
Projet Télécommunications et Traitement du signal

Frenois Etan & Rouot Emile

Mai 2024



Département Sciences du Numérique

Première année

Table des matières

1	Introduction	2
2	Implantation d'une transmission avec transposition de fréquence	2
2.1	Signaux générés sur les voies en phase et en quadrature	2
2.2	Signal transmis sur fréquence porteuse	3
2.3	Densité spectrale du signal transmis sur fréquence porteuse	3
2.4	Simulation du TEB et comparaison avec le TEB théorique de la chaîne étudiée .	3
3	Implantation de la chaîne passe-bas équivalente à la chaîne de transmission sur porteuse précédente	4
3.1	Signaux générés sur les voies en phase et en quadrature (chaîne passe-bas équivalente)	4
3.2	Densité spectrale de puissance de l'enveloppe complexe associée au signal transmis sur fréquence porteuse	5
3.3	Constellation en sortie de mapping	5
3.4	Constellations en sortie de l'échantillonneur pour différentes valeurs de E_b/N_0 (SNR)	6
3.5	Comparaison du TEB simulé à celui obtenu précédemment sur la chaîne implantée avec transposition de fréquence	7
4	Comparaison du modulateur DVB-S avec un modulateur 4-ASK	8
4.1	Implantation de la modulation 4-ASK	8
4.1.1	Constellation en sortie de mapping (4-ASK)	8
4.1.2	Constellations en sortie de l'échantillonneur pour différentes valeurs de E_b/N_0 (4-ASK)	8
4.1.3	Simulation du TEB et comparaison avec le TEB théorique de la chaîne étudiée (4-ASK)	9
4.2	Comparaison des résultats obtenus pour les modulateurs QPSK du DVB-S et 4-ASK	10
4.2.1	Résultats en termes d'efficacité en puissance	10
4.2.2	Résultats en termes d'efficacité spectrale	10
4.2.3	Identification de l'intérêt d'utiliser une modulation QPSK dans le DVB-S plutôt qu'une 4-ASK.	11
5	Comparaison du modulateur DVB-S avec un des modulateurs proposés par le DVB-S2	11
5.1	Implantation de la modulation DVB-S2	11
5.1.1	Tracé des constellations en sortie du mapping et en sortie de l'échantillonneur pour différentes valeurs de E_b/N_0	11
5.1.2	Comparaison du TEB simulé au TEB théorique de la chaîne étudiée . . .	12
5.2	Comparaison des modulateurs DVB-S et DVB-S2	13
5.2.1	Résultats en termes d'efficacité en puissance	13
5.2.2	Résultats en termes d'efficacité spectrale	13
5.2.3	Identification des avantages et inconvénients à utiliser de nouvelles modulations, type 8-PSK, et de nouvelles valeurs de roll-off dans les nouvelles versions du DVB-S	14
6	Conclusion	14

1 Introduction

Le DVB-S (Digital Video Broadcasting-Satellite) est une norme ETSI (European Telecommunication Standard Institute) pour la diffusion de flux numériques multimédias (son, vidéo, données) en utilisant un lien satellite. La première version a été publiée en 1994 et se base sur un modulateur QPSK avec une mise en forme en racine de cosinus surélevé de roll off égal à 0.35. Une deuxième version (DVB-S2), parue en 2005, propose la possibilité d'utiliser un modulateur 8-PSK avec une mise en forme en racine de cosinus surélevé de roll off égal à 0.2 (plusieurs modulateurs sont définis dans cette deuxième version).

L'objectif de ce travail a été de s'initier, via l'implantation de ces modulateurs, à l'étude de chaînes de transmissions sur fréquence porteuse

2 Implantation d'une transmission avec transposition de fréquence

Dans un premier temps, nous avons implanté une transmission au format DVB-S, avec un mapping QPSK, un filtre de mise en forme en racine de cosinus surélevé de roll off 0.35 et transposition de fréquence. Nous avons utilisé une fréquence d'échantillonnage $F_e = 24 \text{ kHz}$ pour transmettre un débit binaire $R_b = 3 \text{ kbps}$ et une fréquence porteuse $f_p = 2 \text{ kHz}$.

Pour une transmission fixe de type DVB, nous avons utilisé un canal de propagation à bruit additif et Gaussien (canal AWGN : Additive White Gaussian Noise). Nous avons introduit le bruit dans nos simulations grâce à la fonction *randn* de matlab, avec une puissance σ_n^2 définie comme suit :

$$\sigma_n^2 = \frac{P_x N_s}{2 \log_2(M) \frac{E_b}{N_0}}$$

avec M qui représente l'ordre de modulation, N_s le facteur de suréchantillonnage et P_x la puissance du signal à bruite (en sortie du modulateur).

Nous avons également fait en sorte d'implanter le démodulateur de manière optimale, c'est à dire en respectant le critère de Nyquist, en utilisant un filtrage adapté, un détecteur à seuil avec seuil optimaux, en échantillonnant aux instants optimaux ainsi qu'un démapping adapté au mapping utilisé.

2.1 Signaux générés sur les voies en phase et en quadrature

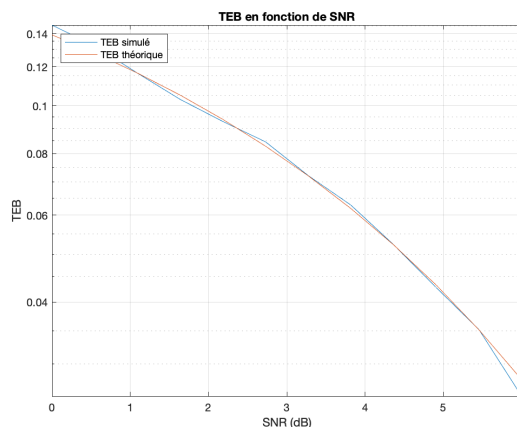


Figure 1: Tracé des signaux générés sur les voies en phase et en quadrature

2.2 Signal transmis sur fréquence porteuse

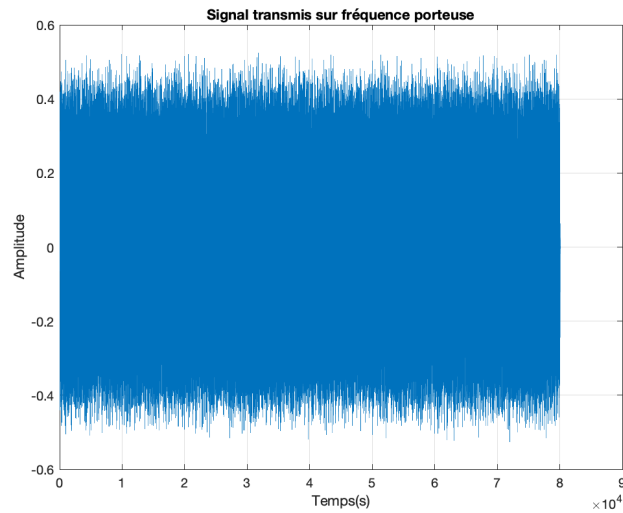


Figure 2: Tracé du signal transmis sur fréquence porteuse

2.3 Densité spectrale du signal transmis sur fréquence porteuse

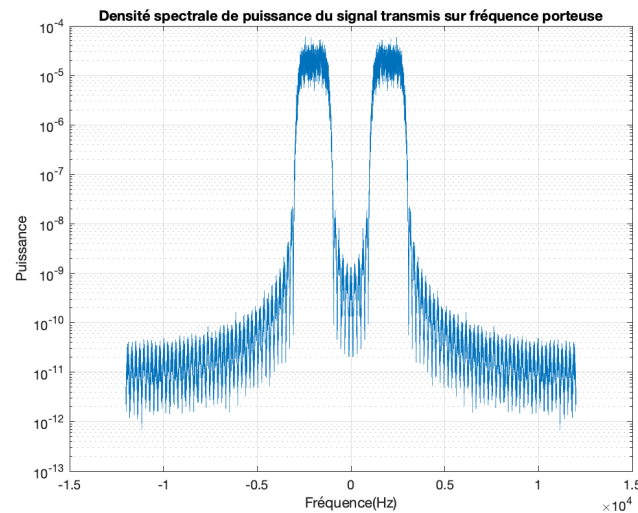


Figure 3: Tracé de la densité spectrale du signal transmis sur fréquence porteuse

Comme le montre la *figure 3*, nous observons que la densité spectrale de puissance (DSP) du signal transmis sur fréquence porteuse est centrée autour de la fréquence porteuse, qui est de 2000 Hz . En effet, nous avons transposé notre signal en le multipliant par une exponentielle ($e^{j2\pi f_p t}$), ce qui a pour effet de décaler la bande de notre signal autour de la fréquence porteuse.

2.4 Simulation du TEB et comparaison avec le TEB théorique de la chaîne étudiée

Ici, pour définir le taux d'erreur binaire (TEB) théorique, nous avons utilisé la formule du cours suivante : $TEB = Q(\sqrt{2\frac{E_b}{N_0}})$

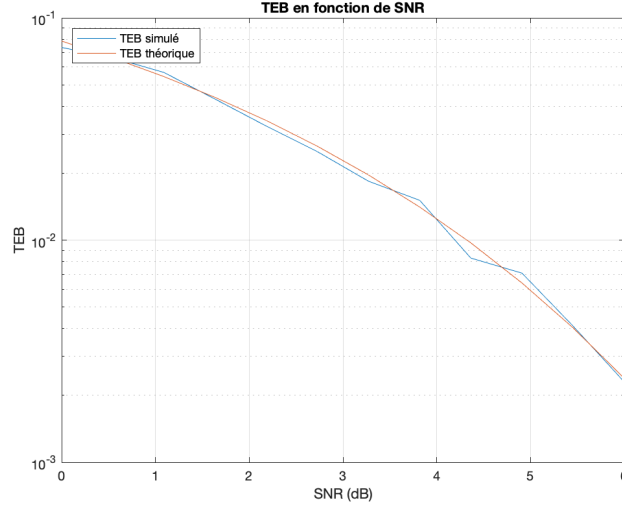


Figure 4: Comparaison entre le TEB théorique et le TEB simulé

Ensuite, on observe d'après la *figure 4*, que le TEB théorique et le TEB simulé se superposent. Cela traduit un bon fonctionnement de notre chaîne de transmission.

3 Implantation de la chaîne passe-bas équivalente à la chaîne de transmission sur porteuse précédente

Nous avons maintenant implanté une chaîne de transmission passe-bas équivalente à la chaîne de transmission sur fréquence porteuse réalisée précédemment, avec une fréquence d'échantillonnage $F_e = 6 \text{ kHz}$ pour transmettre un débit binaire $R_b = 3 \text{ kbps}$.

Le bruit introduit par ce canal passe-bas équivalent au canal de propagation est un bruit complexe ($n_e(t) = n_I(t) + jn_Q(t)$). Nous l'avons ajouté dans nos simulations avec une même puissance sur chaque voie ($\sigma_{n_I}^2 = \sigma_{n_Q}^2$) définie comme suit :

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

avec M qui représente l'ordre de modulation, N_s le facteur de suréchantillonnage et P_{x_e} la puissance du signal à bruite (en sortie du modulateur).

Nous reprenons finalement, quasiment la même structure que la chaîne précédente sans la transposition en fréquence.

3.1 Signaux générés sur les voies en phase et en quadrature (chaîne passe-bas équivalente)

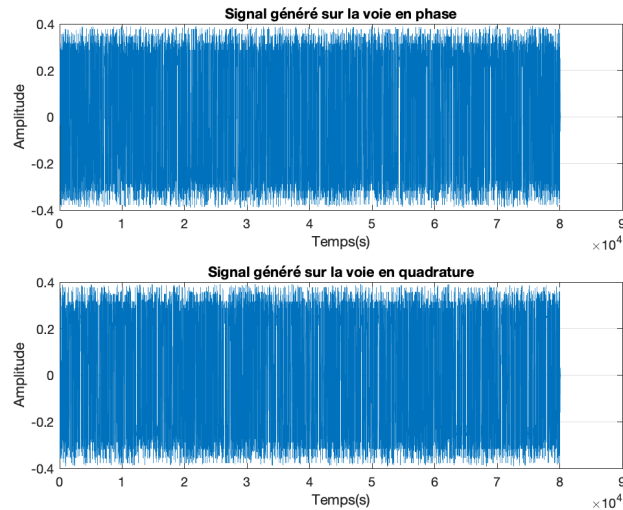


Figure 5: Tracé des signaux générés sur les voies en phase et en quadrature

3.2 Densité spectrale de puissance de l'enveloppe complexe associée au signal transmis sur fréquence porteuse

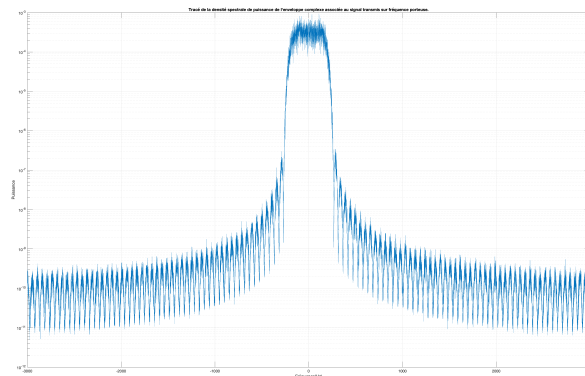


Figure 6: Tracé de la densité spectrale de puissance de l'enveloppe complexe associée

Ici, nous n'avons pas transposé le signal en fréquence, ce qui signifie qu'il n'y aura pas de décalage de la densité spectrale de puissance (DSP). En effet, on observe, d'après la *figure 6*, que la DSP est centrée autour de 0 Hz contrairement à la DSP de la chaîne précédente qui, elle, est centrée autour de la fréquence porteuse (2000 Hz).

Nous sommes ici, dans un cas de transmission en bande de base.

3.3 Constellation en sortie de mapping

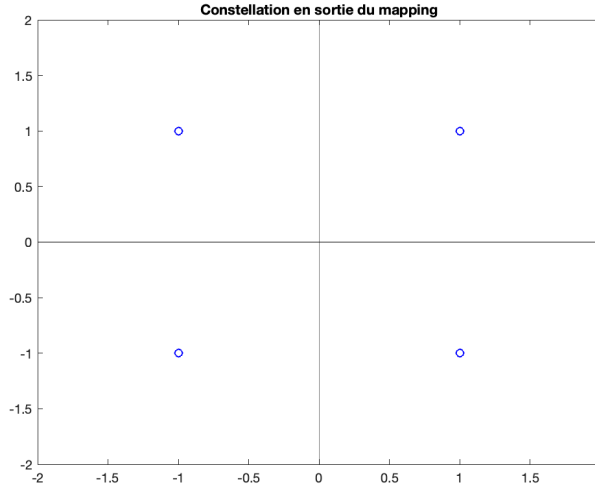


Figure 7: Tracé de la constellation en sortie de mapping

Nous utilisons ici un mapping QPSK, ce qui signifie que les a_k et les b_k prennent leur valeurs dans $\{+1, -1\}$ comme le montre la *figure 7*. L'axe des abscisse représente les a_k et l'axe des ordonnées les b_k .

3.4 Constellations en sortie de l'échantillonneur pour différentes valeurs de E_b/N_0 (SNR)

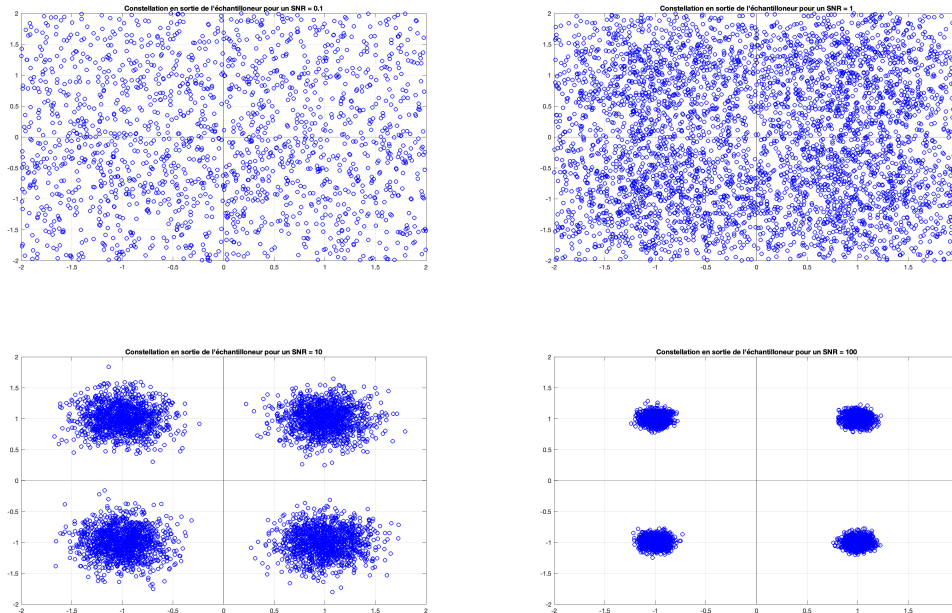


Figure 8: Tracé des constellations en sortie de l'échantillonneur

La première sous-figure (haut-gauche) de la *figure 8*, représente la constellation pour un rapport signal à bruit par bit (SNR) de 0.1.

La deuxième sous-figure (haut-droite), représente la constellation pour un SNR de 1.

La troisième sous-figure (bas-gauche), représente la constellation pour un SNR de 10.

La dernière sous-figure (bas-droite), représente la constellation pour un SNR de 100.

Nous remarquons premièrement que plus le SNR est faible, plus les points de la constellation sont dispersés autour de leurs positions initiales et plus le SNR est élevée, plus les points de la constellation se rapprochent de leurs positions idéales (*voir figure 7*).

On peut donc déduire que l'ajout du bruit (plus le SNR est faible, plus on ajoute du bruit) entraîne une grande dispersion des points de la constellation. Cela augmente donc la probabilité d'erreur de décision contrairement à une constellation en sortie de mapping (sans ajout de bruit) où les distances entre les points sont maximales, minimisant ainsi la probabilité d'erreur. Il faut alors viser un SNR élevé pour assurer le bon fonctionnement de la chaîne de transmission.

3.5 Comparaison du TEB simulé à celui obtenu précédemment sur la chaîne implantée avec transposition de fréquence

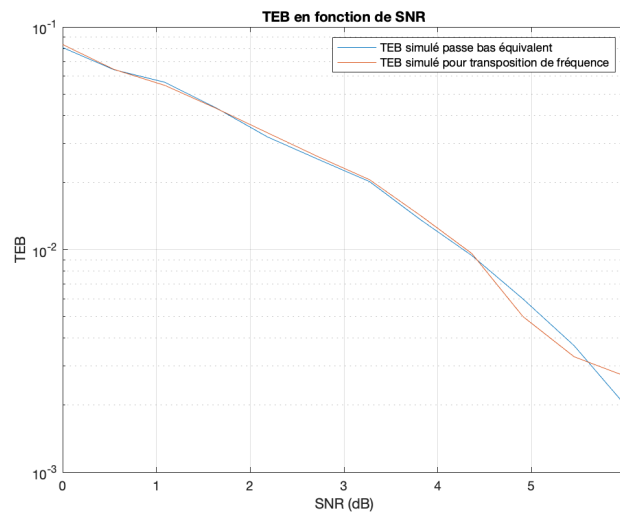


Figure 9: Comparaison du TEB pour passe-bas équivalent et du TEB pour fréquence porteuse

Comme on peut le voir sur la *figure 9*, les deux TEB se superposent, c'est à dire que pour des valeurs différentes de E_b/N_0 les TEB coïncident. On peut donc en déduire que la chaîne passe-bas équivalente et la chaîne avec transposition de fréquence ont la même efficacité en puissance.

Nous pouvons alors nous questionner sur l'intérêt d'implanter la chaîne passe-bas équivalente plutôt que la chaîne de transmission avec transposition de fréquence ?

L'intérêt réside dans le fait que l'on peut réutiliser les résultats obtenus en bande de base et de réaliser des simulations plus rapides avec des fréquences d'échantillonnages plus faibles. En effet, lorsque nous voulons implanter en numérique une chaîne de transmission sur fréquence porteuse, nous devons utiliser une fréquence d'échantillonnage supérieur à deux fois la fréquence maximale des signaux présents sur la chaîne de transmission ($F_e > 2F_{max}$ avec $F_{max} = 2fp + B_e$: Critère de Shanon). Il nous faudra donc une fréquence d'échantillonnage supérieure à environ quatre fois la fréquence porteuse, en négligeant la bande de l'enveloppe complexe devant la fréquence porteuse. Or les fréquences porteuses peuvent être très élevées comme pour les transmissions satellites par exemple, ce qui rend la numérisations de signaux impossibles. On définit donc des chaînes passe-bas équivalente afin de réaliser des implantations avec des fréquences d'échantillonnages plus réalistes.

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

Maintenant, Nous souhaitons comparer le modulateur proposé par le DVB-S (Mapping QPSK, filtre de mise en forme en racine de cosinus surélevé avec roll off de 0.35) avec un modulateur de type 4-ASK utilisant le même filtre de mise en forme. Pour cela, nous avons utilisé les chaines passe-bas équivalentes associées, avec une fréquence d'échantillonnage $F_e = 6 \text{ kHz}$ pour transmettre un débit binaire $R_b = 3 \text{ kbps}$.

4.1 Implantation de la modulation 4-ASK

4.1.1 Constellation en sortie de mapping (4-ASK)

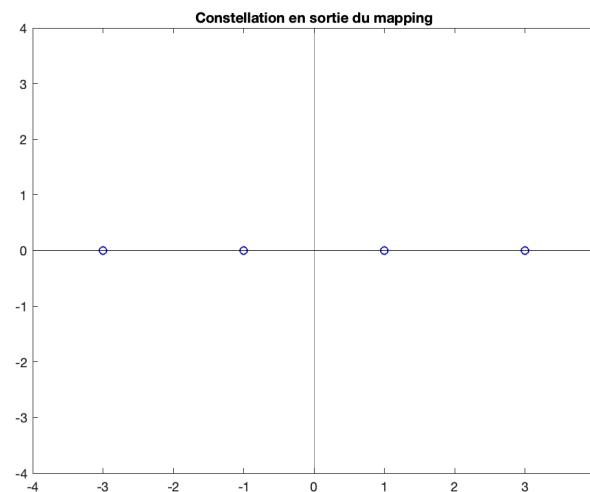


Figure 10: Tracé de la constellation en sortie de mapping

Nous utilisons ici un mapping 4-ASK, ce qui signifie que les a_k et les prennent leur valeurs dans $\{-3, -1, +1, +3\}$ comme le montre la *figure 10*. C'est une modulation mono-dimensionnelle qui code deux bits par symbole ($M = 4 = 2^2$)

4.1.2 Constellations en sortie de l'échantillonneur pour différentes valeurs de E_b/N_0 (4-ASK)

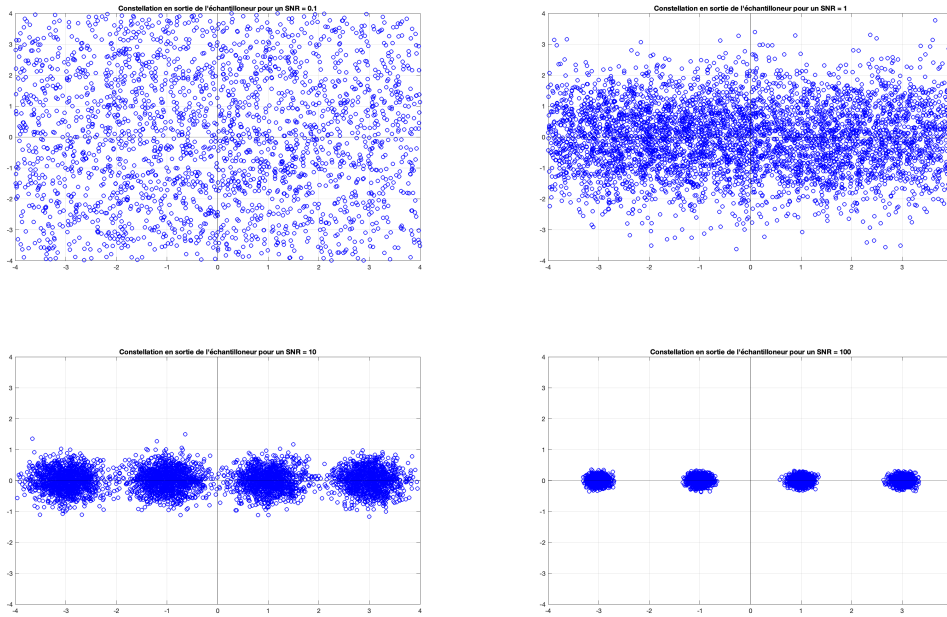


Figure 11: Tracé des constellations en sortie de l'échantillonneur (4-ASK)

D'après la *figure 11*, nous observons les mêmes résultats que précédemment (*voir figure 8*) quant à l'impact du SNR et donc du bruit sur la chaîne de transmission.

4.1.3 Simulation du TEB et comparaison avec le TEB théorique de la chaîne étudiée (4-ASK)

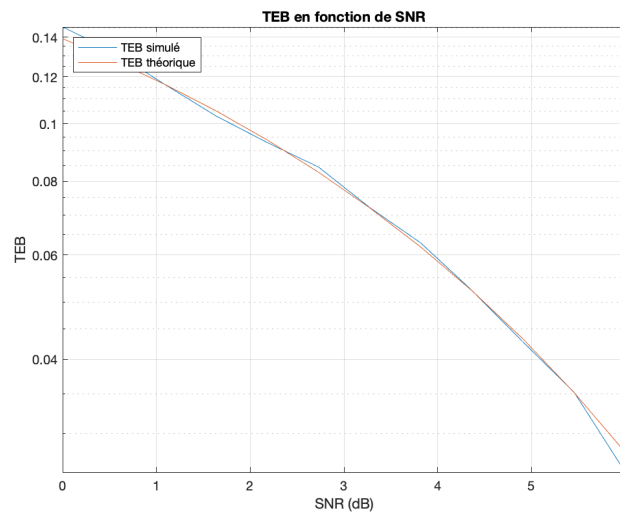


Figure 12: Comparaison entre le TEB théorique et le TEB simulé

D'après le cours, nous avons utilisé la formule ci-dessous pour déterminer le TEB théorique :

$$TES = 2\left(1 - \frac{1}{M}\right)Q\left(\sqrt{\frac{6\log_2(M)}{M^2-1} \frac{E_b}{N_0}}\right) \text{ avec } M = 4 \text{ (ordre de modulation)}$$

Il en vient l'expression théorique du TEB pour un modulateur de type 4-ASK suivante :

$$TEB = \frac{3}{4}Q\left(\sqrt{\frac{4}{5}\frac{E_b}{N_0}}\right)$$

Comme le montre la *figure 12*, la courbe du TEB simulé se superpose avec la courbe du TEB théorique, ce qui traduit un bon fonctionnement de notre chaîne de transmission.

4.2 Comparaison des résultats obtenus pour les modulateurs QPSK du DVB-S et 4-ASK

4.2.1 Résultats en termes d'efficacité en puissance

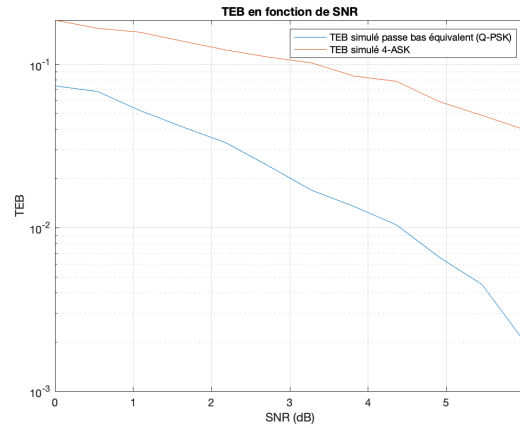


Figure 13: Comparaison des TEB pour les modulateurs QPSK et 4-ASK

D'après la *figure 13*, pour un TEB à atteindre fixé, nous constatons que pour un même ordre de modulation, l'utilisation d'une modulation 4-ASK nécessitera une valeur plus élevée du rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur. Le modulateur 4-ASK sera donc moins efficace que le modulateur QPSK en puissance alors qu'ils présentent la même efficacité spectrale comme nous avons vu précédemment.

4.2.2 Résultats en termes d'efficacité spectrale

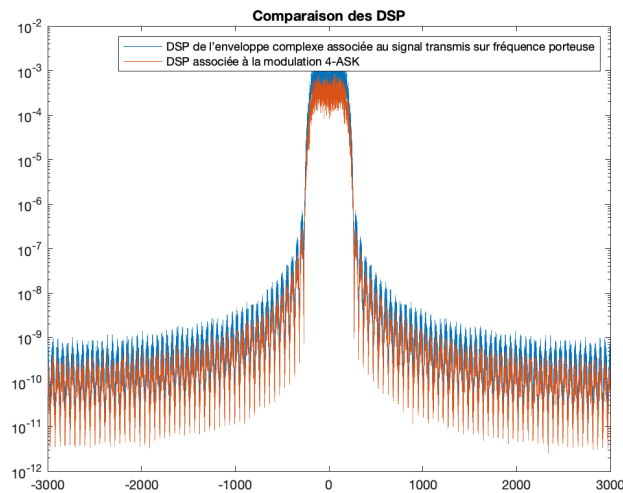


Figure 14: Comparaison des DSP pour les modulateurs QPSK et 4-ASK

Comme on peut le remarquer sur la *figure 14*, les deux modulateurs ont la même largeur de bande passante et présentent donc la même efficacité spectrale. En effet, ce résultat était prévisible puisque nous savons que l'efficacité spectrale ne dépend que du nombre de symboles générés par la mapping et du filtre de mise en forme. Or, dans notre cas, les modulateurs QPSK et 4-ASK utilisent le même filtre de mise en forme (filtre de mise en forme en racine de cosinus surélevé avec roll off de 0.35) et génère le même nombre de symboles. De ce fait, les deux modulateurs ont la même efficacité spectrale.

4.2.3 Identification de l'intérêt d'utiliser une modulation QPSK dans le DVB-S plutôt qu'une 4-ASK.

Il nous semble donc plus intéressant d'utiliser une modulation QPSK dans le DVB-S plutôt qu'une modulation 4-ASK car pour un même ordre de modulation et une même efficacité spectrale, celle-ci présente une meilleure efficacité en puissance.

5 Comparaison du modulateur DVS-S avec un des modulateurs proposés par le DVB-S2

Enfin, nous allons comparer le modulateur DVB-S utilisé jusqu'à présent à un des modulateur du DVB-S2. Ce modulateur présente un mapping 8-PSK et filtre de mise en forme en racine de cosinus surélevé avec un roll off égal à 0.20. avec une fréquence d'échantillonnage $F_e = 6 \text{ kHz}$ pour transmettre un débit binaire $R_b = 3 \text{ kbps}$.

5.1 Implantation de la modulation DVB-S2

5.1.1 Tracé des constellations en sortie du mapping et en sortie de l'échantillonneur pour différentes valeurs de E_b/N_0

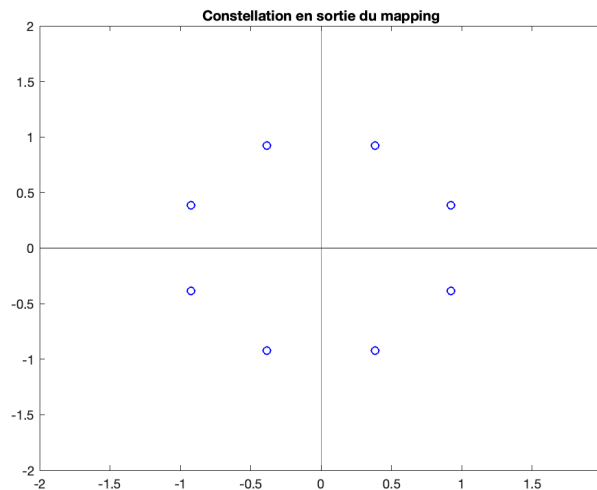


Figure 15: Tracé de la constellation en sortie de mapping

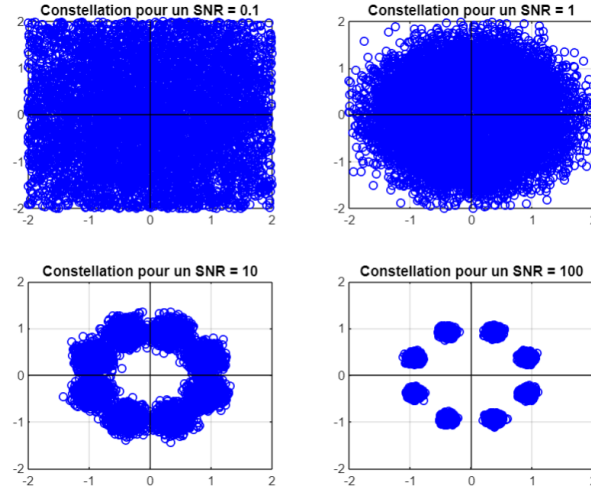


Figure 16: Tracé des constellations en sortie de l'échantillonneur

On remarque sur la *figure 16* que plus le SNR est élevé, plus la constellation se rapproche de celle en sortie de mapping (voir *figure 15*). Le bruit rajoute donc de l'imprécision et il faut une fois de plus viser le SNR le plus grand possible pour avoir la meilleure chaîne de transmission.

5.1.2 Comparaison du TEB simulé au TEB théorique de la chaîne étudiée

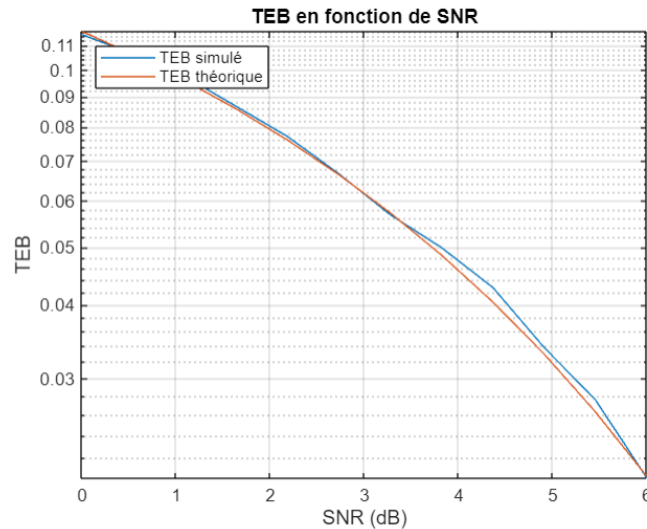


Figure 17: Comparaison des TEB théorique et simulé

Le tracé du TEB simulé se superpose avec le TEB théorique. En effet, pour n'importe quelle valeur prise du SNR, les TEB sont sensiblement égaux. Donc on peut en déduire qu'il n'y a pas d'interférences dans notre chaîne de transmission et elle fonctionne alors correctement. Pour ce qui est de la formule théorique du TEB, nous avons utilisé la formule du cours suivante :

$$TEB = \frac{TES}{\log_2(M)} \text{ avec } M = 8, \text{ l'ordre de modulation}$$

Or, pour une modulation 8-PSK, la formule du TES est :

$$TES = 2Q(\sqrt{2\frac{E_s}{N_0}} \sin(\frac{\pi}{M})) \text{ avec } E_s, \text{ l'énergie moyenne par symbole}$$

De plus, on sait que

$$E_b = \frac{E_s}{\log_2(M)} .$$

On retrouve donc l'expression du TEB théorique suivante :

$$TES = \frac{2}{3}Q(\sqrt{6\frac{E_b}{N_0}}\sin(\frac{\pi}{M}))$$

5.2 Comparaison des modulateurs DVB-S et DVB-S2

5.2.1 Résultats en termes d'efficacité en puissance

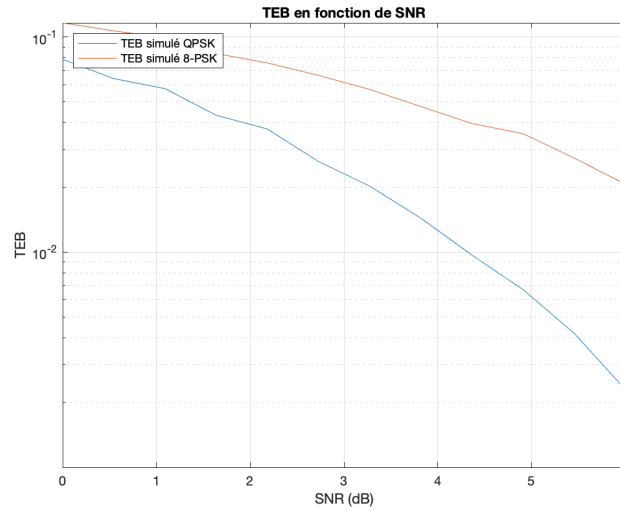


Figure 18: Comparaison des TEB simulés pour les modulations QPSK et 8-PSK

D'après la *Figure 18*, on remarque que pour n'importe quel TEB fixé, il le modulateur 8-PSK doit fournir plus de puissance que le modulateur Q-PSK. Par exemple, si on le fixe à 0.03, la modulation 8-PSK doit fournir une puissance d'environ 5.3 dB tandis que la modulation Q-PSK doit seulement fournir 2.6 dB. Donc le modulateur Q-PSK est plus efficace en puissance.

5.2.2 Résultats en termes d'efficacité spectrale

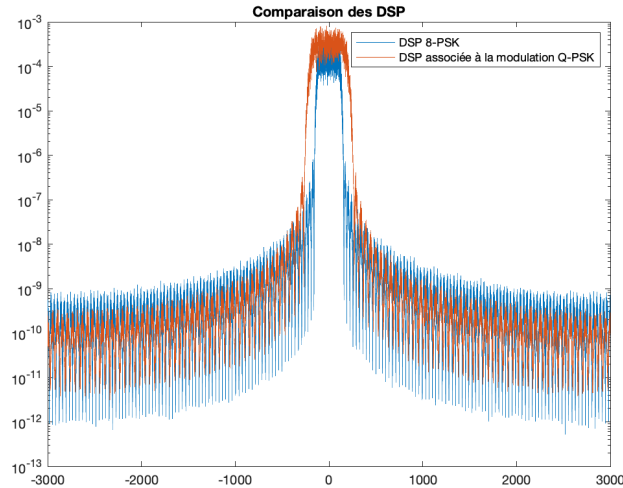


Figure 19: Comparaison des DSP pour les modulations QPSK et 8-PSK

D'après la *figure 19*, la bande passante est moins large pour le modulateur 8-PSK. Or, l'efficacité spectrale est inversement proportionnelle à la largeur de la bande passante donc le modulateur 8-PSK est plus efficace spectralement que le modulateur Q-PSK.

5.2.3 Identification des avantages et inconvénients à utiliser de nouvelles modulations, type 8-PSK, et de nouvelles valeurs de roll-off dans les nouvelles versions du DVB-S

D'après les parties 5.2.1 et 5.2.2, le modulateur Q-PSK a une meilleure efficacité spectrale que le modulateur 8-PSK mais a une moins bonne efficacité en puissance. En effet, il y a souvent un compromis à faire en télécommunications, et on peut rarement avoir la meilleure efficacité spectrale tout en ayant aussi la meilleure efficacité en puissance. On peut néanmoins identifier quels sont les facteurs qui améliorent l'une ou l'autre des efficacités. Ainsi, on a remarqué que si on veut privilégier l'efficacité spectrale, on peut coder plus de bits par symboles (augmentation de l'ordre de modulation).

Pour finir, le roll-off a une influence sur la forme de la courbe du filtre de mise en forme. Plus le roll-off est faible, plus la courbe est resserée et donc la bande passante est étroite ce qui a pour effet d'augmenter l'efficacité spectrale. Cependant, On ne peut pas toujours prendre un roll-off le plus bas car il y a un compromis à faire. En effet, un roll-off bas sera moins robuste sur un système réel et pourrait perdre en efficacité en puissance.

6 Conclusion

En définitive, nous avons pu à travers ce travail, via l'implémentation de différents modulateurs, comprendre le fonctionnement de chaînes de transmission sur fréquence porteuse. De plus, nous avons comparé certains modulateurs entre eux, ce qui nous a permis de comprendre l'influence de certains paramètres sur les efficacités en puissance et spectrale de ces modulateurs et donc les avantages et inconvénients d'utiliser un type de modulateur plutôt qu'un autre.