

# SIMULATION D'UNE CHAÎNE DE TRANSMISSION AU FORMAT DVB-S

## Sciences du Numérique

### Deuxième année - Parcours Systèmes de télécom

## 1 Introduction

L'objectif de ce projet est d'étudier l'apport du codage canal, ou codage correcteur d'erreur, dans une chaîne de communication numérique. On implantera pour cela la couche physique d'une transmission par satellite au format DVB-S (Digital Video Broadcasting - Satellite), qui comprend une concaténation de deux codes : un de type convolutif et l'autre de type bloc. On considèrera une transmission fixe sur canal supposé à bruit additif blanc et gaussien. La figure suivante présente, en rouge, la couche physique du DVB-S.

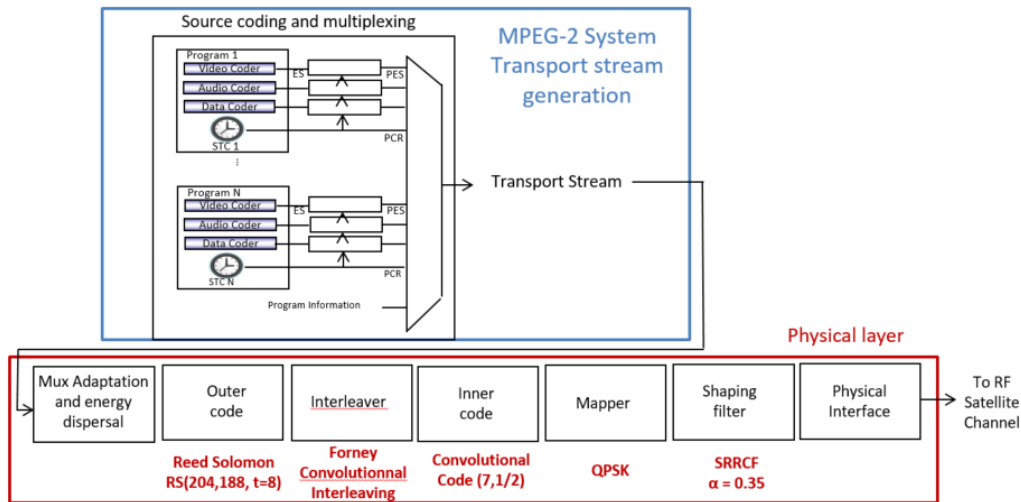


FIGURE 1 – DVB-S physical layer [1]

## 2 Implantation du modulateur/démodulateur

Le modulateur DVB-S utilise la modulation QPSK avec une mise en forme en racine de cosinus surélevé (SRRCF : Square root raised cosine filter) de roll-off  $\alpha = 0,35$ . Les implantations seront réalisées en utilisant la chaîne passe-bas équivalente à la chaîne de transmission sur porteuse.

1. Donnez le schéma de la chaîne de transmission sur porteuse associée à une modulation de type QPSK, ainsi que celui de la chaîne passe-bas équivalente.
2. En notant  $N_s$  le facteur de suréchantillonnage ( $T_s = N_s T_e$ ), montrez que sa valeur minimale est de 2 si l'on veut pouvoir respecter la condition d'échantillonnage de Shannon. Afin d'avoir de meilleures visualisations des signaux, on suréchantillonnera en utilisant  $N_s = 5$ .
3. Déterminez l'efficacité spectrale théorique de votre chaîne de transmission.
4. Implantez le bloc modulateur/démodulateur, sans canal, afin d'obtenir un taux d'erreur binaire simulé nul. Vous expliquerez les choix techniques mis en place pour assurer ce TEB nul sans canal. Vos explications doivent s'appuyer sur les concepts théoriques vus en cours, TDs et TP des deux dernières années.
5. Ajoutez le canal AWGN, en suivant les indications données en annexe, afin de retrouver, sur votre chaîne simulée, le taux d'erreur binaire théorique optimal attendu pour ce type de modulation. On effectuera les simulations pour des valeurs de  $E_b/N_0$  allant de -4 à 4 dB et on tracera les TEBs en échelle logarithmique, en fonction de  $E_b/N_0$  et du rapport signal à bruit de la transmission. Attention à la précision de vos mesures de TEB (voir en annexe). Nous vous demanderons ici une précision de  $10^{-3}$ . Ici également vous expliquerez ce qui rend votre chaîne de transmission optimale en présence du canal AWGN.

**Remarque :**  $E_b/N_0$  est le rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur. Il est lié au rapport signal à bruit (SNR) de la transmission de la manière suivante :

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_x T_b}{N_0} = \frac{P_{x_e} T_s}{2 \log_2(M) N_0} = \frac{P_{x_e} N_s T_e}{2 \log_2(M) N_0} = \frac{P_{x_e}}{2 N_0 F_e} \times \frac{N_s}{\log_2(M)} = SNR \times \frac{N_s}{\log_2(M)}$$

où

- $P_x$  représente la puissance du signal reçu. Elle est liée à la puissance de l'enveloppe complexe associée  $P_{x_e}$  :  $P_x = \frac{P_{x_e}}{2}$
- $T_s$  représente la durée symbole et  $N_s$  le facteur de suréchantillonnage. On a  $T_s = N_s T_e$  mais également  $T_s = \log_2(M) T_b$  lorsqu'un symbole code  $\log_2(M)$  bits,  $M$  étant l'ordre de la modulation.
- $\frac{N_0}{2}$  est la DSP du bruit blanc introduit par le canal.
- $SNR = \frac{P_{x_e}}{2 N_0 F_e}$  est le rapport signal à bruit de la simulation (bruit complexe de DSP égale à  $2 N_0$  introduit dans la bande  $F_e$ ).

Soit en dB :

$$\left( \frac{E_b}{N_0} \right)_{dB} = SNR_{dB} + 10 \log_{10} \left( \frac{N_s}{\log_2(M)} \right)$$

### 3 Ajout du codage canal

Le standard DVB-S spécifie un codage canal constitué de deux codes concaténés : un code de Reed Solomon RS(204,188) suivi d'un code convolutif (7,1/2) qui peut être poinçonné pour obtenir différents rendements (1/2, 2/3, 3/4, 5/6 et 7/8). Afin d'optimiser les performances du codage canal un entrelaceur de type convolutif est ajouté entre les deux codes.

Dans cette partie, les simulations pourront être effectuées pour des valeurs de  $E_b/N_0$  allant de  $-4$  à  $4$  dB et les TEBs devront être tracés en fonction de  $E_b/N_0$ , du rapport signal à bruit (SNR) de la transmission et, également, de  $(E_b/N_0)_{utile}$  :

$$(E_b/N_0)_{utile} = \frac{E_b/N_0}{\nu}, \text{ en notant } \nu \text{ le rendement du code}$$

#### 3.1 Introduction du code convolutif

Afin de satisfaire au standard DVB-S, on devra ajouter au bloc modulateur/démodulateur sur canal AWGN réalisé précédemment un codage convolutif (7,1/2) de polynômes générateurs  $g_1 = 171_{oct}$  et  $g_2 = 133_{oct}$ . On utilisera, pour cela, les fonctions *poly2trellis.m* et *convenc.m* de matlab.

Le décodage d'un code convolutif se fait en utilisant l'algorithme de Viterbi (fonction *vitdec.m* de matlab). Deux modes de décodage sont possibles : décodage de Viterbi hard et décodage de Viterbi soft. Ces deux options sont accessibles dans la fonction *vitdec.m*.

1. Afin de vous familiariser avec le fonctionnement des fonctions Matlab permettant le codage convolutif, commencez par mettre en place un code convolutif (3,1/2) de polynômes générateurs  $g_1 = 5_{oct}$  et  $g_2 = 7_{oct}$  et
  - Retrouvez le treillis associé au code à partir des éléments fournis par la fonction *poly2trellis.m* de Matlab.
  - En observant la sortie de la fonction *convenc.m* de matlab pour un nombre limité de bits générés, retrouvez l'information binaire codée attendue, avec ou sans poinçonnage.
  - Utilisez la fonction *vitdec.m* de Matlab pour retrouver les bits émis.
2. Ajoutez le codage convolutif (7,1/2) du DVB-S, et le décodeur associé, au bloc modulateur/démodulateur sur canal AWGN réalisé précédemment.
  - Testez les deux modes de décodage : soft et hard et comparez les TEB obtenus sans codage, avec codage et décodage soft, avec codage et décodage hard.
  - Identifiez ce qui différencie le décodage hard du décodage soft, lequel présente les meilleures performances et pourquoi.
  - Justifiez les positions relatives des différentes courbes de tracés de TEB (en fonction de  $E_b/N_0$ , de  $E_b/N_0$  utile et du rapport signal à bruit de la transmission) en mobilisant les éléments théoriques vus en cours de communications numériques et de codage canal.
3. En utilisant une matrice de poinçonnage  $P = [1101]$  pour obtenir un taux de codage de 2/3 (voir figure suivante), vous comparerez les TEBs obtenus avec et sans poinçonnage pour un décodage soft. Il est possible de fournir la matrice de poinçonnage aux fonctions Matlab *convenc.m* et *vitdec.m*.
  - Quels sont les avantages/inconvénients du poinçonnage ?
  - Pourquoi est-ce une erreur d'utiliser le décodage de Viterbi hard en cas de poinçonnage ?

Table 2: Punctured code definition

Original code			Code rates									
			1/2		2/3		3/4		5/6		7/8	
K	G1 (X)	G2 (Y)	P	dfree	P	dfree	P	dfree	P	dfree	P	dfree
7	171 <sub>oct</sub>	133 <sub>oct</sub>	X: 1 Y: 1 I=X <sub>1</sub> Q=Y <sub>1</sub>	10	X: 10 Y: 11 I=X <sub>1</sub> Y <sub>2</sub> Y <sub>3</sub> Q=Y <sub>1</sub> X <sub>3</sub> Y <sub>4</sub>	6	X: 101 Y: 110 I=X <sub>1</sub> Y <sub>2</sub> Q=Y <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	5	X: 10101 Y: 11010 I=X <sub>1</sub> Y <sub>2</sub> Y <sub>4</sub> Q=Y <sub>1</sub> X <sub>3</sub> X <sub>5</sub>	4	X: 1000101 Y: 1111010 I=X <sub>1</sub> Y <sub>2</sub> Y <sub>4</sub> Y <sub>6</sub> Q=Y <sub>1</sub> Y <sub>3</sub> X <sub>5</sub> X <sub>7</sub>	3

NOTE: 1 = transmitted bit  
0 = non transmitted bit

FIGURE 2 – Code convolutif du DVB-S : schémas de poinçonnage

### 3.2 Introduction du code bloc de Reed Solomon

Afin de satisfaire au standard DVB-S, on devra ajouter au schéma précédent (bloc modulateur/démodulateur + codage convolutif sur canal AWGN) un code de Reed Solomon : RS(204,188). Il s'agit d'une version raccourcie du code RS(255,239). Afin de générer les matrices pour le codage et le décodage, on pourra utiliser les fonctions *comm.RSEncoder.m* et *comm.RSDecoder* de Matlab. Pour réaliser le codage et le décodage on utilisera la fonction *step* de Matlab.

1. Ajoutez le codage de Reed Solomon à la chaîne précédente sur canal AWGN avec codage convolutif et comparez les taux d'erreurs binaires obtenus sans et avec codage de Reed Solomon.
2. Quel est, quels sont, le ou les intérêt(s) de concaténer deux codes de types différents, bloc et convolutif ?

### 3.3 Introduction de l'entrelaceur convolutif

Afin d'améliorer les performances du codage, le standard DVB-S propose d'insérer un entrelaceur entre le code de Reed Solomon et le code convolutif. Cet entrelaceur est de type convolutif (voir figure suivante).

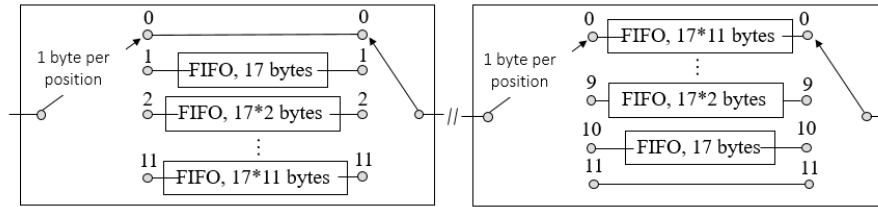


FIGURE 3 – Entrelaceur du DVB-S.

Pour l'implanter vous pouvez utiliser la fonction *convintrlv.m* de Matlab et utiliser la fonction *convdeintrlv.m* pour le désentrelacement.

1. Ajoutez l'entrelacement à la chaîne précédente sur canal AWGN avec codage de Reed Solomon et codage convolutif et comparez les taux d'erreurs binaires obtenus sans et avec entrelacement. Attention l'entrelacement doit porter sur les symboles du code RS (octets) pas sur les bits.
2. En quoi l'entrelacement permet-il d'améliorer les performances du codage canal ?

## 4 Notation - Consignes pour les rendus et l'oral

La note du projet sera composée d'une note d'oral, d'une note de rapport et d'une note d'implantation. La note d'oral comptera pour 50% de la note finale, tandis que la note rapport + implantation fournira les 50% restants.

### 4.1 Soutenance orale

La soutenance orale va permettre d'évaluer :

1. que vous êtes bien les auteurs des programmes MATLAB que vous présenterez. Vous devrez être en mesure d'expliquer ce que fait chaque ligne de code, d'expliquer ce que font les fonctions que vous utilisez et de justifier leur paramétrage, par rapport au système à implanter ou par rapport à des concepts théoriques de communications numériques et de codage canal.
2. que vous savez évaluer les performances des chaînes de transmission numériques. Vous devrez être en mesure d'analyser les courbes de performance des différentes chaînes de transmissions que vous avez simulées et de comparer ces courbes en justifiant leurs positions relatives. Ces justifications doivent être fondées sur une analyse des blocs constituant chacune

des chaînes de transmissions simulées. Savoir analyser un bloc d'une chaîne de transmission, c'est savoir expliquer son fonctionnement, justifier sa présence dans la chaîne, savoir expliquer ses propriétés, ses limites.

le rapport au fur et à mesure des séances car il vous permettra de vous questionner sur les points que nous aborderons lors de l'oral. Vous pouvez venir à l'oral avec votre rapport ou une première ébauche de votre rapport.

Soyez également au clair sur les fichiers Matlab à lancer pour nous montrer telle ou telle partie du projet.

## 4.2 Rapport

Le rapport va permettre d'évaluer le point 2 de la soutenance orale, mais à l'écrit.

Comme tout rapport, il doit comporter : un sommaire, une introduction présentant les objectifs du travail, une conclusion synthétisant les principaux résultats obtenus et une bibliographie comprenant les références éventuellement utilisées, notamment pour expliquer vos résultats. On peut y ajouter une table des illustrations.

Les équations doivent être réalisées avec un éditeur d'équation.

Lorsque vous commentez une figure vous devez y faire référence dans votre texte : par exemple "comme le montre la figure 1, ..."

Les figures incluses dans vos rapports doivent être lisibles et toutes comporter un titre (utiliser *title* sous Matlab), des labels sur leurs axes (utiliser *xlabel* et *ylabel* sous matlab) ainsi qu'une légende si plusieurs courbes sont tracées sur la même figure (utiliser *legend* sous matlab).

Toutes vos explications/justifications doivent 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...

Attention votre rapport doit être relu, éventuellement passé au correcteur orthographique et grammatical.

## 4.3 Codes

L'examen des codes MATLAB va permettre d'évaluer :

1. que vous savez programmer dans ce langage. Une attention particulière sera portée sur l'utilisation pertinente et explicite des noms pour les fichiers, constantes, variables, fonction, ?, sur la présence de commentaires, sur l'utilisation et la déclaration de constantes en début de programme.
2. que vous savez adapter la programmation aux contraintes particulières de la simulation de chaînes de transmission numérique, notamment en écrivant des commentaires utilisant la terminologie adéquate des enseignements de communications numériques et de codage canal.

Les fichiers .m fournis devront porter des noms significatifs et permettre d'exécuter les différentes étapes demandées dans le projet, sans avoir à ajouter des commentaires pour supprimer certaines parties... Si besoin, vous pouvez fournir un mode d'emploi dans le rapport pour savoir ce qui doit être lancé pour réaliser les différentes fonctions implantées.

## 5 Annexe

### 5.1 Puissance de bruit à introduire dans les simulations

Dans la chaîne passe-bas équivalente, le bruit qui vient s'ajouter à l'enveloppe complexe,  $x_e(t)$ , associée au signal transmis  $x(t)$ , est également complexe :  $n_e(t) = n_I(t) + jn_Q(t)$ . Sa densité spectrale de puissance  $S_{n_e}(f) = 2N_0$  sur la bande  $F_e$ , ce qui donne une densité spectrale de puissance de  $N_0$  pour les DSPs de ses voies en phase et quadrature,  $S_{n_I}(f)$  et  $S_{n_Q}(f)$  et des variances données par :

$$\sigma_{n_I}^2 = \sigma_{n_Q}^2 = N_0 F_e = \frac{E_s}{N_0} F_e = \frac{P_x T_s}{\frac{E_s}{N_0}} F_e = \frac{P_{x_e} N_s}{2 \log_2(M) \frac{E_b}{N_0}},$$

où

- $E_s$  représente l'énergie symbole à l'entrée du récepteur :  $E_s = \log_2(M) E_b$ , si  $E_b$  représente l'énergie binaire à l'entrée du récepteur et  $M$  l'ordre de modulation,
- $T_s$  représente la période symbole,
- $N_s$  représente le facteur de suréchantillonnage :  $T_s = N_s T_e$ ,  $T_e = 1/F_e$  étant la fréquence d'échantillonnage,
- $P_{x_e}$  représente la puissance de l'enveloppe complexe,  $x_e(t)$ , associée au signal modulé,  $x$  :  $P_x = \frac{P_{x_e}}{2}$ , si  $P_x$  est la puissance du signal modulé.

### 5.1.1 Précision sur les mesures de taux d'erreur binaire

Le taux d'erreur binaire,  $TEB$ , peut être représenté comme une somme de variables aléatoires discrètes  $X_k$  prenant leurs valeurs dans l'ensemble  $\{0, 1\}$  avec les probabilités  $P[X_k = 0] = 1 - p$  (pas d'erreur) and  $P[X_k = 1] = p$  (une erreur) :

$$TEB = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_k.$$

L'erreur quadratique relative sur le TEB est donnée par :

$$\epsilon^2 = \frac{\sigma_{BER}^2}{m_{BER}^2},$$

où  $m_{BER}$  and  $\sigma_{BER}^2$  représentent respectivement la moyenne et la variance sur l'estimation du TEB. La précision sur la mesure du TEB sera donnée par  $\epsilon$ . On peut écrire :

$$m_{TEB} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N E[X_k] = \frac{1}{N} N (1 \times p + 0 \times (1 - p)) = p$$

and

$$\sigma_{TEB}^2 = E \left[ \left( \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_k \right)^2 \right] - p^2 = \frac{1}{N^2} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^N E[X_k X_i] - p^2$$

- si  $k = i$  ( $N$  cas) alors  $E[X_k^2] = 1^2 \times p + 0^2 \times (1 - p) = p$
- si  $k \neq i$  ( $N^2 - N$  cas) alors  $E[X_k X_i] = E[X_k] E[X_i] = p^2$

D'où :

$$\sigma_{BER}^2 = \frac{1}{N^2} \{Np + (N^2 - N)p^2\} - p^2 = \frac{p(1-p)}{N}$$

On constate que la variance de l'erreur tend vers 0 quand  $N$  augmente et on peut écrire l'erreur quadratique relative sur le TEB de la manière suivante :

$$\epsilon^2 = \frac{\sigma_{TEB}^2}{m_{TEB}^2} = \frac{1-p}{Np} \simeq \frac{1}{Np} \text{ for } p < 1$$

On obtient alors :

- Le nombre d'éléments binaires,  $N$ , à générer, pour obtenir une précision  $\epsilon$  sur la mesure de TEB, quand la valeur est, a priori, connue. Par exemple, si on veut mesurer un TEB de  $10^{-2}$  avec une précision de 10%, nous devons générer  $N = \frac{1}{10^{-2} \times (10^{-1})^2} = 10^4$  bits.
- le nombre de simulations à réaliser si la valeur à mesurer pour le TEB n'est pas, a priori, connue. On fera alors des simulations jusqu'à observer  $1/\epsilon^2$  erreurs pour obtenir une mesure avec une précision  $\epsilon$ . Par exemple, si nous voulons mesurer le TEB avec une précision  $\epsilon = 10\%$ , il faudra compter les erreurs jusqu'à obtenir  $1/\epsilon^2 = 10^2$  erreurs avant de considérer la mesure de TEB obtenue comme disposant de la précision requise.

## 6 Références

- [1] : Digital Video Broadcasting (DVB) : Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services, norme ETSI EN 300 421.
- [2] : Lien vers les cours de communications numériques de 1A
- [3] : Lien vers les cours de codage canal de 2A