

# Projet de Traitement Numérique du Signal

## Simulation d'une transmission au format DVB-RCS

### Voie retour par satellite

Première année Département Sciences du Numérique

2021 – 2022

## 1 Introduction

Un certain nombre de standards concernent des systèmes d'accès bidirectionnel pour des applications multimédia à haut débit par satellite. Le standard DVB-RCS (Digital Video Broadcasting - Return Channel via Satellite) permet d'offrir aux utilisateurs une interactivité à l'aide d'une voie retour par satellite : lien entre leur terminal et une station d'interconnexion via une liaison satellite. La station d'interconnexion joue le rôle d'interface avec le monde de l'Internet et du réseau pour offrir des applications diverses telles que la navigation sur le WEB, la messagerie ou le transfert de données. La figure 1 présente un système DVB-RCS.

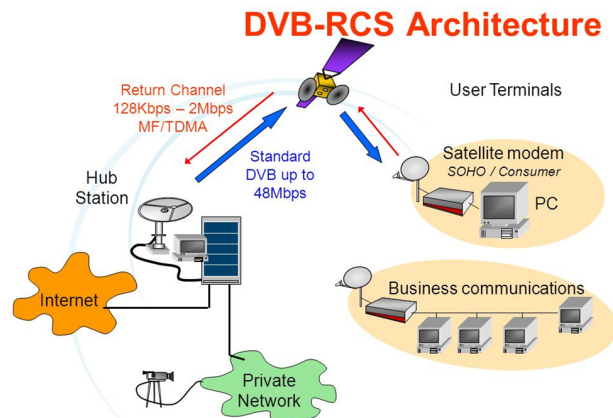


FIGURE 1 – Description d'un système DVB-RCS

Les utilisateurs du système accèdent à la station d'interconnexion en utilisant une trame MF-TDMA (Multiple Frequency - Time Division Multiple Access) qui permet de partager en temps et en fréquence la ressource satellite entre les différents utilisateurs. La bande fréquentielle est découpée en plusieurs porteuses, chacune d'elle étant découpée en plusieurs portions temporelles, appelées timeslots. Chaque utilisateur transmet ses données en les répartissant dans les timeslots et sur les fréquences porteuses qui lui ont été alloués par la station d'interconnexion.

Vous simulerez dans ce projet une transmission de type DVB-RCS avec deux utilisateurs, chacun émettant sur une porteuse et dans un time slot donné. La première étape consistera à former la

trame MF-TDMA à partir des messages à envoyer par les deux utilisateurs. La deuxième partie du projet consistera à mettre en place le récepteur MF-TDMA situé dans la station d'interconnexion qui doit extraire et restaurer les données de tous les utilisateurs ayant accès au système. Ce qui comprend le démultiplexage des porteuses, la détection des slots occupés par chaque utilisateur et le décodage des données transportées.

Deux fichiers (*donnees1.mat* et *donnees2.mat*) contenant les messages à transmettre par les utilisateurs 1 et 2 sous forme binaire vous seront fournis. En utilisant les commandes *load donnees1.mat* puis *load donnees2.mat*, vous pourrez placer les variables *bits\_utilisateur1* et *bits\_utilisateurs2* dans votre espace de travail. Chaque message binaire correspond à un petit fichier texte. En les décodant vous obtiendrez deux indices permettant d'identifier un des professeurs de votre département...

## 2 Scénario retenu

Nous considérerons dans ce projet que deux utilisateurs souhaitent accéder à la station d'interconnexion.

La trame MF-TDMA générée sera composée de 2 porteuses ( $f_{p_1} = 0$  kHz et  $f_{p_2} = 46$  kHz) contenant chacune 5 timeslots de durées  $T = 40$  ms. La fréquence d'échantillonnage sera fixée à 120 kHz. Les deux utilisateurs vont accéder au système en utilisant la trame de la manière suivante :

- L'utilisateur n° 1 exploite le 2<sup>me</sup> timeslot de la porteuse n° 1 ( $f_{p_1}$ ).
- L'utilisateur n° 2 exploite le 5<sup>me</sup> timeslot de la porteuse n° 2 ( $f_{p_2}$ ).

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.

## 3 Construction du signal MF-TDMA à décoder

Deux fichiers (*donnees1.mat* et *donnees2.mat*) contenant les messages des utilisateurs 1 et 2 sous forme binaire (variables *bits\_utilisateur1* et *bits\_utilisateurs2*) vous sont fournis sur moodle. En utilisant les commandes *load donnees1.mat* puis *load donnees2.mat*, vous pourrez placer les variables *bits\_utilisateur1* et *bits\_utilisateurs2* dans votre espace de travail.

La première étape du projet va consister à générer la trame MF-TDMA reçue à partir de ces deux messages binaires en fonction du scénario décrit dans le paragraphe précédent.

La figure 2 présente le principe de la construction de cette trame MF-TDMA.

Lorsque l'on considère des transmissions numériques, une première étape, dite de modulation bande de base, est obligatoire afin de transformer l'information binaire à transmettre en un signal susceptible d'être transmis dans le canal de propagation. Cette étape devra être réalisée pour chaque utilisateur afin de passer des vecteurs binaires *bits\_utilisateur1* et *bits\_utilisateurs2* à des messages  $m_1(t)$  et  $m_2(t)$ . Ces messages devront ensuite être placés dans les slots temporels et sur les fréquences porteuses allouées à chaque utilisateur. On utilisera comme technique de transposition de fréquence la modulation d'amplitude (multiplication des messages par un cosinus porteur à la fréquence souhaitée). Les signaux  $x_1(t)$  et  $x_2(t)$  transportant les informations binaires des deux utilisateurs considérés dans les intervalles temporels et les espaces fréquentiels alloués seront ensuite sommés et la somme obtenue bruitée pour former le signal MF-TDMA reçu par la station d'interconnexion.

*Remarque : pour des raisons de simplicité, les signaux sont tous notés dans l'énoncé comme étant fonction de la variable temporelle  $t$ . Mais, étant donné que nous travaillons en numérique,*

ils seront, bien entendu, tous échantillonnés et donc représentés par des tableaux (vecteurs) de points distants de la période d'échantillonnage  $T_e = \frac{1}{F_e}$ .

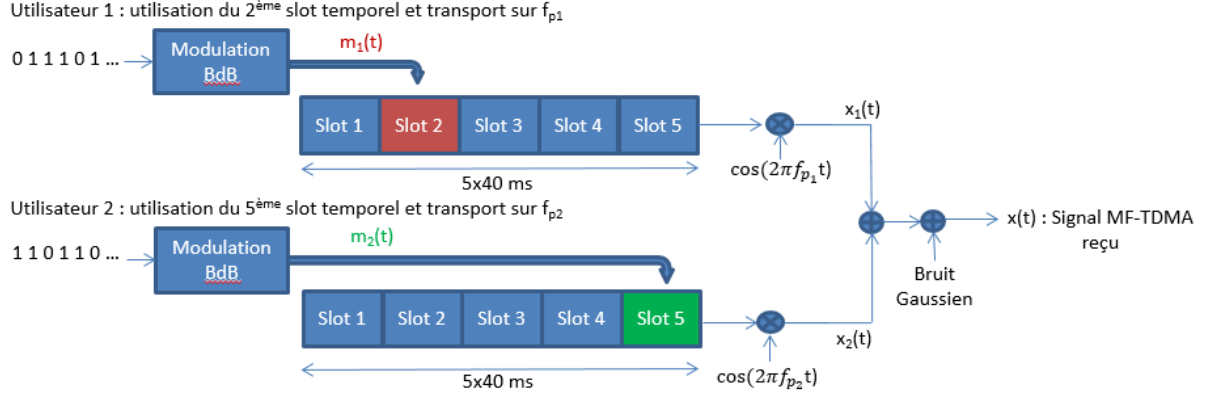


FIGURE 2 – Construction du signal MF-TDMA à décoder

### 3.1 Etude théorique

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

$$x(t) = m_1(t) \cos(2\pi f_{p1}t + \phi_1) + m_2(t) \cos(2\pi f_{p2}t + \phi_2)$$

Calculer sa densité spectrale de puissance, en fonction de celle des messages  $m_1(t)$  et  $m_2(t)$  :  $S_{m_1}(f)$  et  $S_{m_2}(f)$ . Pour cela deux solutions sont possibles :

- (a) Considérer les signaux  $m_1(t)$  et  $m_2(t)$  comme aléatoires, indépendants et centrés, et stationnariser le signal MF-TDMA en considérant des phases aléatoires dans les cosinus :  $\phi_1$  et  $\phi_2$  variables aléatoires indépendantes uniformément répartie sur  $[0, 2\pi]$ .
- (b) Considérer les signaux  $m_1(t)$  et  $m_2(t)$  comme déterministes à énergie finie et occupant la même bande de fréquence  $[-b, b]$  autour de 0, avec  $b \ll f_{p1}$  et  $b \ll f_{p2}$ . On pourra prendre  $\phi_1 = \phi_2 = 0$  pour simplifier les calculs.

2. Un bruit gaussien,  $n(t)$ , devra être ajouté au signal précédent. Donner l'expression de la puissance du bruit à ajouter, en fonction de celle supposée connue du signal MF-TDMA non bruité et du rapport signal sur bruit souhaité en dB.

### 3.2 Implantation

#### 3.2.1 Modulation bande base

Afin, pour chaque utilisateur, de passer d'une information binaire à un message susceptible d'être transmis, les 0 et les 1 issus des fichiers *bits\_utilisateur1* et *bits\_utilisateurs2* seront être codés par des niveaux bas et haut de durées  $T_s$  secondes. Les messages  $m_1(t)$  et  $m_2(t)$  ainsi obtenus sont dits de type NRZ. En numérique la durée  $T_s$  est représentée par un certain nombre d'échantillons,  $N_s$ , distants de  $T_e$  :  $T_s = N_s T_e$ . La figure 3 présente un exemple de signal NRZ généré à partir d'une information binaire à transmettre, avec  $N_s = 3$  échantillons distants de  $T_e$  par niveau  $\pm 1$  de durée  $T_s$ .

1. Déterminer la valeur de  $N_s$  à utiliser ici afin de satisfaire aux paramètres imposés par le scénario retenu, d'une part, et par la longueur des messages binaires à transmettre d'autre part.

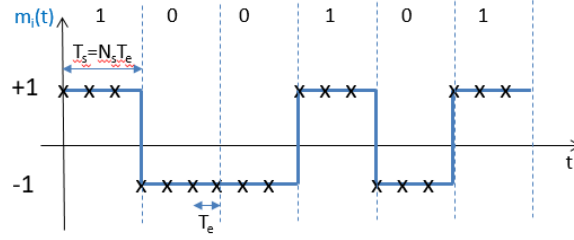


FIGURE 3 – Message de type NRZ

2. Tracer les signaux  $m_1(t)$  et  $m_2(t)$  avec une échelle temporelle en secondes.
3. Estimer puis tracer les densités spectrales de puissance des signaux  $m_1(t)$  et  $m_2(t)$  avec une échelle fréquentielle en Hz.

### 3.2.2 Construction du signal MF-TDMA

1. 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.
  - (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  $x_2(t)$  de la figure 3.
2. Sommer les signaux  $x_1(t)$  et  $x_2(t)$  et ajouter le bruit gaussien afin d'obtenir le signal MF-TDMA,  $x(t)$ , qui sera reçue par la station d'interconnexion. On fixera, dans un premier temps, un rapport signal sur bruit élevé (par exemple 100 dB). Tracer le signal MF-TDMA avec une échelle temporelle en secondes. Le tracé observé est-il conforme à ce qui est attendu ? Expliquer votre réponse.
3. Estimer puis tracer la densité spectrale de puissance du signal MF-TDMA avec une échelle fréquentielle en Hz. Le tracé observé est-il conforme à l'expression théorique obtenue précédemment ? Expliquer votre réponse.

## 4 Mise en place du récepteur MF-TDMA

La figure 4 présente le récepteur que vous devrez implanter pour retrouver, à partir du signal MF-TDMA bruité, les messages binaires envoyés par les deux utilisateurs. Ces messages binaires correspondent à de petits fichiers texte que vous pourrez retrouver en utilisant la fonction `bin2str.m` qui vous est fournie. Les deux textes retrouvés vous donneront des indices permettant d'identifier le professeur mystère.

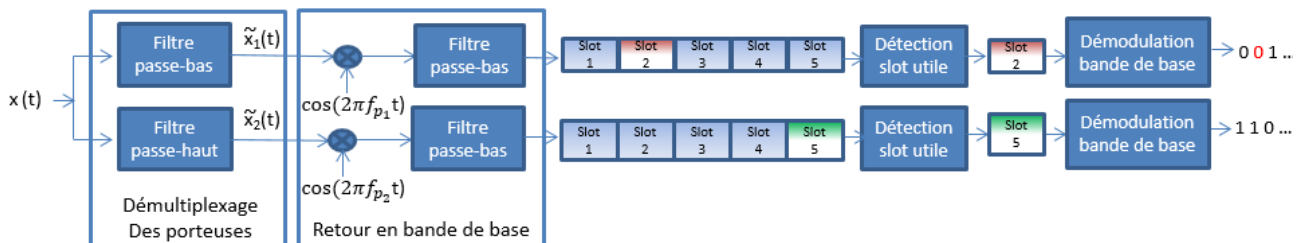


FIGURE 4 – Récepteur MF-TDMA à implanter

## 4.1 Démultiplexage des porteuses

Le démultiplexage des porteuses se fera par filtrage : à partir du signal MF-TDMA reçu, un filtre passe-bas permettra de récupérer le signal porté par le cosinus à la fréquence  $f_{p1}$  (provenant de l'utilisateur 1), tandis qu'un filtre passe-haut permettra de récupérer le signal porté par le cosinus à la fréquence  $f_{p2}$  (provenant de l'utilisateur 2).

### 4.1.1 Synthèse du filtre passe-bas

Planter un filtre passe-bas de type RIF permettant de récupérer le signal  $x_1(t)$  provenant de l'utilisateur 1. On pourra utiliser le filtre passe-bas réalisé lors du TP2 en adaptant ses paramètres.

1. Tracer la réponse impulsionnelle et la réponse en fréquence du filtre implanté.
2. Tracer, sur un même graphique, la densité spectrale de puissance du signal MF-TDMA reçu et le module de la réponse en fréquences du filtre implanté. Le filtre implanté vous paraît-il réaliser la fonction souhaitée? Si ce n'est pas le cas modifier les paramètres de la synthèse afin que cela le devienne.

### 4.1.2 Synthèse du filtre passe-haut

1. On peut déduire la synthèse du filtre passe-haut de celle du filtre passe-bas. En effet, la réponse en fréquence d'un filtre passe-haut idéal peut être donnée par :

$$H_{I_{PH}}(f) = 1 - H_{I_{PB}}(f)$$

où  $H_{I_{PB}}(f)$  représente la réponse en fréquence du filtre passe-bas idéal de même fréquence de coupure. On peut donc utiliser cette expression pour en déduire la réponse impulsionnelle idéale d'un filtre passe-haut :

$$h_{I_{PH}}(k) = \delta(k) - h_{I_{PB}}(k)$$

où  $\delta(k)$  représente le Dirac numérique :  $\delta(k) = 1$  pour  $k = 0$  et  $= 0$  ailleurs.

Déterminer, à partir de là, la réponse impulsionnelle idéale du filtre passe-haut à planter.

2. Planter un filtre passe-haut de type RIF permettant de retrouver le signal  $x_2(t)$  provenant de l'utilisateur 2.
3. Tracer la réponse impulsionnelle et la réponse en fréquence du filtre implanté.
4. Tracer, sur un même graphique, la densité spectrale de puissance du signal MF-TDMA reçu et le module de la réponse en fréquences du filtre implanté. Le filtre implanté vous paraît-il réaliser la fonction souhaitée? Si ce n'est pas le cas modifier les paramètres de la synthèse afin que cela le devienne.

### 4.1.3 Filtrage

Procéder aux filtrages (passe-bas et passe-haut) du signal MF-TDMA reçu pour retrouver les signaux  $x_1(t)$  (sur  $f_{p1}$ ) et  $x_2(t)$  (sur  $f_{p2}$ ) associés aux utilisateurs 1 et 2. Les signaux retrouvés sont notés  $\tilde{x}_1(t)$  et  $\tilde{x}_2(t)$  sur la figure 4. Tracer  $\tilde{x}_1(t)$  et  $\tilde{x}_2(t)$  avec une échelle temporelle en secondes.

## 4.2 Retour en bande de base

En supposant notre système parfaitement synchronisé, planter l'opération de retour en bande de base. Cette opération consiste à multiplier le signal  $\tilde{x}_i(t)$  ( $i = 1$  ou  $2$ ) retrouvé pour chaque utilisateur par le même cosinus (même fréquence, même phase) que celui qui a servi à réaliser la transposition sur fréquence porteuse et à filtrer le résultat obtenu par un filtre-passe-bas (démodulation d'amplitude dite cohérente).

### 4.3 Détection du slot utile

Pour chaque utilisateur, afin de procéder à la détection du slot utile, on va diviser la trame après retour en bande de base en tranches de durée  $T = 40$  ms. Chaque tranche de signal sera notée  $X$  et constituée de  $L$  échantillons :  $X = \{x_1, \dots, x_L\}$ . Afin de détecter le slot utile, on utilisera un détecteur d'énergie : on calculera sur chaque tranche (slot) l'énergie du signal et on détectera la présence du signal utile (et donc le numéro du slot utile) par recherche du maximum d'énergie.

### 4.4 Démodulation bande de base

Pour chaque utilisateur, à partir du message retrouvé dans le slot utile, la démodulation bande de base va consister à retrouver l'information binaire de départ. Le code permettant de réaliser la démodulation bande de base vous est donné ci-dessous :

```
SignalFiltre=filter(ones(1,Ns),1,MessageRetrouve);  
SignalEchantillonne=SignalFiltre(Ns :Ns :end);  
BitsRecuperes=(sign(SignalEchantillonne)+1)/2;
```

Il devra être utilisé pour chaque utilisateur afin de récupérer les messages binaires envoyés. Vous pourrez utiliser ensuite la fonction *bin2str.m* fournie afin de retrouver les messages texte. Elle permet de transformer un vecteur de bits en une chaîne de caractères, chaque caractère ayant été codé sur 8 bits au départ. *bin2str(BitsRecuperes)* va fournir le texte associée à la suite binaire *BitsRecuperes*. Les deux textes, une fois retrouvés, vous donneront des indices permettant d'identifier le professeur mystère...

Bien entendu la qualité du message retrouvé dépendra du rapport signal sur bruit considéré dans votre transmission. Vous pouvez le modifier afin de visualiser son impact sur la déformation des messages transmis.

## 5 Le rapport

1. Comme tout rapport, il devra comporter un sommaire, une introduction présentant les objectifs des TPs, une conclusion synthétisant les principaux résultats obtenus et une bibliographie comprenant les références éventuellement utilisées. On pourra y ajouter une table des illustrations.
2. Les équations devront être réalisées avec un éditeur d'équation.
3. Lorsque vous commentez une figure vous devez y faire référence dans votre texte : par exemple "comme le montre la figure 1, ..."
4. Tous vos tracés doivent comporter des labels sur les axes et un titre.
5. Si plusieurs courbes sont tracées sur la même figure, celle-ci devra comporter une légende permettant de les différencier.
6. Toutes vos explications/justifications devront utiliser les bons termes techniques (provenant des cours/TDs/TPs, des livres/sites consultés et cités), pas d'à peu près. "En gros" est à proscrire...
7. Attention votre rapport doit être relu, éventuellement passé au correcteur orthographique et grammatical.

Un fichier exemple au format latex vous est donné. Vous pouvez l'utiliser en le complétant, en le modifiant comme vous le souhaitez. Il vous donne quelques exemples pour réaliser un plan, l'écriture d'équations, l'insertion et l'appel à figure, l'appel à section ... Vous pouvez, par exemple, utiliser texmaker qui est gratuit pour l'éditer et le compiler.

## 6 Les codes

1. Vos codes doivent être commentés de manière suffisante et claire. Un nouvel utilisateur doit pouvoir comprendre ce que vous avez souhaité implanter.
2. Vous pouvez regrouper l'ensemble du code du projet dans un seul fichier .m. Si vous en fournissez plusieurs, un mode d'emploi devra être fourni dans le rapport pour savoir ce qui doit être lancé pour réaliser les différentes fonctions implantées.