

Séquence Modulation et démodulation

Episode 9 « Pour aller plus loin »

Démodulateur IQ



Semaine 4



Par Marie-Laure Boucheret

Professeur
à l'Institut National Polytechnique de Toulouse
INP / ENSEEIHT



Dans les épisodes 4 et 5, nous avons vu le modulateur IQ. Son rôle est de transformer un (modulation PSK) ou deux (modulation QAM) trains binaires formant une constellation en un signal continu destiné à être transmis sur le canal.

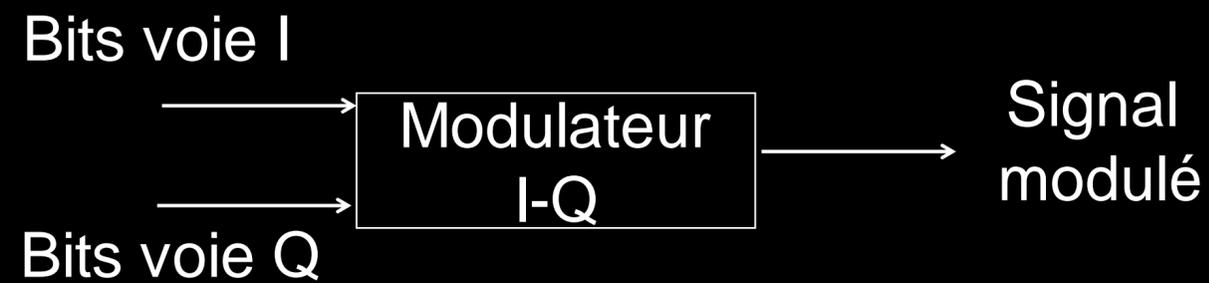


Figure 1 :Modulateur IQ (QAM)



Figure 2 :Modulateur IQ (PSK)

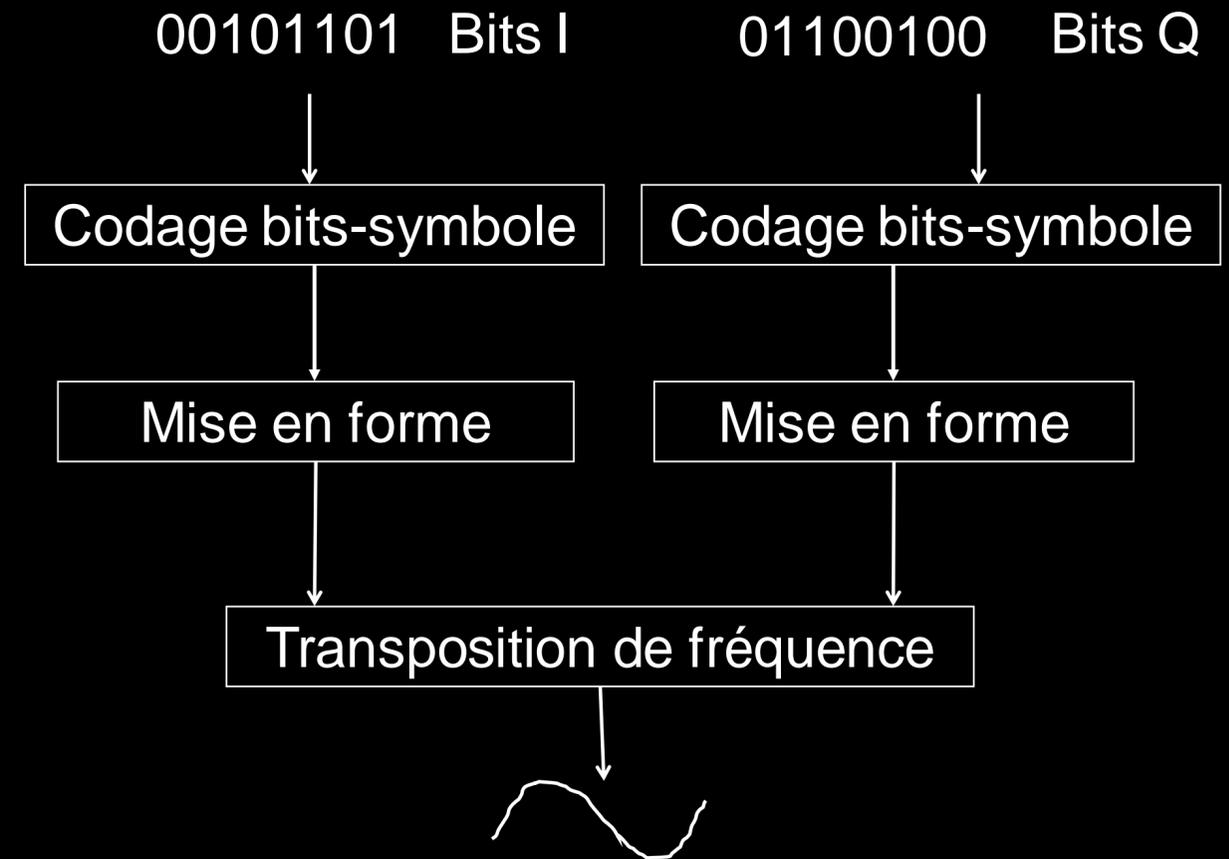


Figure 3 :Détail modulateur IQ (QAM)

Les fonctions implantées dans le modulateur sont : le codage bits-symbole, la mise en forme des signaux et la transposition de fréquence. Seule la fonction de codage bits-symbole est différente pour la modulation PSK (1 seul train binaire en entrée du codage bits-symbole).

Intéressons-nous maintenant au démodulateur IQ introduit dans l'épisode 6. Le signal en entrée de ce démodulateur est le signal bruité en sortie du canal. La sortie est la constellation bruitée.

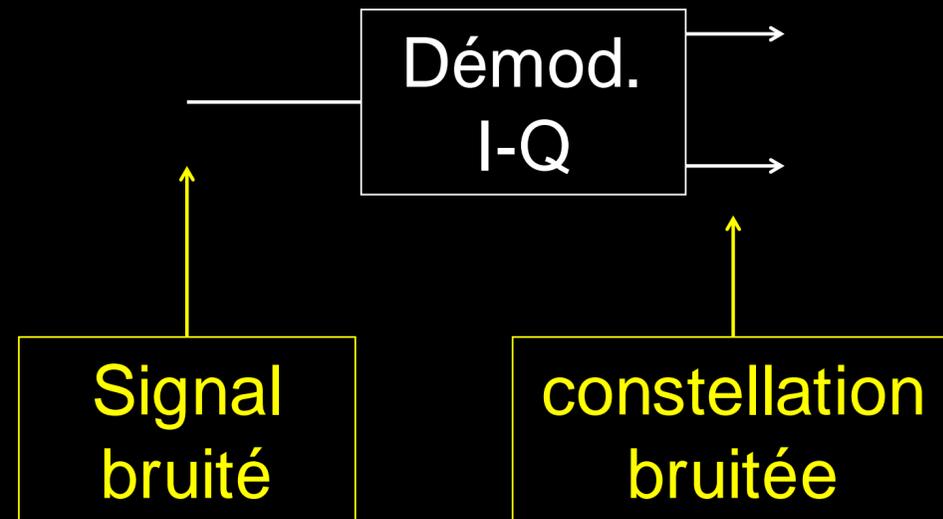


Figure 4 : démodulateur IQ

Les fonctions implémentées dans le démodulateur IQ sont :

- La transposition en bande de base
- Le filtrage en réception
- L'échantillonnage au temps symbole

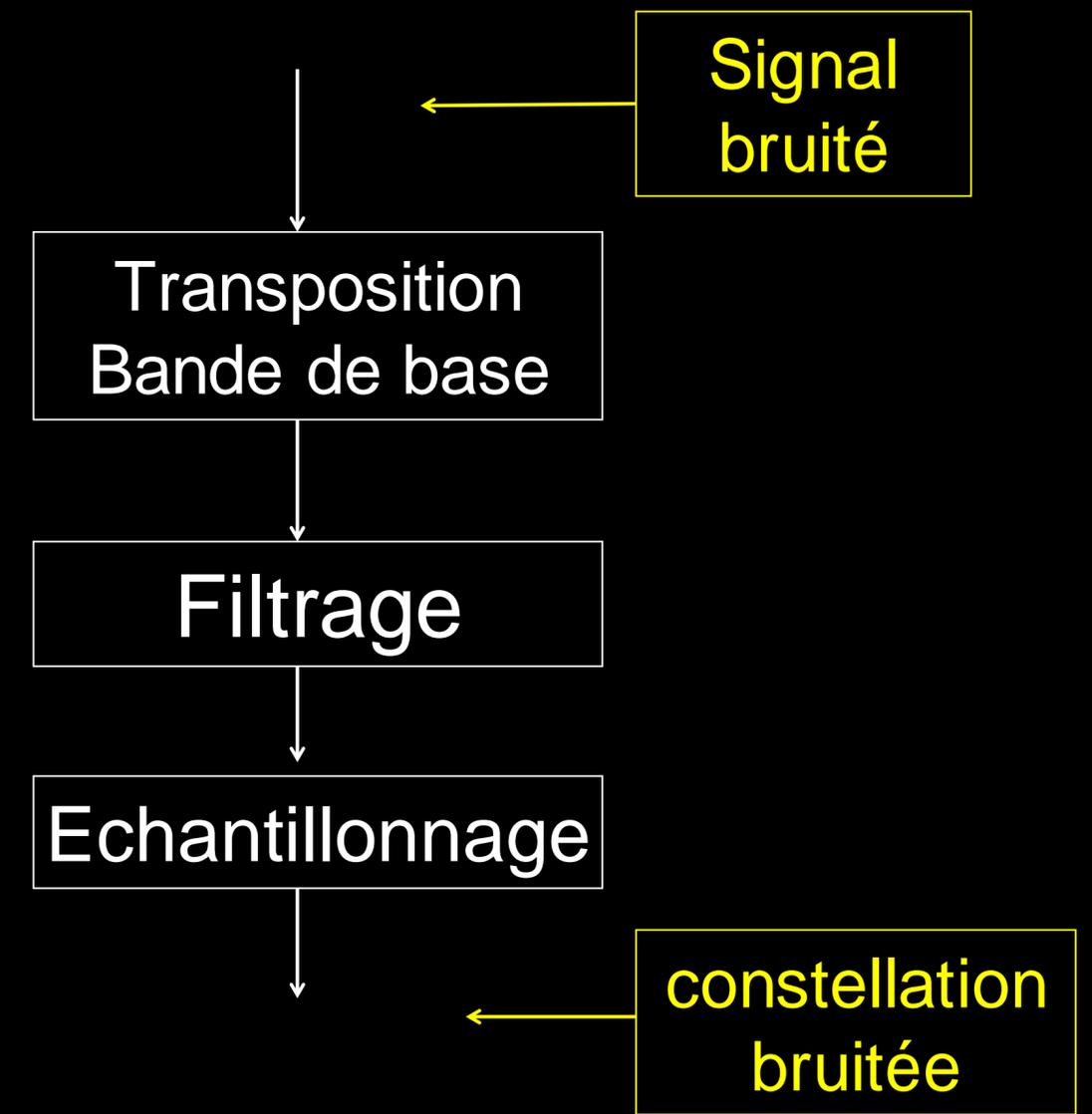


Figure 5 :Détails démodulateur IQ

Nous allons maintenant détailler les différentes fonctions.

Nota : des notions sur le filtrage sont nécessaires pour la suite

Commençons par la transposition en bande de base. C'est l'opération duale de la transposition sur fréquence porteuse implantée dans l'émetteur rappelée ci-dessous.

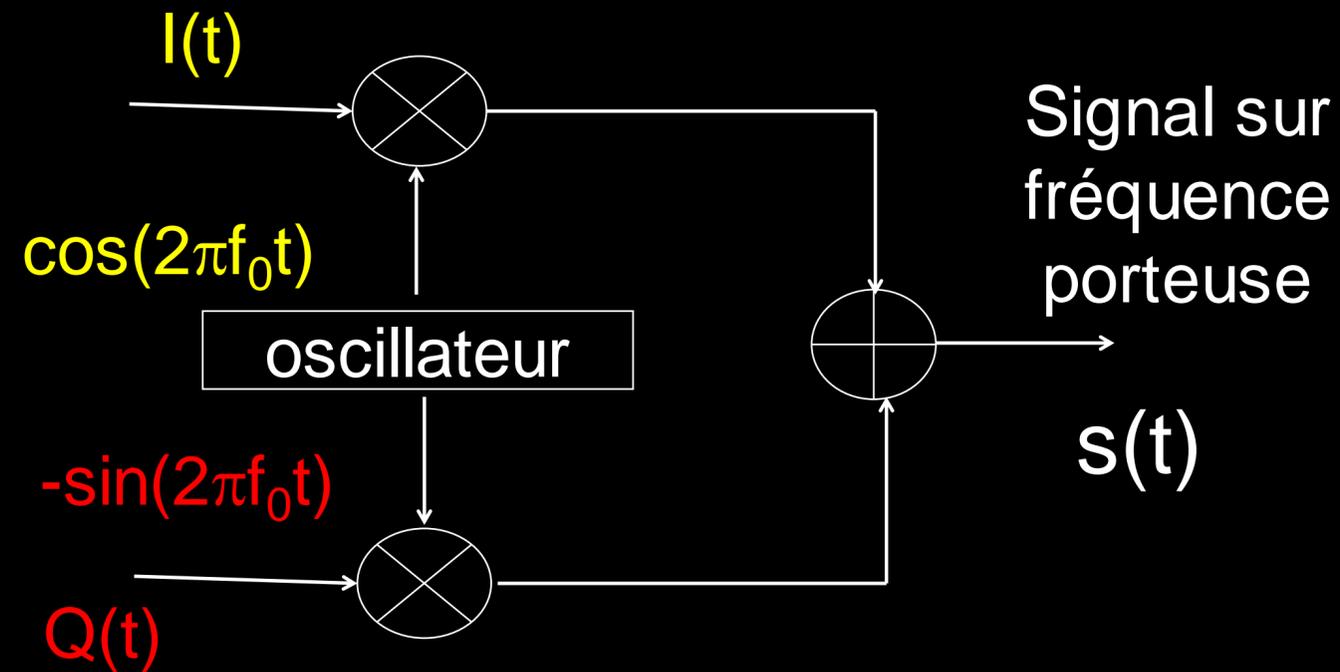


Figure 6 : transposition sur fréquence porteuse

f_0 est la fréquence de la porteuse

L'opération de transposition en bande de base est décrite figure 7. Afin de simplifier les calculs, nous considérerons une transmission sans bruit.

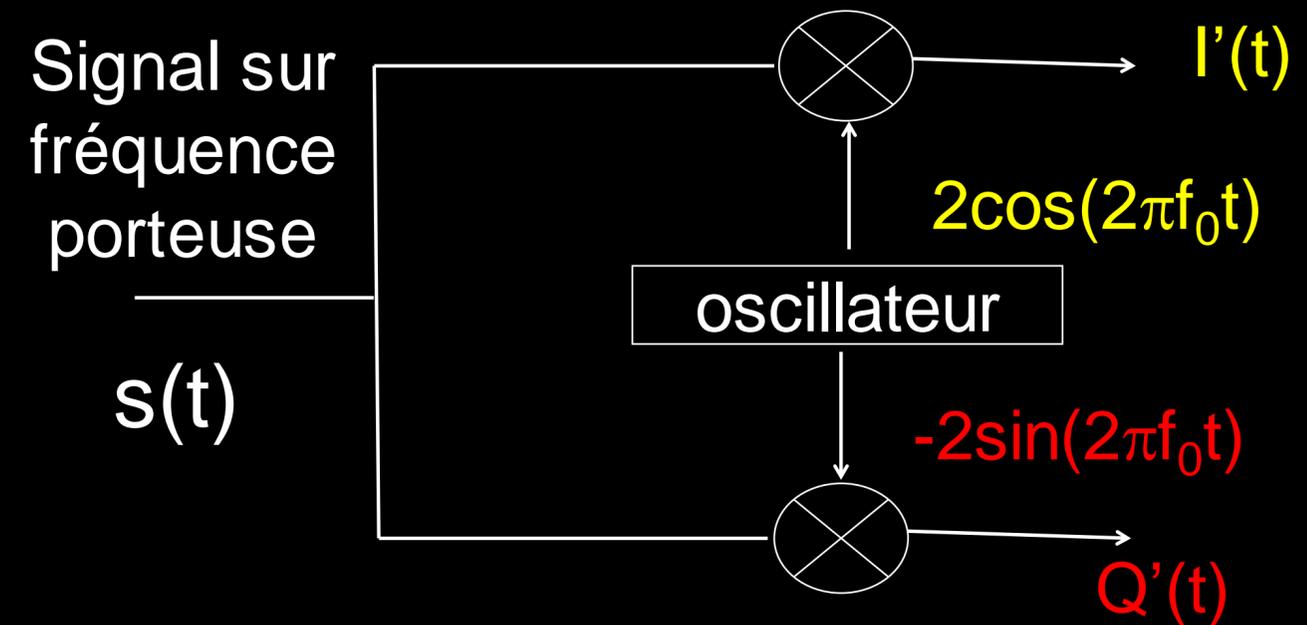


Figure 7 : transposition en bande de base

Déterminons les signaux $I'(t)$ et $Q'(t)$.

$$s(t) = I(t) \cos(2\pi f_0 t) - Q(t) \sin(2\pi f_0 t)$$

$$I'(t) = 2s(t) \cos(2\pi f_0 t)$$

$$I'(t) = 2I(t) \cos^2(2\pi f_0 t) - 2Q(t) \cos(2\pi f_0 t) \sin(2\pi f_0 t)$$

$$2\cos^2(x) = 1 + \cos(2x) \quad 2\cos(x) \sin(x) = \sin(2x)$$

$$I'(t) = I(t) + \{I(t) \cos(4\pi f_0 t) - Q(t) \sin(4\pi f_0 t)\}$$

De même :

$$s(t) = I(t) \cos(2\pi f_0 t) - Q(t) \sin(2\pi f_0 t)$$

$$Q'(t) = -2s(t) \sin(2\pi f_0 t)$$

$$Q'(t) = -2I(t) \cos(2\pi f_0 t) \sin(2\pi f_0 t) + 2Q(t) \sin^2(2\pi f_0 t)$$

$$2 \sin^2(x) = 1 - \cos(2x) \quad 2 \cos(x) \sin(x) = \sin(2x)$$

$$Q'(t) = Q(t) - \{I(t) \sin(4\pi f_0 t) + Q(t) \cos(4\pi f_0 t)\}$$

On obtient donc les signaux $I'(t)$ et $Q'(t)$ suivants :

$$I'(t) = I(t) + \{I(t) \cos(4\pi f_0 t) - Q(t) \sin(4\pi f_0 t)\}$$

$$Q'(t) = Q(t) - \{I(t) \sin(4\pi f_0 t) + Q(t) \cos(4\pi f_0 t)\}$$

$I(t)$ et $Q(t)$ sont des signaux en bande de base, leur fréquence centrale est donc la fréquence nulle.

Les termes entre parenthèses sont des signaux sur fréquence porteuse centrés sur la fréquence $2f_0$.

Nous allons utiliser un filtre passe-bas sur chaque voie pour éliminer les signaux centrés sur la fréquence $2f_0$.

Un filtre passe-bas est un filtre dont la fréquence centrale est nulle. Nous choisissons sa réponse en fréquence de telle façon qu'il n'apporte pas de distorsion sur les signaux $I(t)$ et $Q(t)$ mais « coupe » les signaux centrés sur $2f_0$.

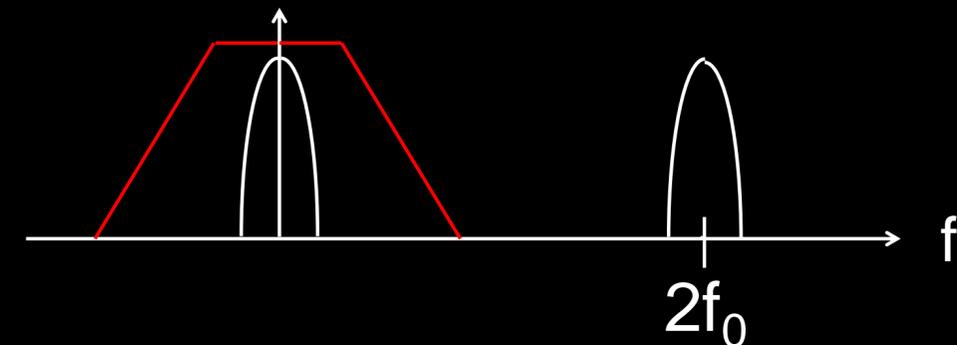


Figure 8

Dans la figure 8, la réponse en fréquence d'un filtre passe-bas possible est donnée en rouge.

On note que les signaux en bande de base ($I(t)$ et $Q(t)$ dans notre cas) sont dans la bande passante du filtre et donc ne subissent pas de distorsions.

Les signaux centrés sur $2f_0$ sont dans la bande coupée du filtre (c'est-à-dire que la réponse en fréquence du filtre est nulle pour ces fréquences). En sortie des filtres nous disposerons donc uniquement des signaux en bande de base.

Le schéma de transposition en bande de base incluant les filtres passe-bas est donné figure 9. Dans ce schéma, les filtres passe-bas sont représentés par la fonction « FPB » (filtre passe-bas).

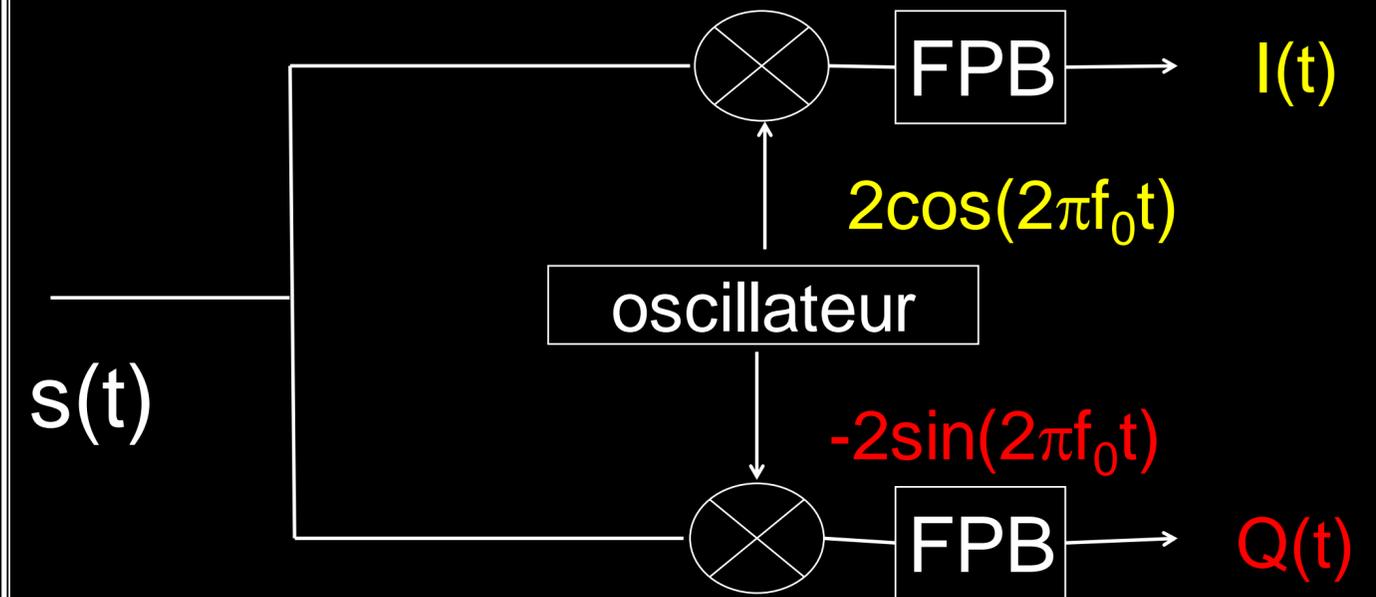


Figure 9 : transposition en bande de base

Nous avons donc montré que nous pouvons récupérer les composantes en phase $I(t)$ et en quadrature $Q(t)$ du signal à partir du signal sur fréquence porteuse $s(t)$.

Intéressons-nous maintenant à l'opération de filtrage en réception.

Nous avons vu que pour chaque voie un filtre passe-bas était nécessaire pour éliminer la composante du signal centrée sur $2f_0$.

On montre qu'un deuxième filtre passe-bas est nécessaire pour minimiser le taux d'erreur binaire (TEB). Ce filtre est le filtre qui permet d'obtenir un rapport signal sur bruit (SNR) maximal en sortie du dispositif. Il est appelé **filtre adapté**.

Dans la cas des communications par satellites où l'on ne considère qu'un seul trajet entre l'émetteur et le récepteur le filtre adapté est le même filtre que celui utilisé dans l'émetteur (mise en forme). En utilisant les propriétés des filtres, on montre que le filtre passe-bas de la figure 8 peut être éliminé car le filtre adapté permet également d'éliminer les signaux à la fréquence $2f_0$.

Dans le schéma figure 10 nous avons remplacé les filtres passe-bas par les filtres adaptés FA. Les sorties des filtres adaptés sont notées $I_{FA}(t)$ et $Q_{FA}(t)$.

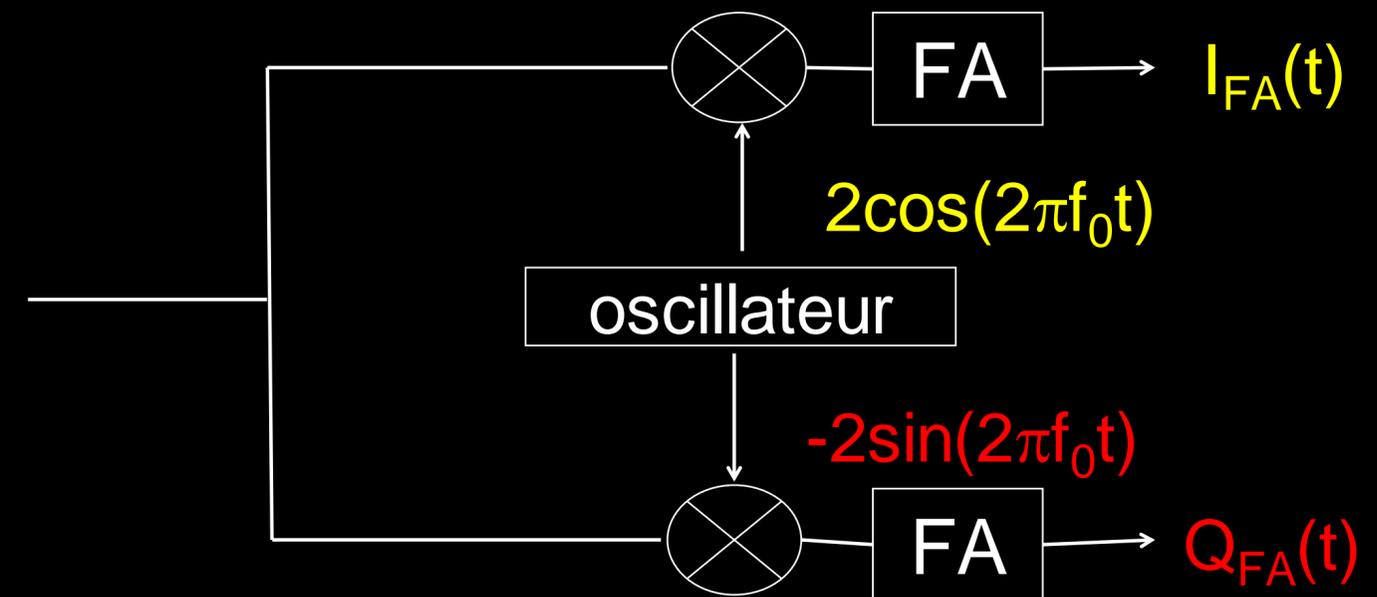


Figure 10

Exemple de signaux en sortie du filtre adapté (filtrage NRZ) : cas sans bruit

Bits émis : 1 0 1 0 0 1 1 0 1 0 (voie I)

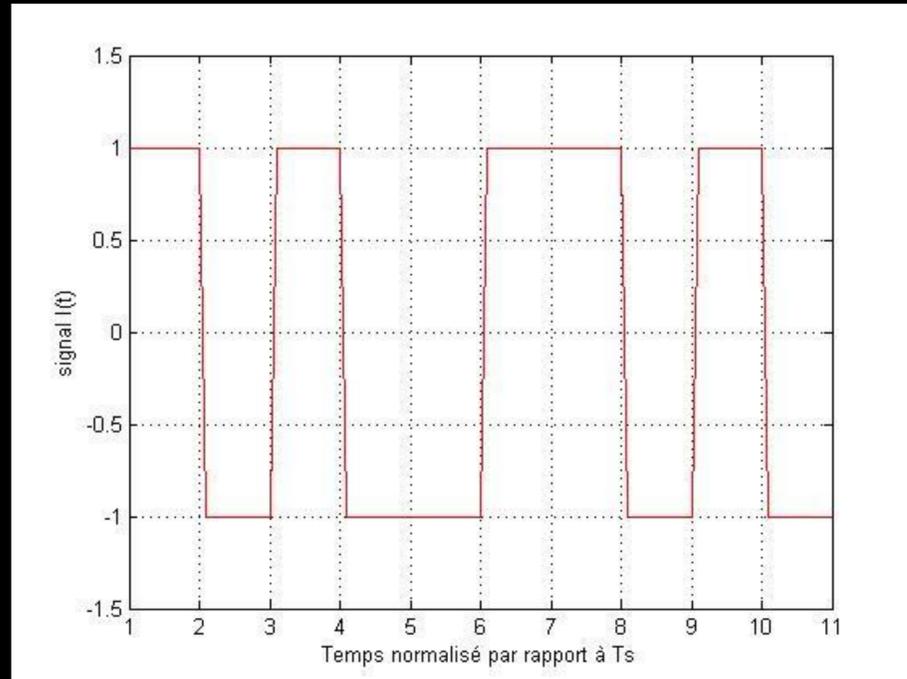


Figure 11: Sortie « mise en Forme » (émission)

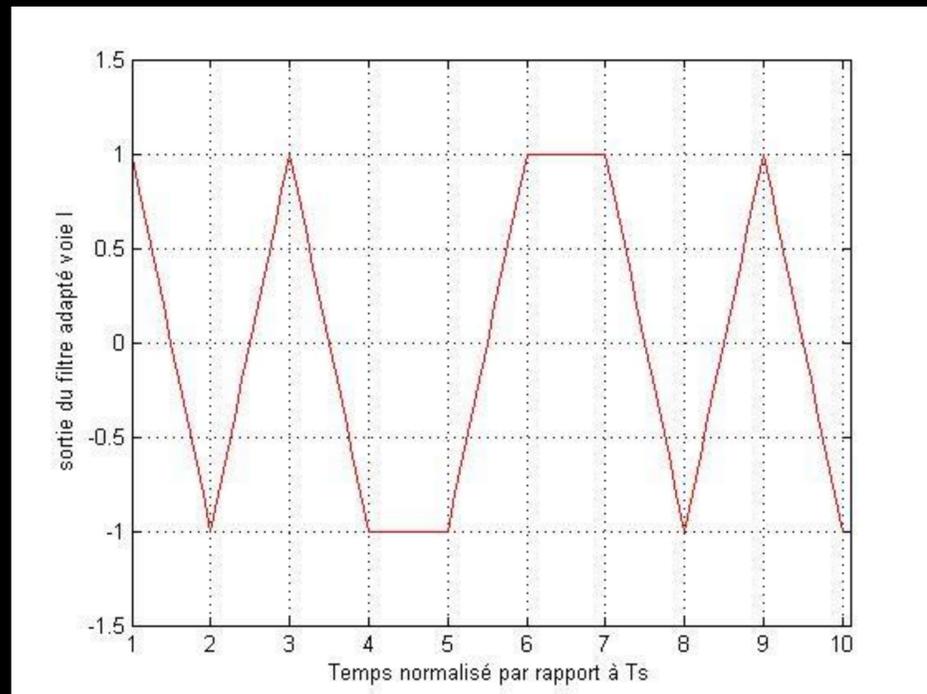


Figure 12: Sortie filtre adapté (réception)

Exemple de signaux en sortie du filtre adapté (filtrage NRZ) : cas avec bruit

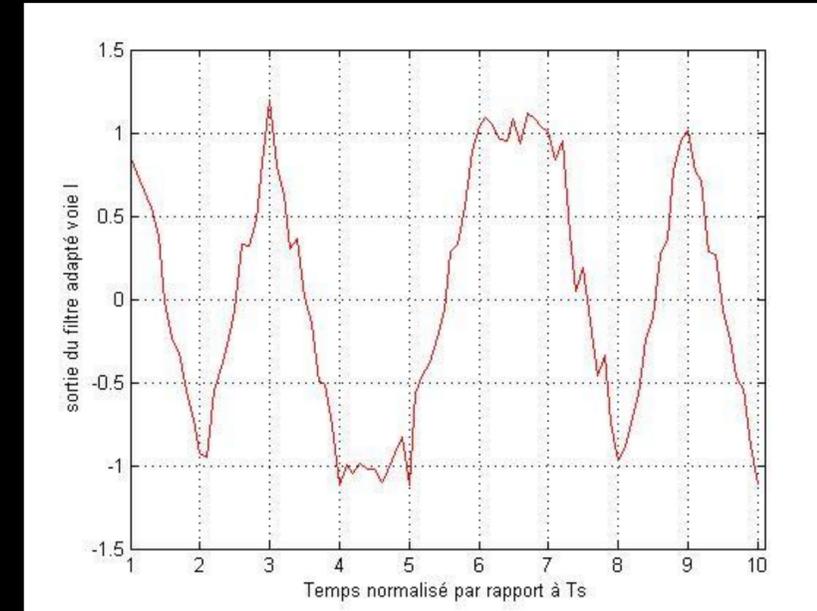


Figure 13: SNR fort : signal peu perturbé

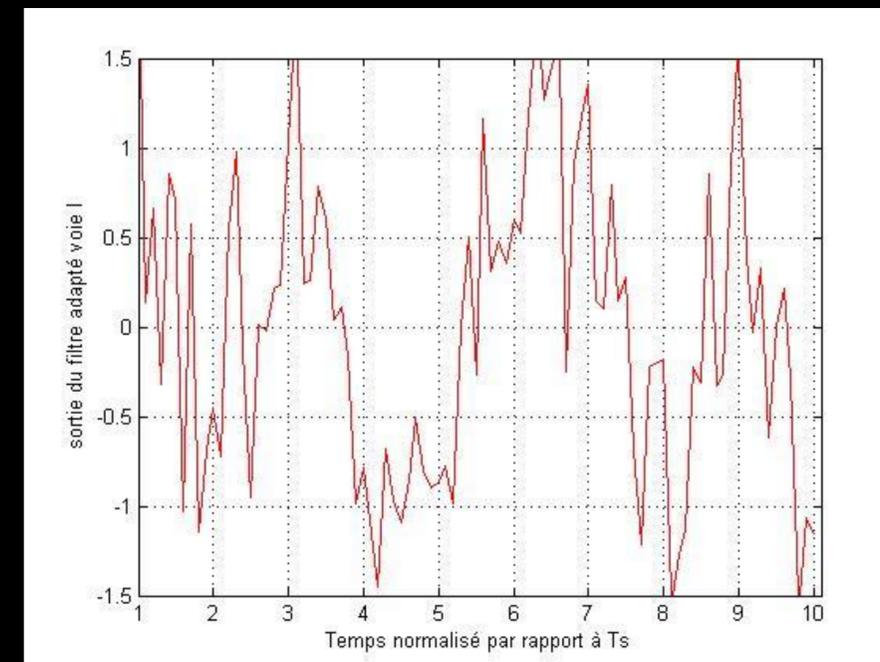


Figure 14: SNR faible : signal fortement perturbé

Il nous reste maintenant à implanter la fonction d'échantillonnage de la figure 5.

Le signal est échantillonné à la fréquence R_s (débit symbole) c'est-à-dire que l'on obtient un échantillon par symbole.

Reprenons les sorties des filtres adaptés des figures 12 et 14 (voie I). Les échantillons obtenus sont indiqués en bleu dans les figures 15 et 16.

Nous notons qu'en l'absence de bruit les échantillons ont pour valeur +1 et -1. En présence de bruit (figure 16), le signe des échantillons reste le même ce qui implique que les bits seront correctement estimés.

Si l'on augmente encore le niveau de bruit, on voit apparaître des échantillons qui conduiront à des décisions erronées (échantillons entourés en vert figure 17).

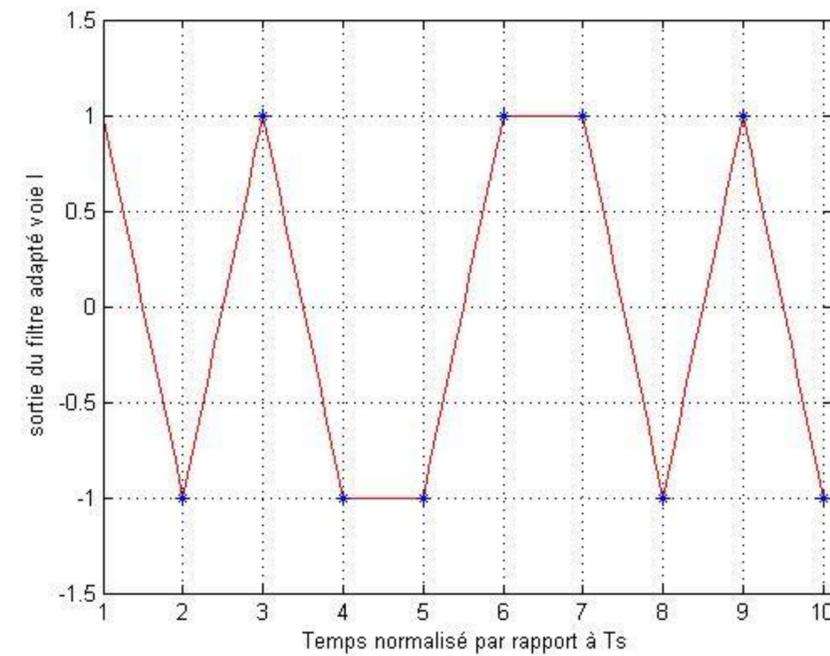


Figure 15
Signal non bruité

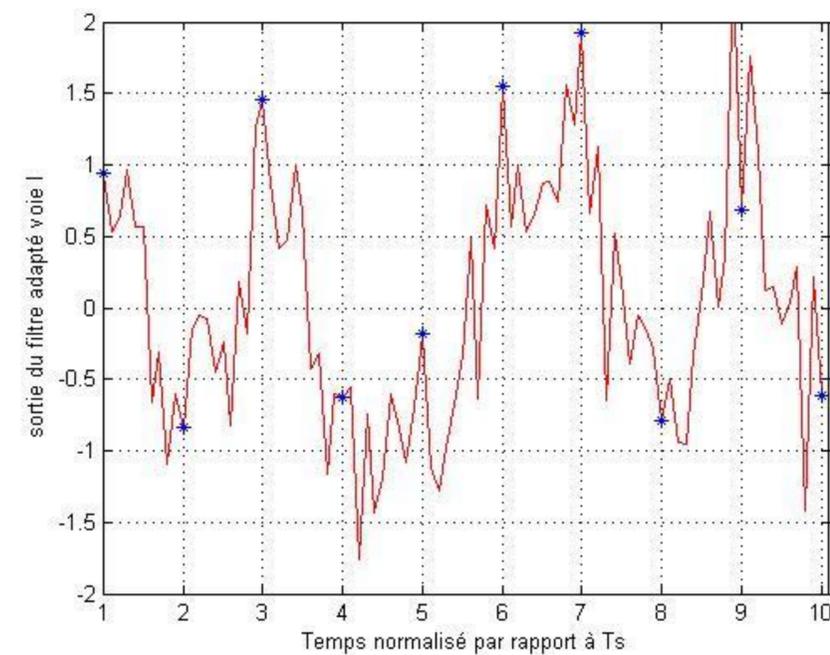


Figure 16
Signal bruité

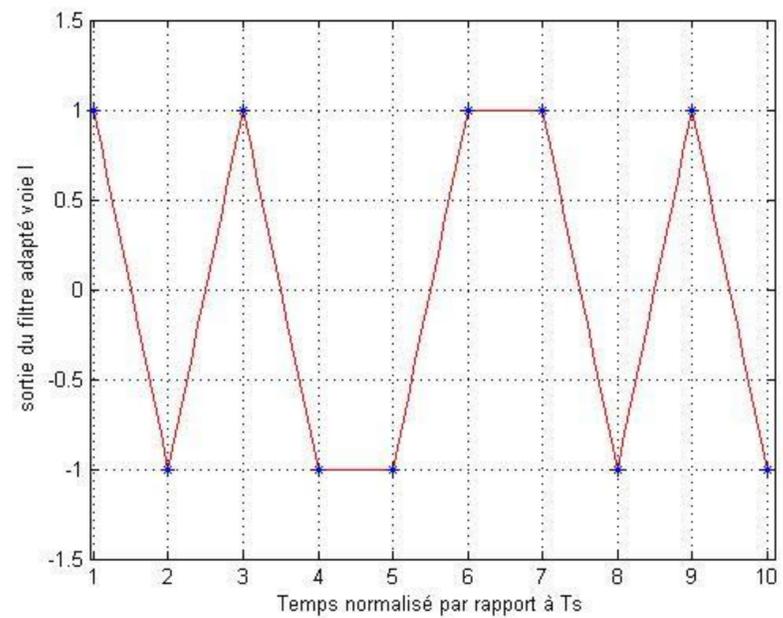


Figure 15

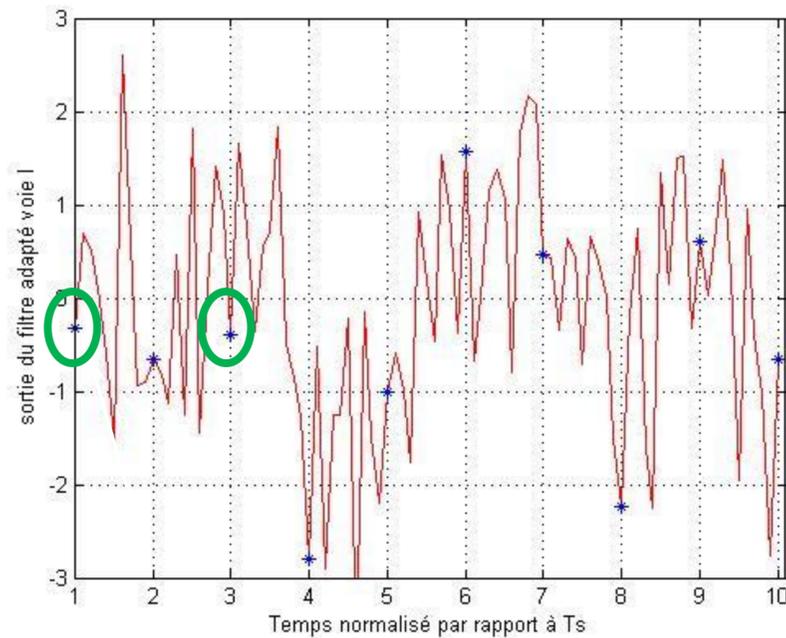


Figure 17

De la même façon, la sortie du filtre adaptée de la voie Q est échantillonnée au rythme symbole.

On obtient donc bien une constellation bruitée en sortie du démodulateur IQ .

Le démodulateur IQ complet est donné figure 18 (Ech. : échantillonneur)

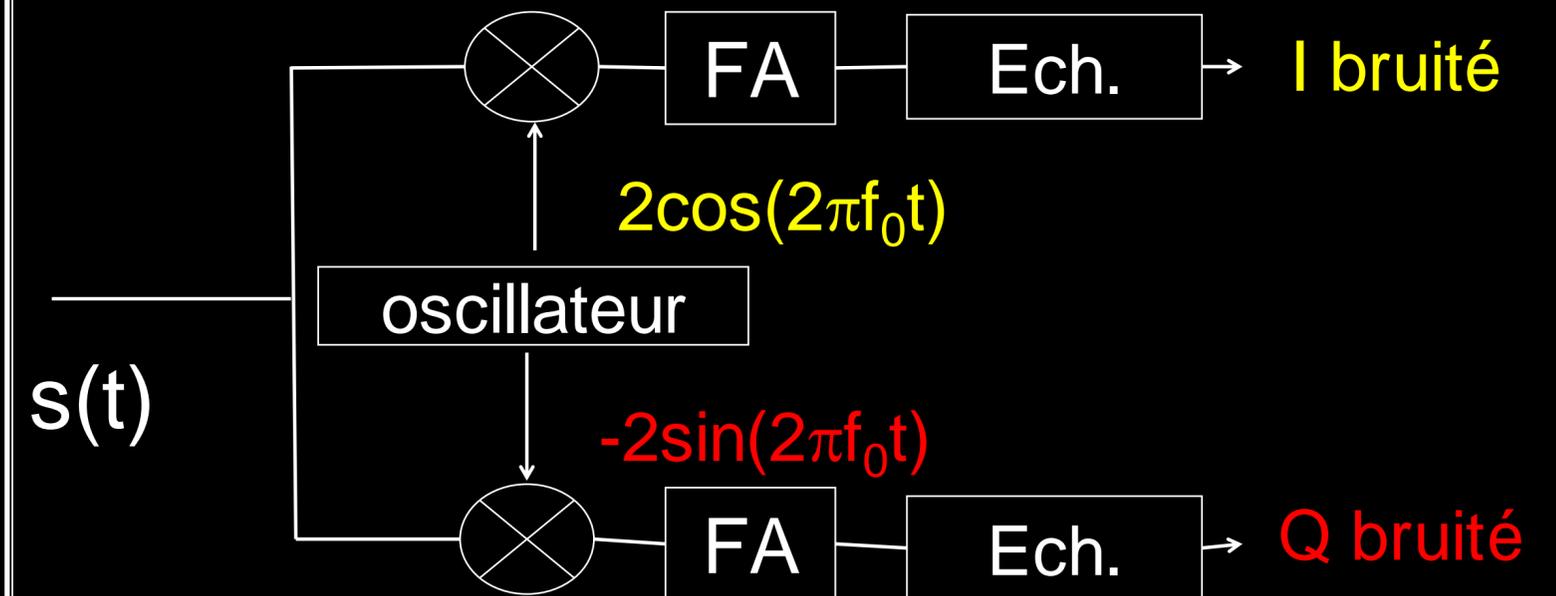


Figure 18 : Démodulateur IQ