

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.

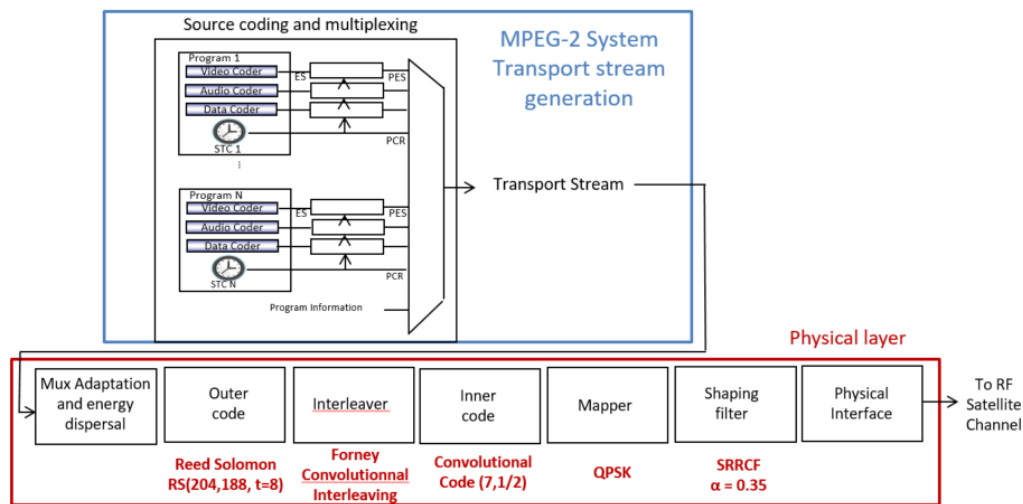


FIGURE 1 – DVB-S physical layer

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. Déterminez le facteur de suréchantillonnage minimal à utiliser pour respecter la condition d'échantillonnage de Shannon. Afin d'avoir de meilleures visualisations, vous utiliserez un facteur de suréchantillonnage un peu plus grand.
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 ce que vous avez mis en place pour assurer ce TEB nul sans canal.
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 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). 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 on a, d'une part, $T_s = \log_2(M) T_b$ lorsqu'un symbole code $\log_2(M)$ bits, M étant l'ordre de la modulation et, d'autre part $T_s = N_s T_e$, N_s représentant le facteur de suréchantillonnage.
- $\frac{N_0}{2}$ 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 et lequel présente les meilleures performances.
 - Que vous apporte, comme information sur le système simulé, les différents 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) ?
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 n'est-il pas pertinent 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 _{oct}	133 _{oct}	X: 1 Y: 1 I=X ₁ Q=Y ₁	10	X: 10 Y: 11 I=X ₁ Y ₂ Y ₃ Q=Y ₁ X ₃ Y ₄	6	X: 101 Y: 110 I=X ₁ Y ₂ Q=Y ₁ X ₃	5	X: 10101 Y: 11010 I=X ₁ Y ₂ Y ₄ Q=Y ₁ X ₃ X ₅	4	X: 1000101 Y: 1111010 I=X ₁ Y ₂ Y ₄ Y ₆ Q=Y ₁ Y ₃ X ₅ X ₇	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). Le codage pourra être réalisé en utilisant la fonction *comm.RSEncoder.m* de Matlab, tandis que le décodage pourra être réalisé en utilisant la fonction *comm.RSDecoder*.

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).

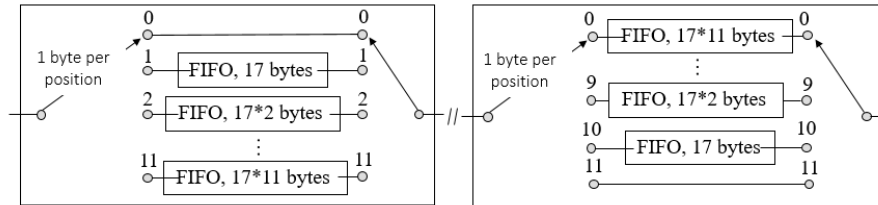


FIGURE 3 – Entrelaceur du DVB-S.

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 Oral

L'oral sera l'occasion de vérifier que vous avez bien compris l'utilité des différents éléments des chaînes de transmission implantées aux différentes étapes du projet, et les différents paramètres qui permettent de les dimensionner. Il sera également l'occasion de vérifier que vos implantations sous Matlab sont bien maîtrisées.

Nous vous conseillons vivement de faire 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 et au clair sur la manière dont vous les avez implantées.

4.2 Rapport

Le rapport, comme tout rapport, 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

Vos codes doivent être commentés de manière suffisante et claire :

- "suffisante" : au moins un commentaire par action réalisée dans la chaîne de transmission (par exemple : génération de l'information binaire à transmettre, mapping binaire à moyenne nulle ...). Chaque action pouvant ensuite prendre quelques lignes, on ajoutera des commentaires, si nécessaire, à la bonne compréhension du code.
- "claire" : on utilisera les bons termes pour représenter les éléments classiques d'une chaîne de transmission (par exemple : mapping binaire à moyenne nulle plutôt que génération de +1, -1).

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 :

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

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 σ_{BER}^2 représentent respectivement la moyenne et la variance sur l'estimation du TEB. La précision sur la mesure du TEB sera donnée par ϵ . 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 :

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

On obtient alors :

- Le nombre d'éléments binaires, N , à générer, pour obtenir une précision ϵ 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 ϵ . 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.