

Projet de Traitement de Signal et Télécommunications

Étude d'une chaîne de transmission sur porteuse pour une transmission satellite fixe

Nicolas BAILLIET

Paul LOUKA

30 mai 2024

Table des matières

1	Introduction	2
2	Implantation d'une transmission avec transposition de fréquence	2
3	Implantation de la chaîne passe-bas équivalente	6
4	Comparaison du modulateur DVB-S avec un modulateur 4-ASK	9
5	Comparaison du modulateur DVB-S avec un des modulateurs DVB-S2	11

1 Introduction

L'objectif de ce projet est d'étudier l'implémentation de chaînes de transmission pour la diffusion de signaux numériques par satellite fixe. Nous allons étudier et comparer plusieurs normes de transmission, notamment le DVB-S et sa version plus récente DVB-S2, qui utilisent des mappings PSK, et une alternative utilisant le mapping ASK.

2 Implantation d'une transmission avec transposition de fréquence

Commençons par étudier une transmission au format DVB-S, qui utilise un mapping Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) pour la modulation du signal. Ce mapping est équivalent au 4-ASK à un déphasage de $\frac{\pi}{4}$ près. Par souci de simplicité (permet une généralisation vers les M-PSK), nous utiliserons 4-PSK pour la suite de l'étude, les résultats obtenus étant équivalents.

La chaîne de transmission suit le schéma suivant :

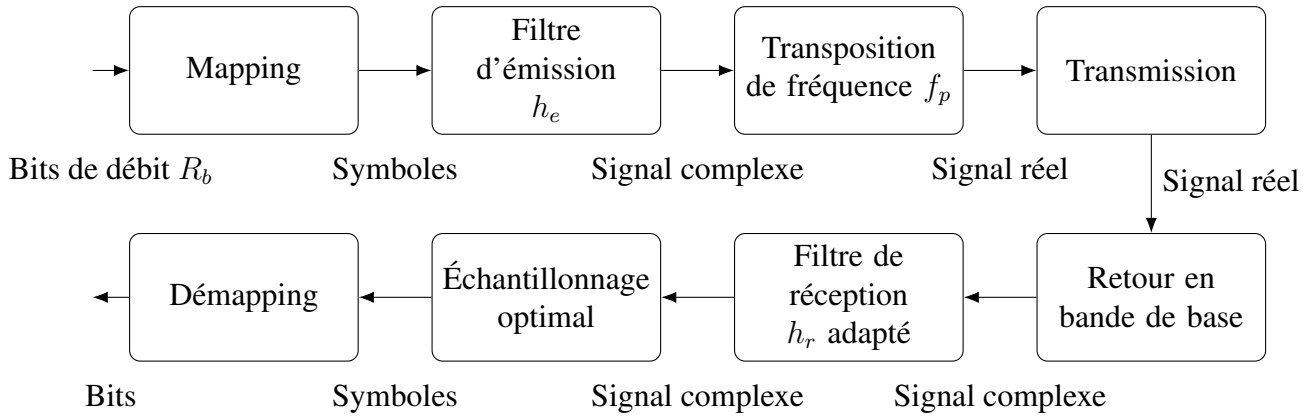


FIGURE 1 – Chaîne de transmission

Le filtre d'émission h_e est en racine de cosinus surélevé, de roll-off $\alpha = 0.35$. Le filtre de réception h_r est adapté à h_e . Tout au long de l'étude, il vérifie $h_r = h_e$ car nous ne considérons pas de filtre de canal. Dans cette partie nous avons $f_p = 2kHz$, $R_b = 3kbps$ et une fréquence d'échantillonnage $F_e = 24kHz$.

Avec le mapping 4-PSK, nous obtenons des symboles complexes de la forme $d_k = a_k + jb_k$ avec $a_k \in \{-1, 1\}$, $b_k \in \{-1, 1\}$. Nous avons donc un signal qui se décompose en deux signaux réels en quadrature de phase.

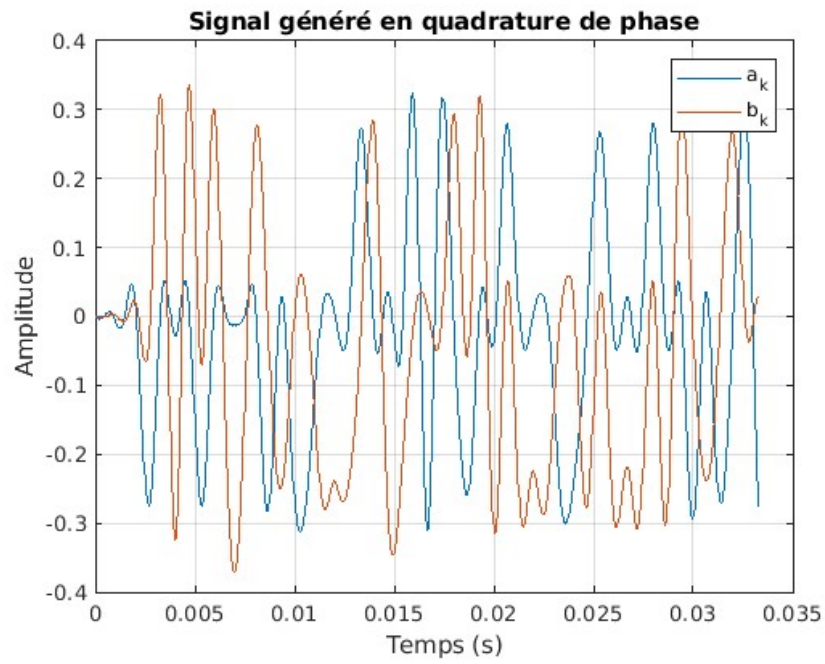


FIGURE 2 – Signaux réels issus du mapping QPSK

Une fois le signal transposé sur la fréquence f_p et converti en signal réel, nous obtenons le signal émis suivant :

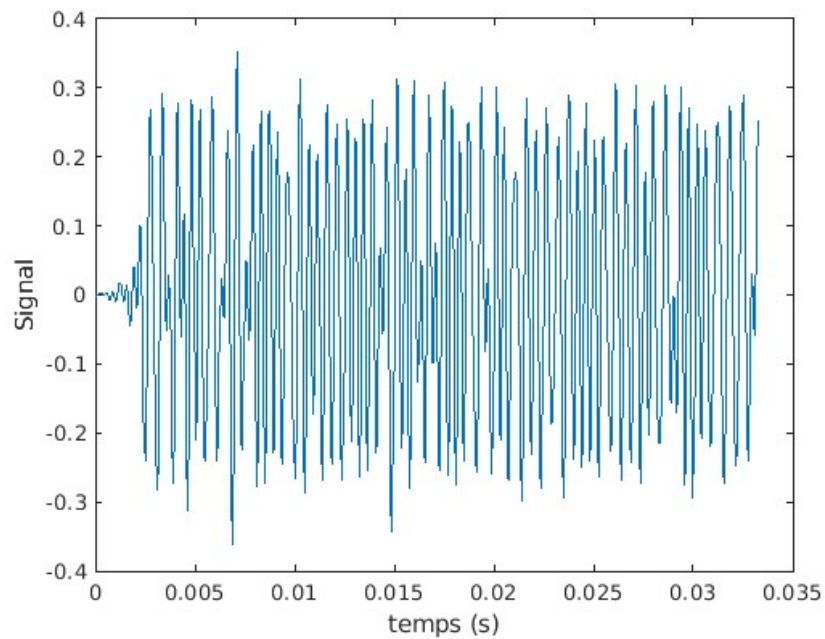


FIGURE 3 – Signal transmis sur fréquence porteuse

On peut visualiser la densité spectrale de puissance du signal transmis sur la fréquence porteuse :

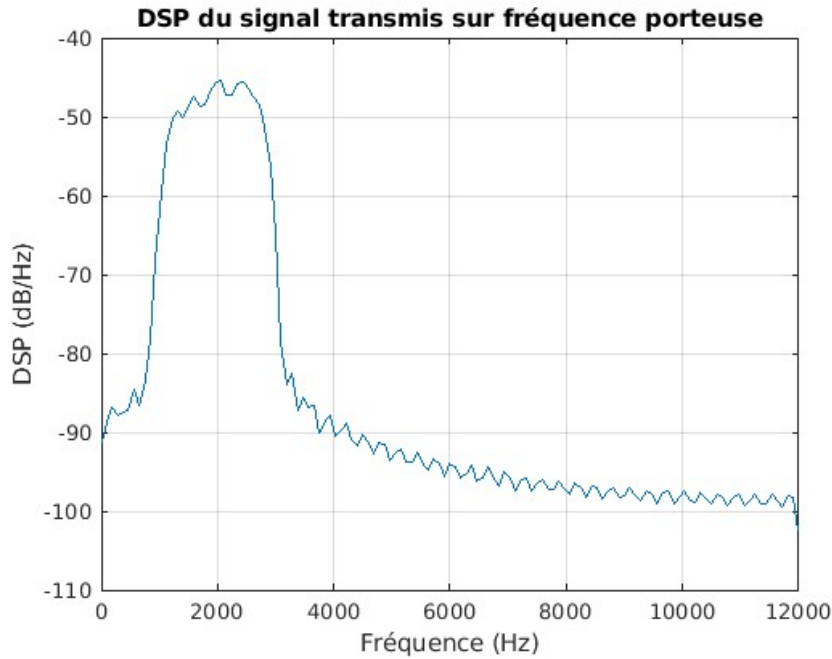


FIGURE 4 – DSP du signal transmis sur fréquence porteuse

On observe bel et bien un signal centré autour de $f_p = 2\text{kHz}$. La forme de la DSP correspond à la transformée de Fourier d'une racine de cosinus surélevé, i.e. notre filtre d'émission h_e .

Le signal transmis dans le canal subit un bruit additif blanc gaussien, de puissance

$$\sigma^2 = \frac{P_x N_s}{2 \log_2(M) \text{SNRB}}$$

avec P_x la puissance du signal, N_s le nombre d'échantillons par symbole, M l'ordre de modulation et SNRB le rapport signal sur bruit par bit à l'entrée du récepteur.

Le signal reçu est ensuite transposé en bande de base, puis filtré par le filtre de réception h_r adapté. Pour finir, évaluons le Taux d'Erreur Binaire (TEB) en fonction du SNRB.

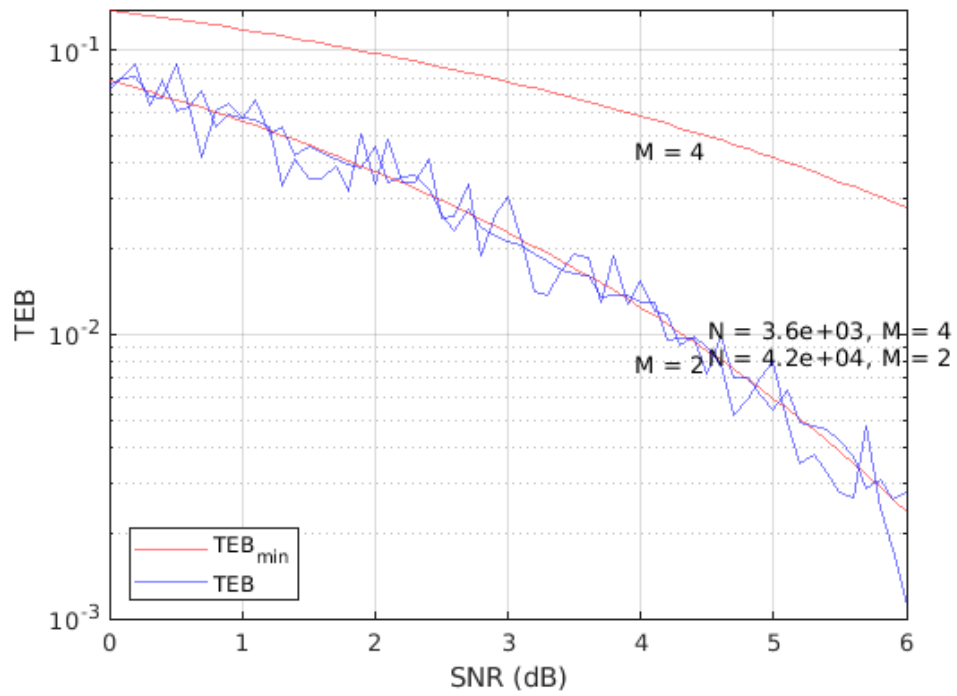


FIGURE 5 – TEB et TEB théorique en fonction du SNRB

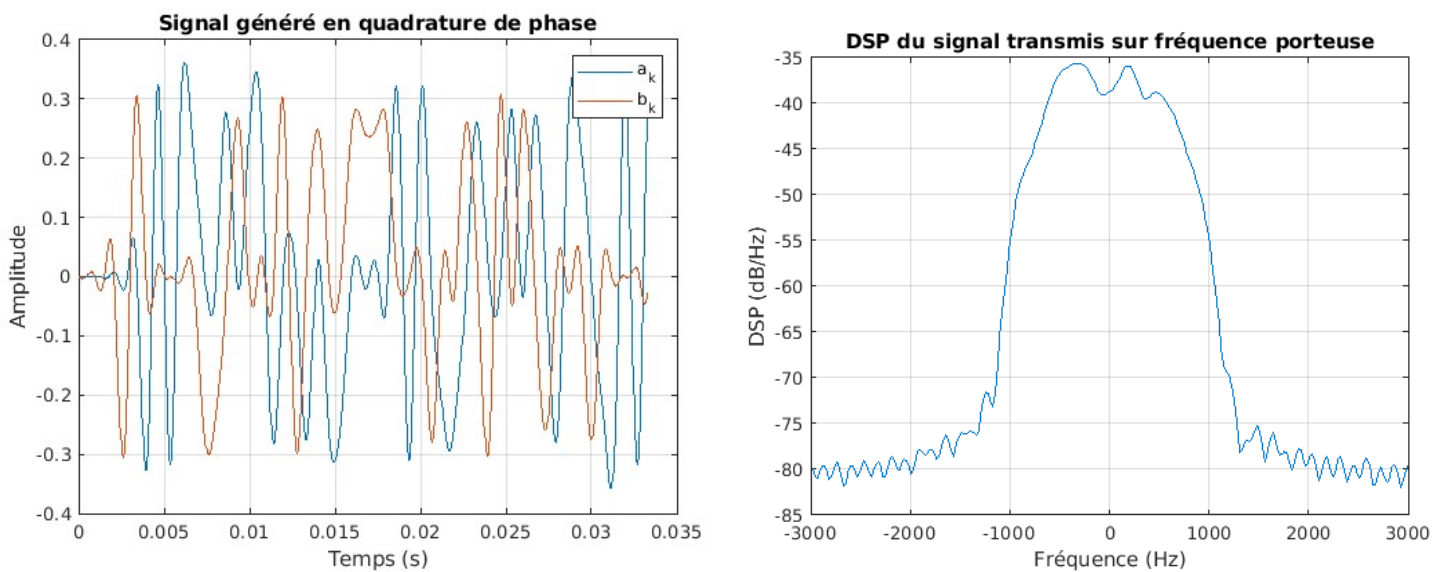
On observe que le TEB par bit de la chaîne de transmission suit la courbe théorique correspondant à une ordre de modulation $M = 2$ pour un mapping en Amplitude Shift Keying (ASK). C'est en fait attendu, car le mapping QPSK permet de répartir un plus grand nombre de symboles ($M = 4$) sur une constellation de même taille.

3 Implantation de la chaîne passe-bas équivalente

Nous conservons les mêmes paramètres que précédemment, excepté la fréquence d'échantillonnage qui est ici $F_e = 6kHz$. Nous allons modéliser la même chaîne de transmission, mais en utilisant un passe-bas équivalent.

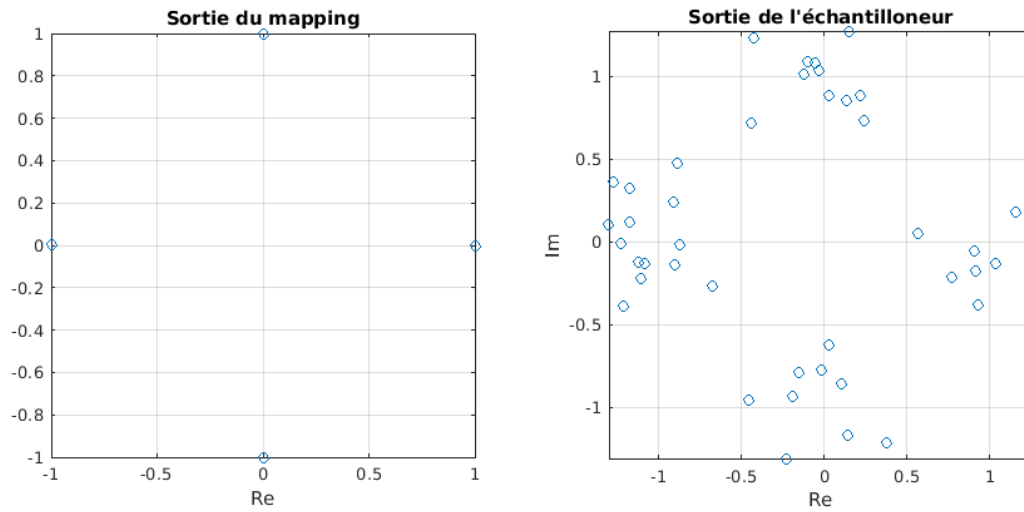
Le principe est d'ôter l'étape de transposition de fréquence, et de considérer que le signal transmis est en bande de base. Pour maintenir un bruit effectivement identique, nous devons utiliser un bruit complexe dans le canal de transmission.

Le signal émis est donc du même type que précédemment mais avec une DSP centrée autour de $0Hz$:

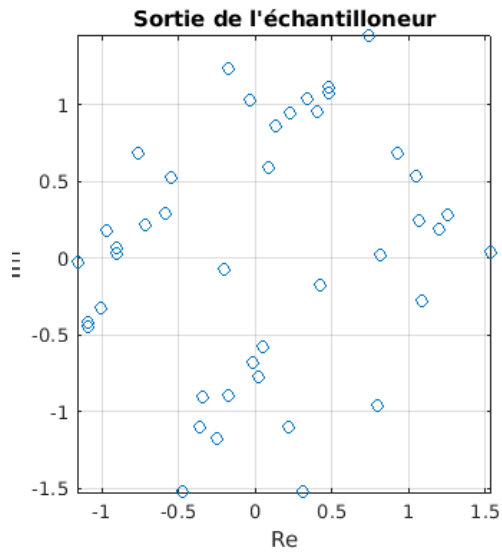


Visualisons maintenant les constellations correspondant aux symboles en sortie du mapping et en sortie de l'échantillonnage optimal (pour rappel, notre mapping est en 4-PSK, donc il manque une rotation de $\frac{\pi}{4}$ pour obtenir les symboles en QPSK).

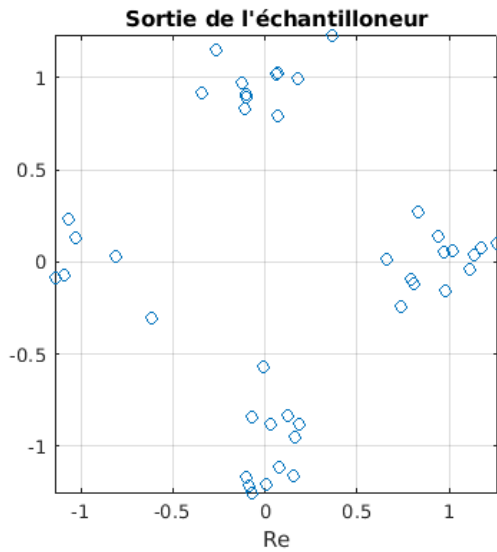
Constellation des symboles, SNRB = 4



Constellation des symboles, SNRB = 2



Constellation des symboles, SNRB = 10



Comme attendu, les symboles en sortie du mapping sont répartis sur une constellation de 4 points sur le plan complexe, avec leurs arguments consécutifs séparés de $\frac{\pi}{2}$. En sortie de l'échantillonnage optimal, les symboles suivent une distribution gaussienne autour des points de la constellation du mapping d'origine. La variance autour de chaque point est proportionnelle à la puissance du bruit, et donc au SNRB. Plus le SNRB est élevé, plus les symboles sont proches des points de la constellation, et inversement.

Le profil du TEB en fonction du SNRB est identique à celui obtenu précédemment, ce qui est attendu car les deux chaînes de transmission sont équivalentes.

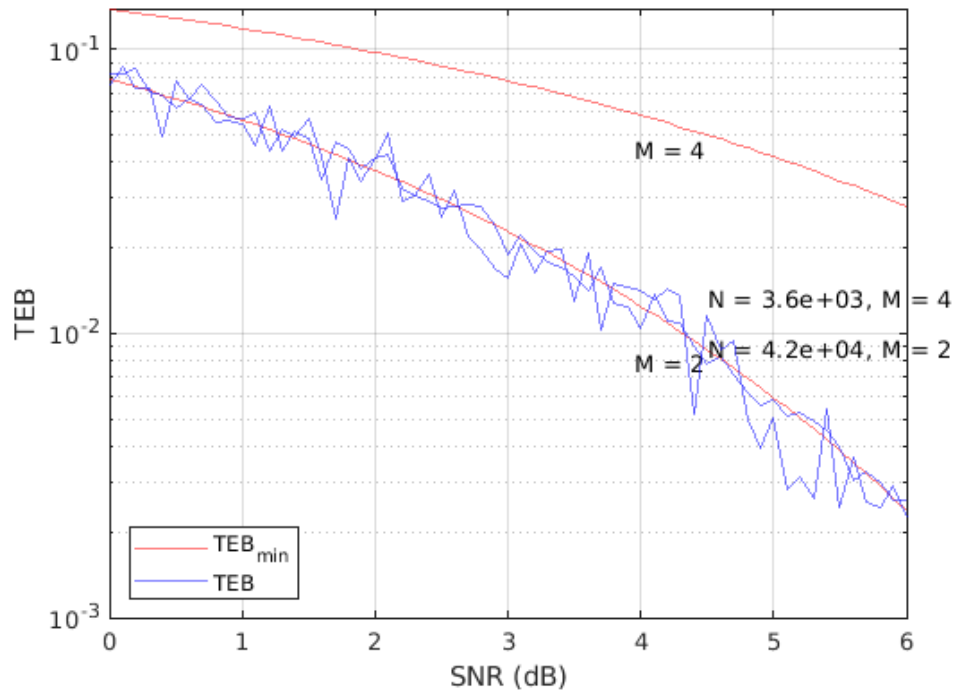


FIGURE 6 – TEB et TEB théorique en fonction du SNRB

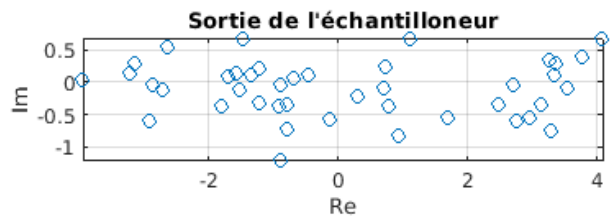
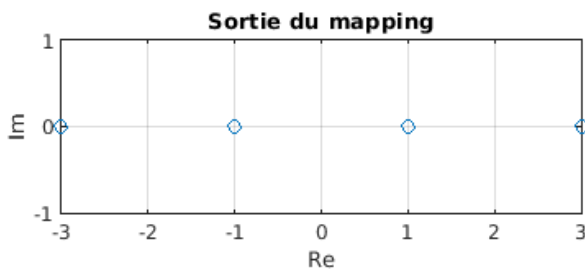
Ici, les chaînes de transmission sont équivalentes car on utilise un bruit blanc gaussien uniforme sur toutes les fréquences. En réalité, le bruit dépend de la bande de fréquence considérée, et transposer le signal en fréquence peut permettre de réduire son impact sur le signal émis.

4 Comparaison du modulateur DVB-S avec un modulateur 4-ASK

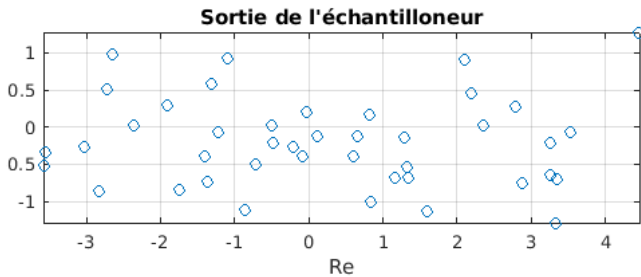
L'implémentation du modulateur 4-ASK revient à modifier uniquement le mapping utilisé pour la modulation, qui s'effectue désormais en amplitude et non plus en phase. Les symboles en sortie du mapping sont de la forme $d_k = a_k$ avec $a_k \in \{-3, -1, 1, 3\}$.

On obtient les constellations suivantes :

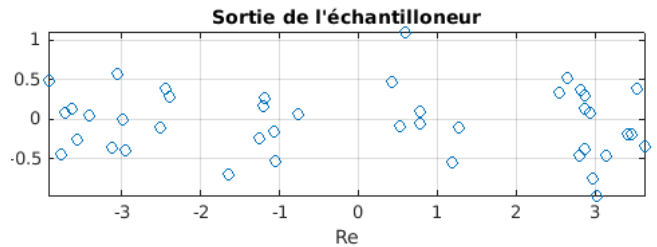
Constellation des symboles, SNRB = 4



Constellation des symboles, SNRB = 2



Constellation des symboles, SNRB = 10



Les symboles en sortie du mapping sont répartis sur une constellation de 4 points, tous sur la droite réelle, séparés de 2 unités. En sortie de l'échantillonnage, les symboles suivent toujours une distribution gaussienne autour des points de la constellation du mapping.

Évaluons le TEB en fonction du SNRB :

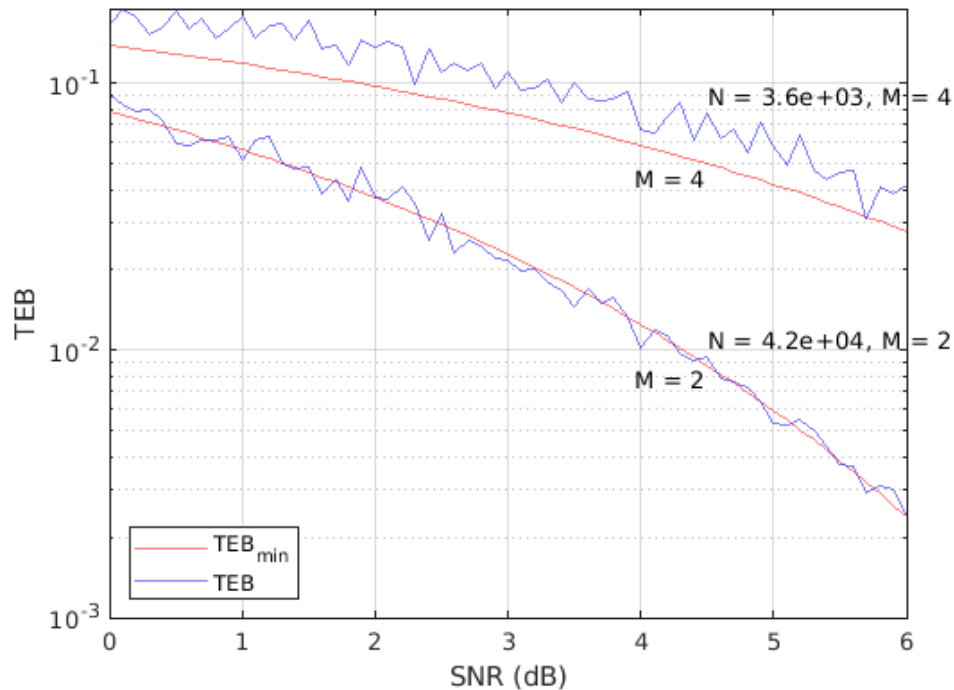


FIGURE 7 – TEB et TEB théorique en fonction du SNRB

Ici, le TEB pour un ordre de modulation M suit bien la courbe théorique correspondante. Le bruit est globalement plus important que pour le QPSK, car les symboles sont plus éloignés les uns des autres avec un mapping en 4-ASK. En effet, on utilise ainsi plus d'énergie pour transmettre un symbole, ce qui rend le système plus sensible au bruit. On remarque donc que le QPSK présente une meilleure efficacité en puissance que le 4-ASK.

En termes d'efficacité spectrale, les deux modulateurs QPSK et 4-ASK sont équivalents, car ils transmettent le même nombre de bits par symbole et utilisent le même filtre de mise en forme.

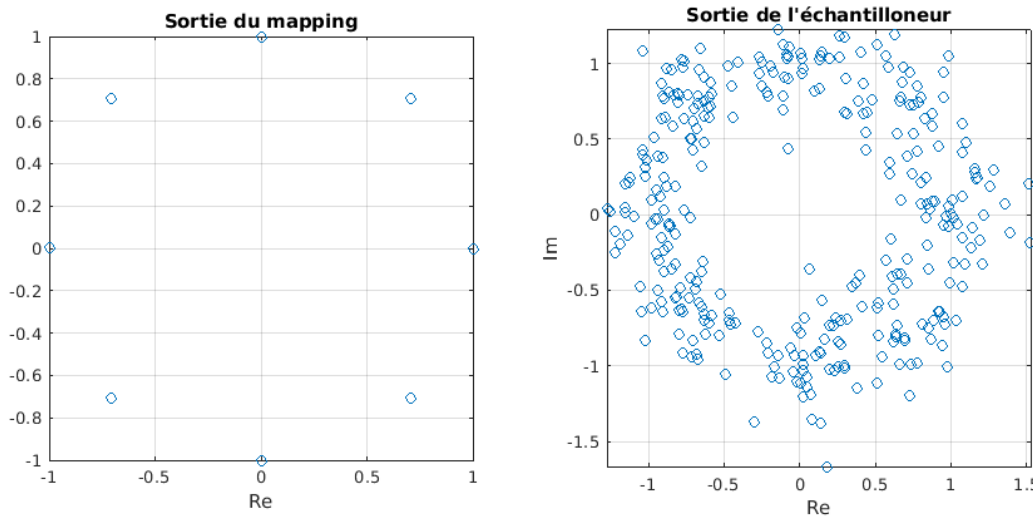
Il est clair que le QPSK est plus adapté à une transmission par satellite, car il permet de transmettre plus d'information avec une puissance équivalente.

5 Comparaison du modulateur DVB-S avec un des modulateurs DVB-S2

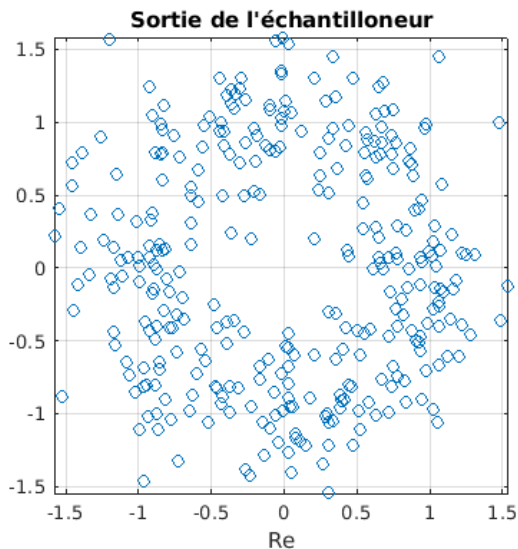
Le DVB-S2 est une évolution du DVB-S, qui remplace le mapping QPSK par un mapping 8-PSK, et change la forme du filtre d'émission pour un filtre en racine de cosinus surélevé de roll-off $\alpha = 0.2$.

On obtient les constellations suivantes :

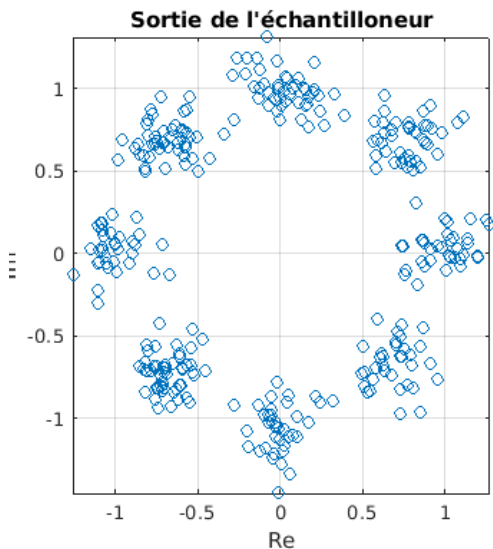
Constellation des symboles, SNRB = 4



Constellation des symboles, SNRB = 2



Constellation des symboles, SNRB = 10



La seule différence notable est que le nombre de symboles issu du mapping est désormais de 8, répartis de manière uniforme sur un cercle de rayon 1, avec leurs arguments consécutifs séparés de $\frac{\pi}{4}$, non plus de $\frac{\pi}{2}$.

Évaluons le TEB en fonction du SNRB :

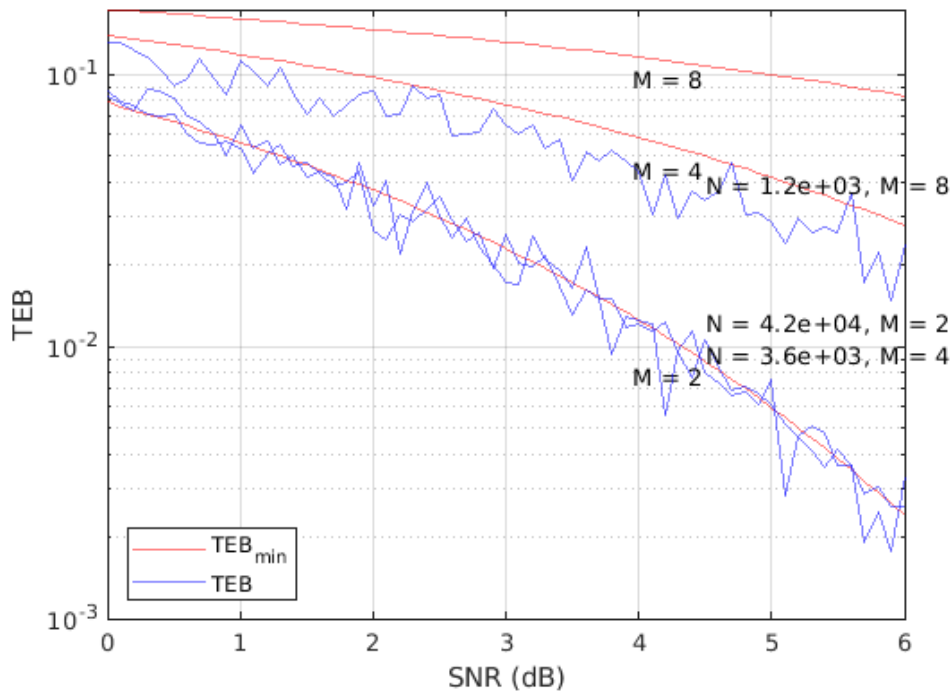


FIGURE 8 – TEB et TEB théorique en fonction du SNRB

Par la même logique que pour le mapping QPSK, le TEB pour le DVB-S2, d'ordre de modulation $M = 8$, suit la courbe théorique correspondante à un mapping en 4-ASK. On en conclut que le DVB-S2 est plus sensible au bruit que le DVB-S, et présente une moins bonne efficacité en puissance.

Cependant, comme l'ordre de modulation est plus élevé que pour le QPSK, le DVB-S2 présente une meilleure efficacité spectrale que le DVB-S.

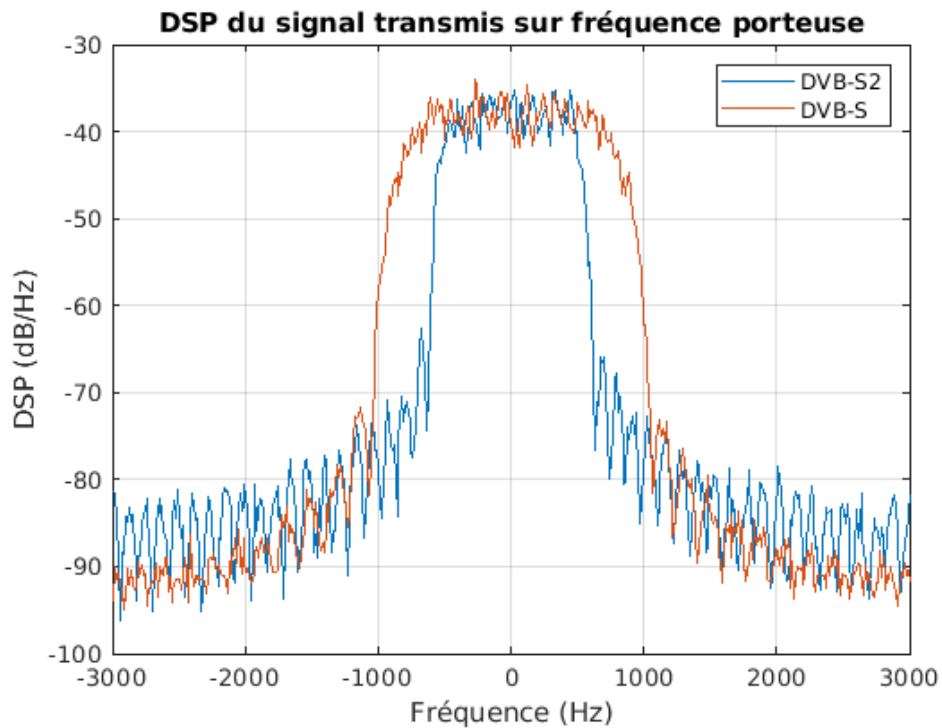


FIGURE 9 – Comparaison DSP entre DVB-S et DVB-S2

En conclusion, décider d'utiliser des modulations plus complexes (avec un ordre de modulation plus élevé) dépend des contraintes du système de transmission. Si la puissance est limitée, il est préférable d'utiliser des modulations plus simples comme le DVB-S. Si la puissance le permet, et qu'on souhaite transmettre plus d'information dans une bande de fréquence donnée, ou réduire la bande passante nécessaire, il est préférable d'utiliser des modulations plus complexes comme le DVB-S2.