0 \text{ kHz}$ et $f_{p2} = 46 \text{ kHz}$, contenant chacune 5 timeslots de durées $T = 40 \text{ ms}$. La fréquence d'échantillonnage est fixée à 128 kHz . Les deux utilisateurs vont accéder au système en utilisant la trame de la manière suivante :

- L'utilisateur n° 1 exploite le 2^{ème} timeslot de la porteuse n° 1 (f_{p1}).
- L'utilisateur n° 2 exploite le 5^{ème} timeslot de la porteuse n° 2 (f_{p2}).

Le canal de transmission considéré sera à bruit additif blanc et Gaussien (canal AWGN : Additive White Gaussian Noise). La puissance du bruit à ajouter devra être déduite du rapport signal sur bruit (SNR : Signal to Noise Ratio) souhaité donné en dB.

2.2 Etude théorique

Le signal MF-TDMA non bruité peut s'écrire de la manière suivante :

$$x(t) = m_1(t) \cos(2\pi f_1 t + \phi_1) + m_2(t) \cos(2\pi f_2 t + \phi_2)$$

2.2.1 Calcul de la densité spectrale de puissance

- On a le signal $x(t) = m_1(t) \cos(2\pi f_1 t) + m_2(t) \cos(2\pi f_2 t + \phi)$.
De plus, la porteuse 1 a une fréquence nulle, $f_{p1} = 0$, ainsi on a :

$$x(t) = m_1(t) + m_2(t) \cos(2\pi f_2 t + \phi)$$

- CAS A : signaux $m_1(t)$ et $m_2(t)$ aléatoires, indépendants et centrés, ϕ_1 et ϕ_2 variables aléatoires indépendantes uniformément réparties sur $[0, 2\pi]$.

$$\text{Formule : } S_x(f) = \text{TF}[R_x(\tau)] = \text{TF}[E[x(t)x^*(t-\tau)]]$$

Calcul de $R_x(\tau)$:

$$R_x(\tau) = E[x(t)x^*(t-\tau)]$$

$$= E[(m_1(t) + m_2(t) \cos(2\pi f_2 t + \phi))(m_1(t-\tau) + m_2(t-\tau) \cos(2\pi f_2 (t-\tau) + \phi))]$$

$$= E[m_1(t)m_1(t-\tau)] + E[m_1(t)m_2(t-\tau) \cos(2\pi f_2(t-\tau) + \phi)] + E[m_2(t) \cos(2\pi f_2 t + \phi) m_1(t-\tau)] \\ + E[m_2(t) \cos(2\pi f_2 t + \phi) m_2(t-\tau) \cos(2\pi f_2(t-\tau) + \phi)] \text{ par linéarité de l'espérance}$$

$$= R_{m1}(\tau) + E[m_1(t)]E[m_2(t-\tau)] E[\cos(2\pi f_2(t-\tau) + \phi)] + E[m_2(t)]E[\cos(2\pi f_2 t + \phi)]E[m_1(t-\tau)] \\ + R_{m2}(\tau) E[\cos(2\pi f_2 t + \phi) \cos(2\pi f_2(t-\tau) + \phi)] \text{ par indépendance}$$

$$= R_{m1}(\tau) + R_{m2}(\tau) E[\cos(2\pi f_2 t + \phi) \cos(2\pi f_2(t-\tau) + \phi)] \text{ par nullité des espérances de cosinus}$$

$$= R_{m1}(\tau) + R_{m2}(\tau) \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos(2\pi f_2 t + \phi) \cos(2\pi f_2(t-\tau) + \phi) d\phi$$

$$= R_{m1}(\tau) + R_{m2}(\tau) \frac{1}{2\pi} \frac{1}{2} \left(\int_0^{2\pi} \cos(4\pi f_2(t-\tau) + 2\phi) d\phi + \int_0^{2\pi} \cos(2\pi f_2 \tau) d\phi \right)$$

$$= R_{m1}(\tau) + R_{m2}(\tau) \frac{1}{4\pi} \cos(2\pi f_2 \tau) \int_0^{2\pi} d\phi$$

$$= R_{m1}(\tau) + R_{m2}(\tau) \frac{1}{2} \cos(2\pi f_2 \tau)$$

Ainsi, on obtient la densité spectrale de puissance :

$$S_x(f) = TF[R_x(\tau)] = TF[R_{m1}(\tau)] + \frac{1}{2TF} R_{m2}(\tau) \cos(2\pi f_2 \tau)$$

$$= S_{m1}(f) + \frac{1}{2} S_{m2}(f) * TF[\cos(2\pi f_2 \tau)]$$

$$= S_{m1}(f) + \frac{1}{4} S_{m2}(f) * (\delta(f - f_2) + \delta(f + f_2))$$

$$= S_{m1}(f) + \frac{1}{4} S_{m2}(f - f_2) + \frac{1}{4} S_{m2}(f + f_2)$$

— CAS B : signaux $m_1(t)$ et $m_2(t)$ déterministes à énergie finie sur la bande de fréquence $[-b, b]$ autour de 0, avec $b \ll f_{p1}$ et $b \ll f_{p2}$. On pourra prendre $\phi_1 = \phi_2 = 0$. Donc

$$x(t) = m_1(t) + m_2(t) \cos(2\pi f_2 t)$$

$$X(f) = M_1(f) + TF[m_2(t) \cos(2\pi f_2 t)] \\ = M_1(f) + M_2(f) * TF[\cos(2\pi f_2 t)] \\ = M_1(f) + M_2(f) * (\delta(f - f_2) + \delta(f + f_2)) \\ = M_1(f) + \frac{1}{2}(M_2(f - f_2) + M_2(f + f_2))$$

$$S_x(f) = |X(f)|^2 = |M_1(f) + \frac{1}{2}(M_2(f - f_2) + M_2(f + f_2))|^2 \\ = |M_1(f)|^2 + \frac{1}{4}|M_2(f - f_2) + M_2(f + f_2)|^2 + |M_1(f)||M_2(f - f_2) + M_2(f + f_2)| \\ = S_{m1}(f) + \frac{1}{4}|M_2(f - f_2)|^2 + \frac{1}{4}|M_2(f + f_2)|^2 + \frac{1}{2}|M_2(f - f_2)||M_2(f + f_2)| + |M_1(f)||M_2(f - f_2) + M_2(f + f_2)|$$

les 3 derniers termes sont nuls car dans le cas de nos approximations ($b \ll f_{p1}$ et $b \ll f_{p2}$), les intégrales sont nulles, par exemple pour la dernière :

$$\int_R M_1(f) 1_{[-b, b]}(f) M_2(f + f_2) 1_{[-b - f_{p2}, b - f_{p2}]}(f) df = \int_R 0 df = 0 \text{ car } b - f_{p2} < -b \\ = S_{m1}(f) + \frac{1}{4}|M_2(f - f_2)|^2 + \frac{1}{4}|M_2(f + f_2)|^2. \\ = S_{m1}(f) + \frac{1}{4} S_{m2}(f - f_2) + \frac{1}{4} S_{m2}(f + f_2)$$

On retrouve le même résultat qu'au cas A.

2.2.2 Expression de la puissance du bruit à ajouter

On rajoute le bruit gaussien $n(t)$ au signal précédent. On a donc

$$y(t) = x(t) + n(t) = m_1(t) \cos(2\pi f_1 t) + m_2(t) \cos(2\pi f_2 t + \phi) + n(t)$$

On suppose connue la puissance du signal MF-TDMA non bruité et on la note P_{signal} . On note $SNR(dB)$ le rapport signal sur bruit souhaité en dB.

$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{bruit}} \right)$$

Ainsi, on obtient

$$P_{bruit} = P_{signal} 10^{-\frac{SNR(dB)}{10}}$$

2.3 Implantation

2.3.1 Modulation bande base

1. Calcul de N_s

$$N_s = \text{nb d'échantillons} / \text{nb de bit} = T_s F_e / 480 = \frac{40 \cdot 10^{-3} \cdot 120 \cdot 10^3}{480} = \frac{4800}{480} = 10$$

Il faut donc $N_s = 10$.

2. Tracés des signaux $m_1(t)$ et $m_2(t)$

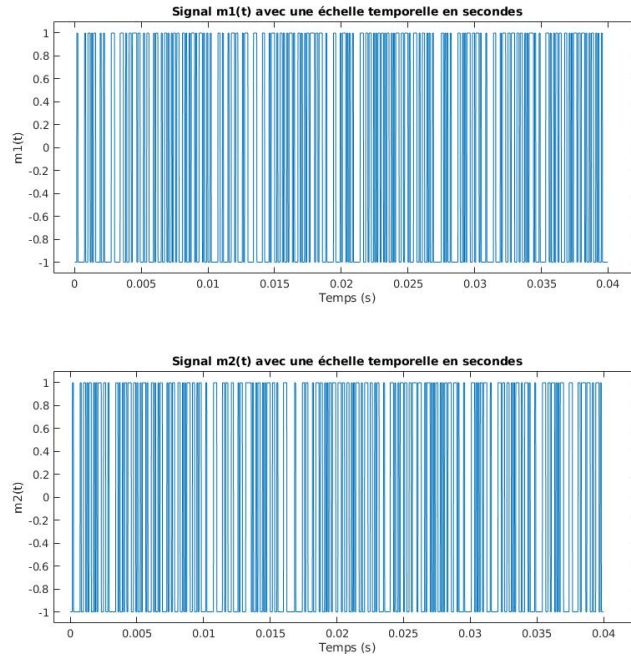


FIGURE 2 – Tracé des signaux $m_1(t)$ et $m_2(t)$ avec une échelle temporelle (en s)

3. Tracés des densités spectrales de puissance des signaux $m_1(t)$ et $m_2(t)$.

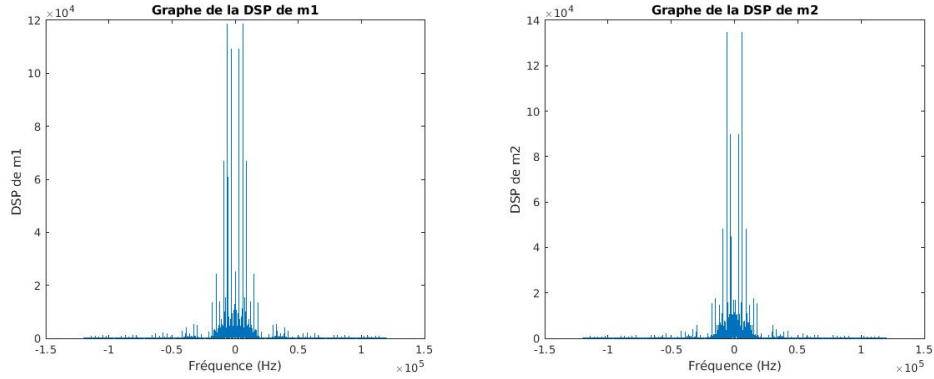


FIGURE 3 – Tracés des densités spectrales de puissance des signaux $m_1(t)$ et $m_2(t)$

2.3.2 Construction du signal MF-TDMA

Dans cette partie, on construit le signal trame MF-TDMA à partir des deux modulés. On somme les signaux obtenus $x_1(t)$ et $x_2(t)$ et le bruit gaussien pour obtenir le signal $x(t)$ qui sera reçu par la station d'interconnexion.

1. Tracé des signaux à envoyer sur porteuse pour chaque utilisateur.
 - a) Générer un signal comportant 5 slots de durée $T = 40$ ms et placer le message NRZ généré précédemment ($m_1(t)$ ou $m_2(t)$) et contenant l'information à transmettre dans le slot alloué. Tracer le signal résultant avec une échelle temporelle en secondes.

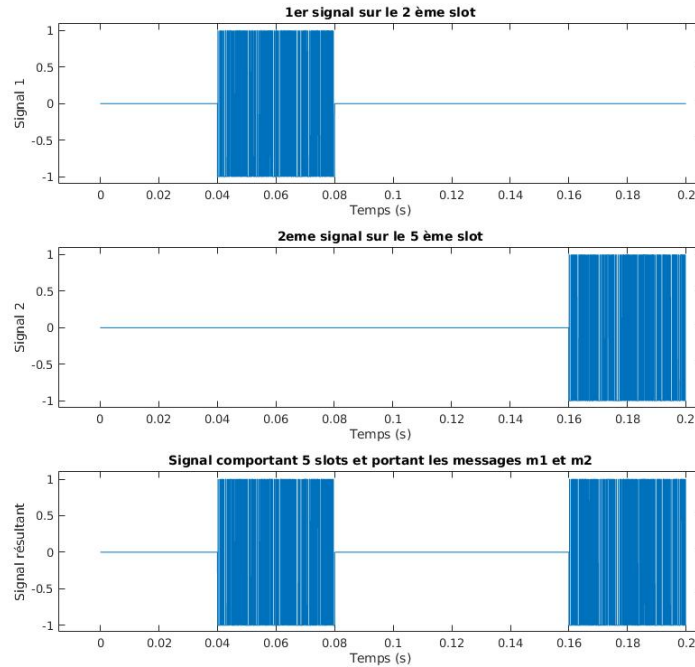


FIGURE 4 – Tracés du signal comportant 5 slots et des deux signaux le générant

- (b) En utilisant une modulation d'amplitude, placer, pour chaque utilisateur, le message

précédemment construit sur la fréquence porteuse allouée. On obtient alors les signaux $x_1(t)$ et $x_2(t)$.

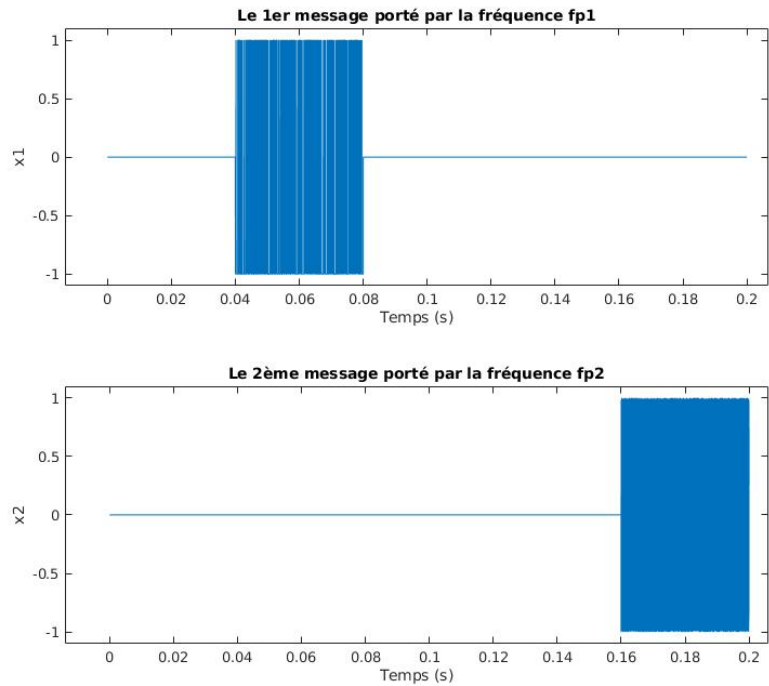


FIGURE 5 – Tracés des messages sur les fréquence porteuses allouées

2. Tracé du signal MF-TDMA. Le tracé observé est-il conforme à ce qui est attendu ? Explications.

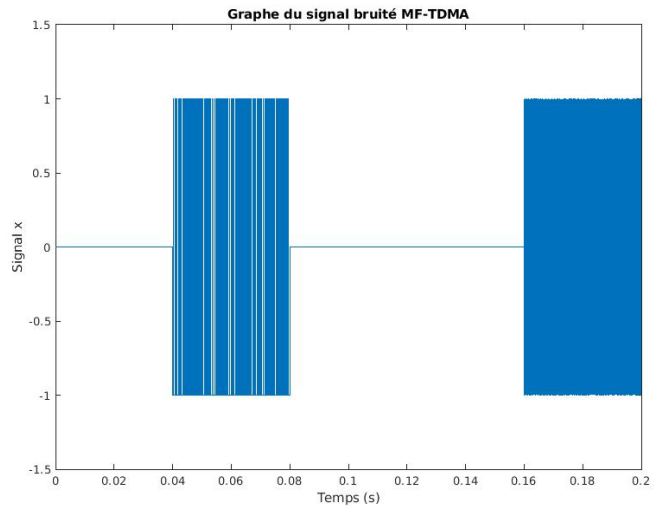


FIGURE 6 – Tracé du signal MF-TDMA

Le tracé de la Figure 6 est conforme avec ce qui est attendu : on retrouve la somme des deux

signaux, les signaux occupent chacun leur slot, associés à la fréquence porteuse allouée. Le bruit ne modifie pas le signal car il est faible.

3. Estimation puis tracé de la densité spectrale de puissance du signal MF-TDMA. Le tracé observé est-il conforme à l'expression théorique obtenue précédemment ? Explications. Pour faire un appel à section : on retrouve bien le résultat obtenu dans la partie théorique (paragraphe 2.2.1).

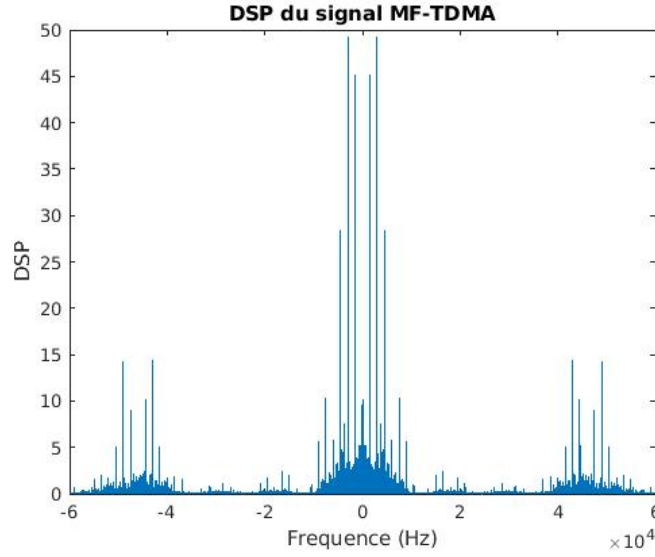


FIGURE 7 – Tracé de la DSP du signal MF-TDMA

Le tracé de la Figure 7 est conforme à l'expression théorique, on retrouve les 3 signaux $S_{m1}(f)$, $S_{m2}(f - f_2)$ et $S_{m2}(f + f_2)$ qui correspondent à $f=0$, $f=46\text{KHz}$, $f=-46\text{KHz}$ dans la DSP du signal.

3 Mise en place du récepteur MF-TDMA

La figure 8 présente le récepteur à implanter pour retrouver, à partir du signal MF-TDMA bruité, les messages binaires envoyés par les deux utilisateurs.

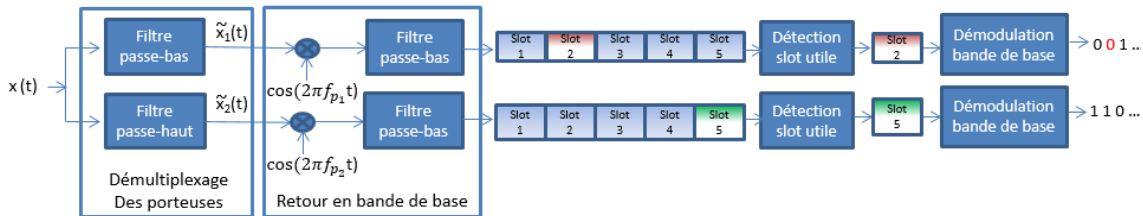


FIGURE 8 – Récepteur MF-TDMA à implanter

3.1 Démultiplexage des porteuses

Le démultiplexage des porteuses se fait par filtrage : à partir du signal MF-TDMA reçu, un filtre passe-bas permet de récupérer le signal porté par le cosinus à la fréquence f_{p1} (provenant de

l'utilisateur 1), tandis qu'un filtre passe-haut permet de récupérer le signal porté par le cosinus à la fréquence f_{p2} (provenant de l'utilisateur 2).

3.1.1 Synthèse du filtre passe-bas

L'objectif est de récupérer le message de l'utilisateur 1, pour y parvenir on va utiliser un filtre passe bas de fréquence de coupure égale à la moitié de la fréquence porteuse du signal 2 .

1. Rappel de la réponse impulsionnelle idéale du filtre passe-bas à implanter (calcul effectué dans le TP2).

Pour un filtre passe-bas, la réponse impulsionnelle s'écrit sous la forme :

$$h(t) = 2f \text{sinc}(2kf)$$

Avec $f = f_c / f_e$, $k = -N$, N étant l'ordre du filtre, f la fréquence normalisée, f_c la fréquence de coupure qui respecte le critère de Shannon et f_e la fréquence d'échantillonnage.

2. Explications implémentation.

Le filtre passe-bas (sous forme d'une porte) permet de récupérer le signal à la fin.

3. Tracé de la réponse impulsionnelle et de la réponse en fréquence du filtre implanté.

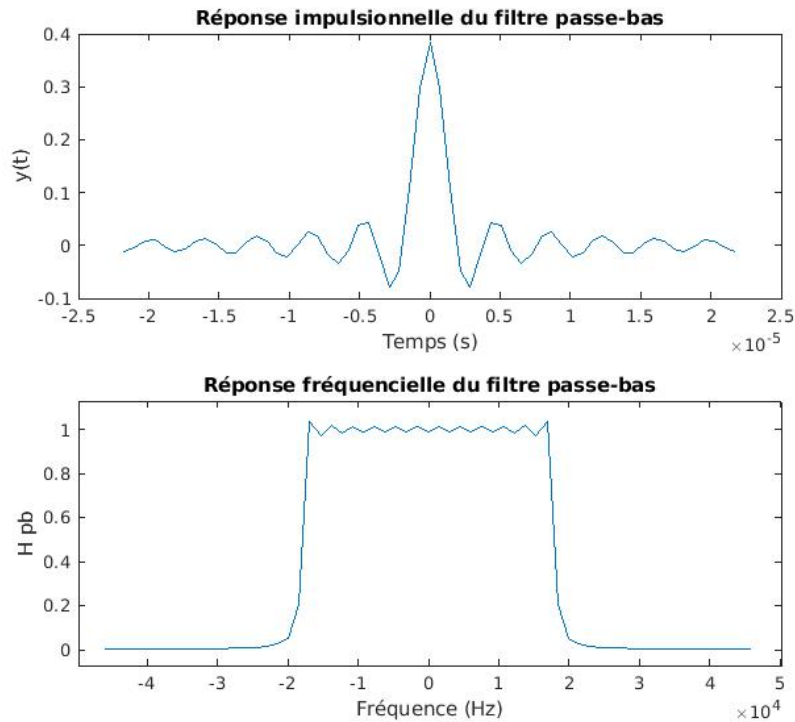


FIGURE 9 – Tracé de la réponse impulsionnelle et de la réponse en fréquence du filtre implanté

4. Tracé de la densité spectrale de puissance du signal MF-TDMA reçu et du module de la réponse en fréquence du filtre implanté. Le filtre implanté vous paraît-il réaliser la fonction souhaitée ? Explications.

Oui, comme le montre le Figure 10, le filtre implanté permet de récupérer le signal 1. Ce filtre passe-bas ne laisse pas passer les hautes fréquences et laisse passer les basses fréquences don le message 1 grâce à une fréquence de coupure judicieusement choisie.

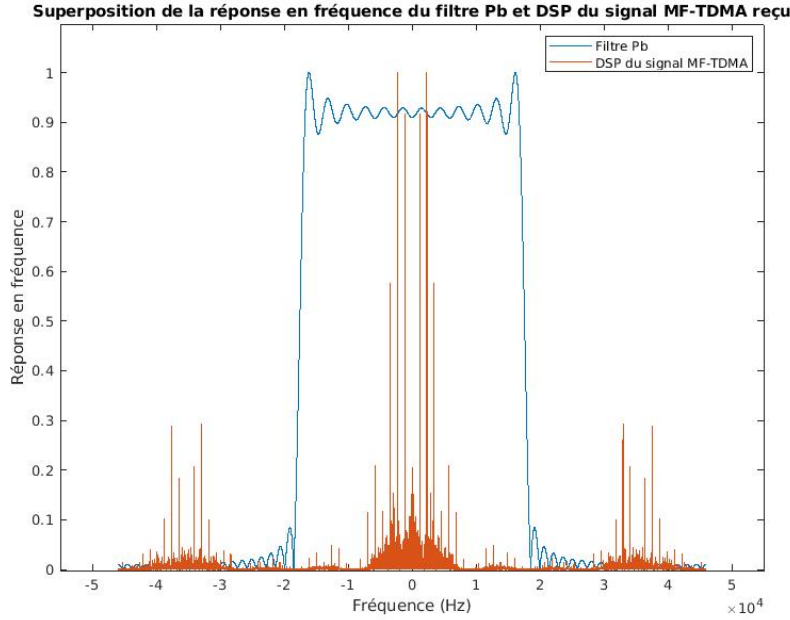


FIGURE 10 – Tracé de la densité spectrale de puissance du signal MF-TDMA reçu et du module de la réponse en fréquence du filtre implanté

3.1.2 Synthèse du filtre passe-haut

On souhaite récupérer le message de l'utilisateur 2 , pour y parvenir on va utiliser un filtre passe haut.

1. Calcul de la réponse impulsionnelle idéale du filtre passe-haut à implanter.

A partir de la réponse impulsionnelle du filtre passe-bas, on déduit celui du passe-haut vu que les transformées de Fourier sont liées par la relation : $H_{Ph} = 1 - H_{Pb}$.

La réponse impulsionnelle du filtre passe-haut est donc donnée par l'expression suivante :

$$h_{I_{Ph}}(k) = \delta(k) - h_{I_{Pb}}(k). \text{ Et, on a : } h_{I_{Pb}}(t) = 2f \text{sinc}(2kf).$$

$$\text{Donc, } h_{I_{PH}}(k) = \delta(k) - 2f \text{sinc}(2kf).$$

2. Explications implémentation.

On souhaite récupérer le message de l'utilisateur 2 , pour y parvenir on va utiliser un filtre passe-haut de même fréquence de coupure que le filtre passe bas utilise précédemment.

3. Tracé de la réponse impulsionnelle et de la réponse en fréquence du filtre implanté.

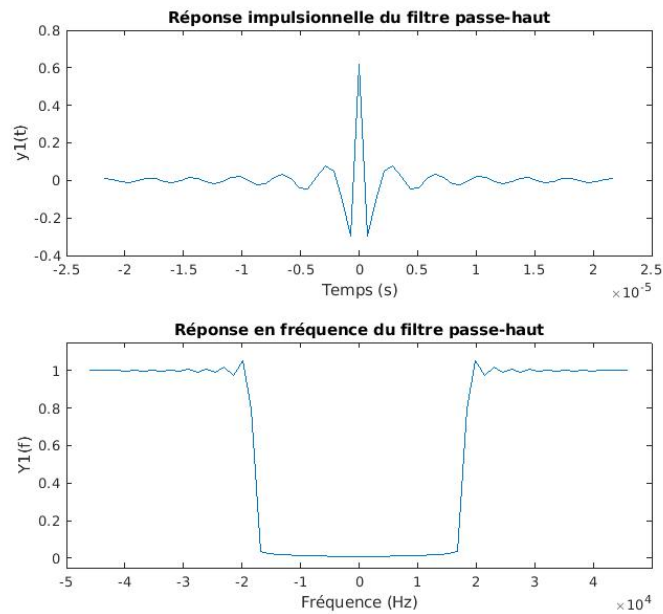


FIGURE 11 – Tracé de la réponse impulsionnelle et de la réponse en fréquence du filtre implanté

4. Tracé de la densité spectrale de puissance du signal MF-TDMA reçu et du module de la réponse en fréquences du filtre implanté. Le filtre implanté vous paraît-il réaliser la fonction souhaitée ? Explications.

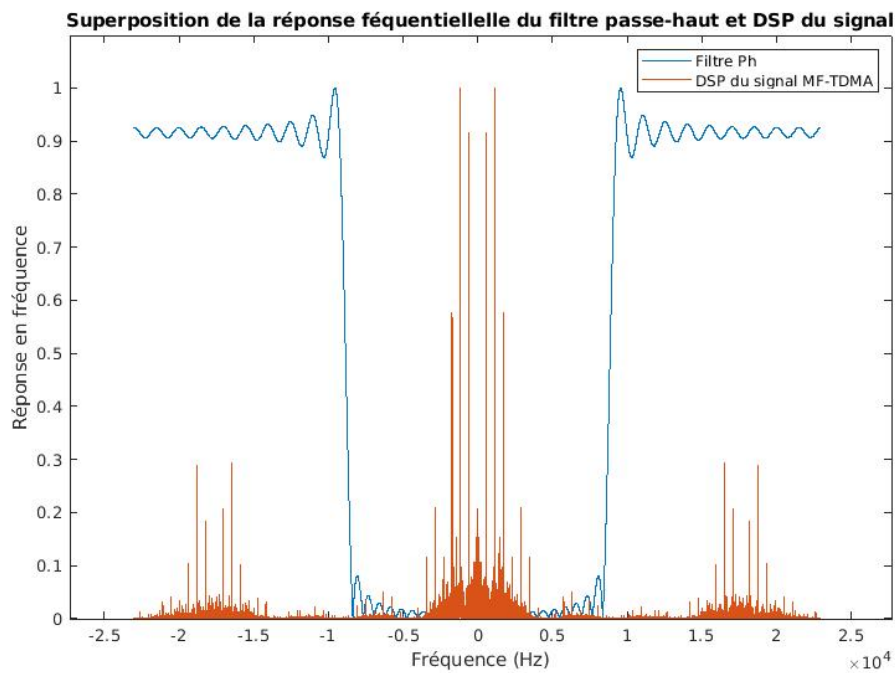


FIGURE 12 – Tracé de la densité spectrale de puissance du signal MF-TDMA reçu et du module de la réponse fréquentielle du filtre implanté

Oui, le filtre réalise la fonction souhaitée car il filtre les basses fréquences et laisse passer les hautes fréquences comme on le voit sur la Figure 12. On récupère donc bien le message 2.

3.1.3 Filtrage

Dans cette partie, on souhaite convoluer nos filtres avec notre trame afin de récupérer les messages.

Tracés des signaux après filtrage.

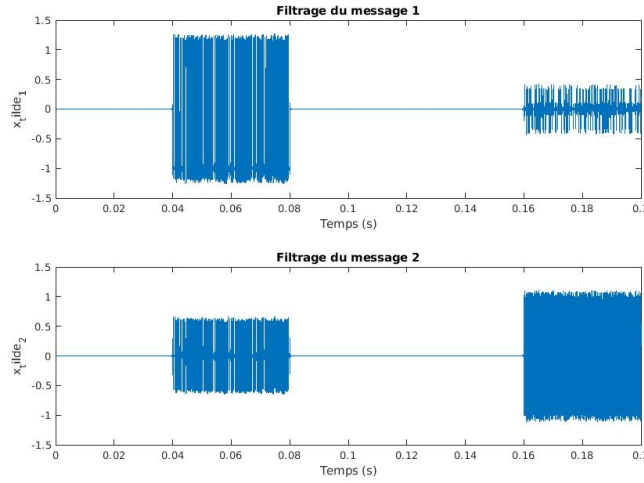


FIGURE 13 – Tracés des signaux après filtrage

3.2 Retour en bande de base

Pour le retour en bande de base on multiplie le signal par le cosinus qui comporte la fréquence porteuse associée au signal : pour le signal 1 on multiplie par le cosinus de fréquence porteuse f_1 , et le signal 2 par la fréquence porteuse f_2 . Puis on va filtrer le résultat obtenu par un filtre passe-bas (démodulation d'amplitude dite cohérente).

3.3 Détection du slot utile

Pour chaque utilisateur, afin de procéder à la détection du slot utile, on divise la trame après retour en bande de base en tranches de durée $T = 40$ ms. Afin de détecter le slot utile, on utilise un détecteur d'énergie qui renvoie l'indice de la tranche ou l'énergie maximale pour chaque signal. Après, on récupère le message contenu dans ce slot et on le démodule.

3.4 Démodulation bande de base

Pour chaque utilisateur, à partir du message retrouvé dans le slot utile, on réalise une démodulation bande de base qui permet de retrouver les messages binaires envoyés. On utilise ensuite la fonction *bin2str.m* fournie afin de retrouver les messages texte. Les messages trouvés sont :

```
>> projet_DVB_RCS
Le message 1 est :
    Ma probabilité d'apparition au semestre 5 est assez élevée

Le message 2 est :
    Mes initiales, placées à l'envers, évoquent un vert support
>> |
```

FIGURE 14 – Messages texte trouvés

4 Conclusion

En construisant et en manipulant le signal MF-TDMA, nous avons bien pu extraire et restaurer les messages des deux utilisateurs. Le professeur mystère pourrait être Monsieur Jean-Yves Tourneret dont les initiales à l'envers donnent TYJ, soit phonétiquement TIGE (le "support" d'une feuille ou d'une fleur).