

---

# Telecommunication

## modulation numérique

---

*Travaux Pratiques (MatLab & Simulink)*

**EOAA Salon de Provence**

**Françoise BRIOLLE**

---

©Édition 2013



# ntroduction

L'objectif de ce TP est de simuler et d'évaluer les performances d'une **chaîne de communication numérique haut débit** (transmission WiMax, TNT).

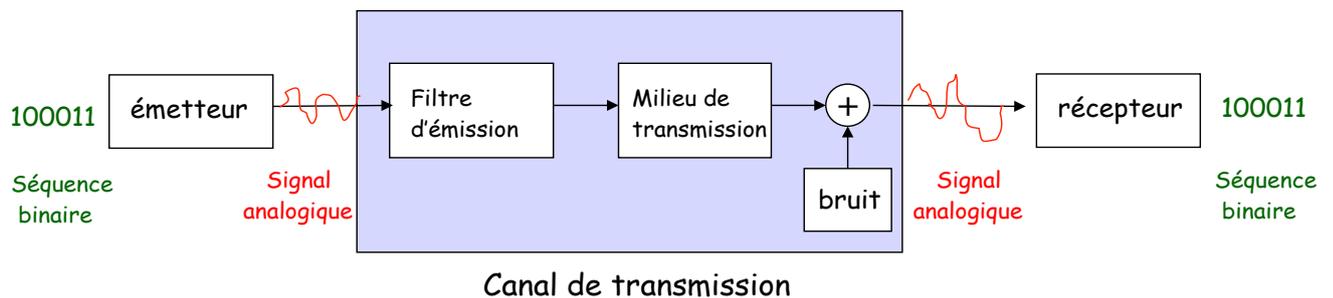


FIGURE 1 – Chaîne de communication numérique

La simulation de la chaîne de communication sera complète, et comprendra :

## □ 1<sup>ère</sup> partie : Emission

On simulera une séquence binaire que l'émetteur représente par un signal analogique (codage en ligne) qui est envoyé vers le récepteur.

- la séquence binaire est composée de symboles "1" ou "0" émis toutes les  $T_s$  secondes (temps d'émission du symbole),
- Chaque symbole, "1" et "0", est représenté par un signal réel (électrique, électromagnétique, lumineux, ...) de durée  $T_s$ . C'est ce qu'on appelle le codage en ligne.

### Questions

1. Pour un débit de 54 Mbits/s, quelle est la durée d'émission d'un bit ?  $T_b =$
2. Quels sont les différents types de codage en ligne que vous connaissez ?

## □ 2<sup>ème</sup> partie : réception

Le récepteur reçoit un signal qui représente une séquence binaire. Il faut donc le décoder, c'est-à-dire décider, lorsqu'on reçoit un signal représentant un symbole, si ce signal représente un "1" ou un "0".

Les performances de la chaîne de transmission sont mesurées par un taux d'erreur (nombre d'erreurs/ nombre de symboles émis). Le taux d'erreur dépend de nombreux paramètres (bruit dans le canal, débit, type de modulation, ...)

### Questions

1. Quelles méthodes connaissez-vous pour optimiser la réception du signal (RSB et IES) et décoder la séquence binaire ?

### □ 3<sup>ème</sup> partie : canal de transmission

Le canal de transmission peut être un câble électrique, une partie de l'espace hertzien (400-750 MHz pour la TNT, 890-915 MHz pour la téléphonie mobile, ...).

Pour s'adapter à la bande passante du canal et optimiser la transmission, l'émission sera portée par une fréquence. Cette technique est appelée **modulation sur fréquence porteuse**. On étudiera particulièrement la modulation QAM-2 qui sera généralisée aux modulations QAM-4 et QAM-64.

### Questions

1. Rappeler ce qu'est une modulation QAM-4.

2. Quelles types de modulation sur fréquence porteuse connaissez-vous ?

### □ 4<sup>ème</sup> partie : Transmissions WiMax

Ce type de transmission permet d'obtenir un débit de 54 Mbits/s. Le flux binaire est codé par une modulation QAM-64, portée par une fréquence porteuse 5 GHz.

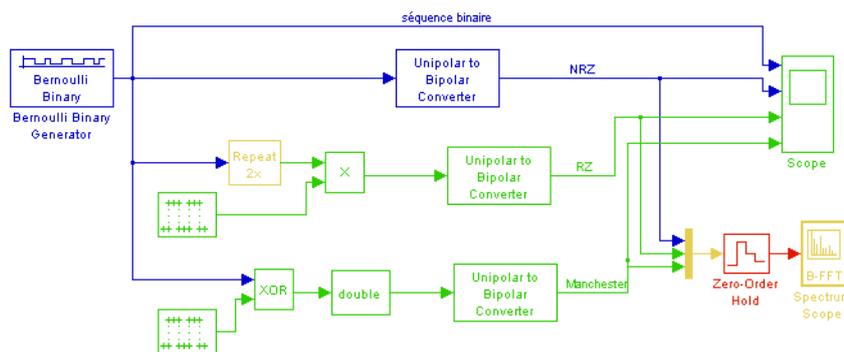
Nous réaliserons cette chaîne de transmission et évaluerons ses performances, en fonction de la largeur de bande du canal et du bruit de transmission.

# Partie 1 : Emission

## Codage en ligne

L'émetteur transforme le flot binaire par un signal analogique qui sera envoyé au récepteur.

### Codage en Ligne



Ouvrir le modèle *NRZ\_RZ\_Manch.mld*

1. La séquence binaire que l'on va utiliser doit être représentative de n'importe quelle séquence : on va donc tirer aléatoirement une suite de 1 et de 0, et pour cela utiliser un générateur aléatoire de type "Bernoulli". Dans ce bloc, on règle le débit binaire  $T_s = 1s$ .
2. Le bloc "unipolar/bipolar converter" permet de transformer le symbole "1" en un signal analogique qui vaut +1 pendant la durée d'émission du bit ; il transforme le symbole "0" en un signal qui vaut -1 pendant la durée d'émission du bit. Ce bloc est donc utilisé pour obtenir un codage NRZ.
3. Une horloge, dont la période est  $T_s/2$ , associée au convertisseur unipolaire/bipolaire permet d'obtenir un codage RZ.
4. Enfin, la même horloge, associé à un circuit logique XOR et un convertisseur unipolaire/bipolaire permet d'obtenir un codage Manchester.

**Questions**

1. Observer sur 12 s, la séquence binaire générée et les signaux temporels représentant les différents codages de cette séquence (NRZ, RZ, Manchester).

Comment sont représentés les symboles "1" et "0" dans un codage NRZ ? RZ ? Manchester ?

2. Observer sur un temps long (régler le stop time = inf), le spectre des signaux pour les différents codage (NRZ, RZ, Manchester). Représentez les spectres.

3. Quels sont les avantages et désavantages du codage NRZ ? RZ ? Manchester ? Pour quel type d'applications sont-ils utilisés ?

# Partie 2 : Réception

Le but est de reconstituer la séquence binaire qui a été transmise par le signal analogique (électrique, électromagnétique, ...) reçu sur le récepteur.

Il ne s'agit donc pas de reconstituer au mieux le signal émis représentant la séquence binaire, mais de **décider**, pour chaque portion de signal reçu de durée  $T_s$  (temps d'émission du symbole), si elle représente un "1" ou un "0".

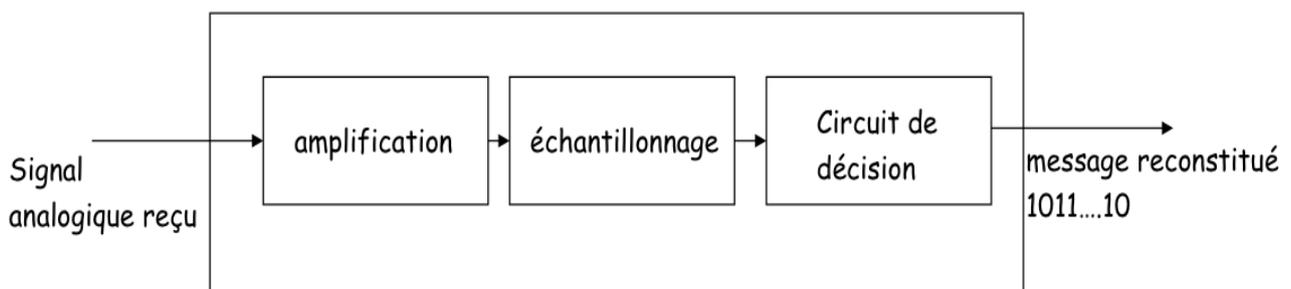


FIGURE 2 – Réception d'une transmission numérique

On mesure la qualité de la transmission par un taux d'erreurs binaires, c'est-à-dire le rapport entre le nombre d'erreur par le nombre de bits envoyé.

## Principe de réception en bande de base

Lorsque l'on code le signal en NRZ, le symbole "1" est représenté par un signal analogique, de durée  $T_s$ , et de valeur +1. On échantillonne ce signal pendant le temps  $T_s$  ; on prend 10 valeurs par exemple. On intègre ce signal pendant la durée  $T_s$ , c'est-à-dire que l'on fait la somme cumulée de ces 10 valeurs. L'intégrale est positive et vaut +10.

Pour le signal représentant un "0", qui vaut -1, l'intégrale sera négative et vaudra -10.

Il suffit donc d'intégrer le signal représentant le symbole et de comparer le résultat de l'intégration à la valeur 0 pour prendre la décision : si le résultat de l'intégrateur est positif, alors le symbole émis est un "1" ; si il est négatif, c'est un "0".

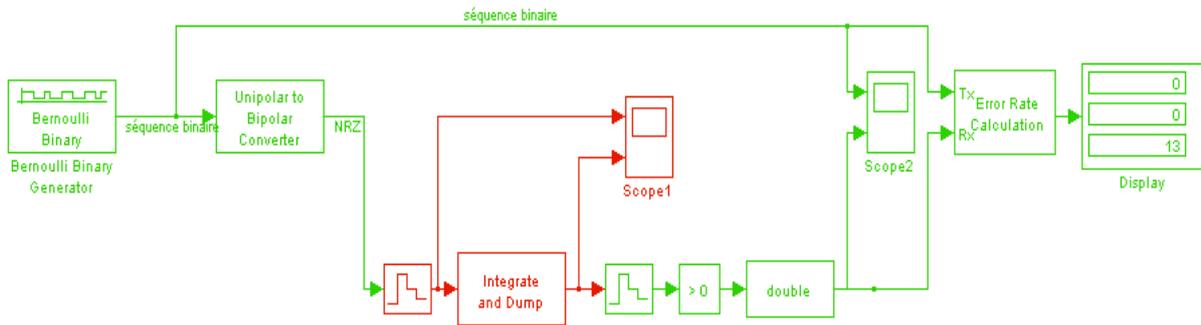
### Remarques

On ne peut prendre la décision qu'après avoir reçu le symbole : le séquence reconstituée est donc forcément décalée d'un symbole par rapport à la séquence émise.

## Réception d'une séquence codée NRZ

### Réception d'un signal non bruité

Télécharger le modèle *Reception\_NRZ\_sansBruit.mdl*

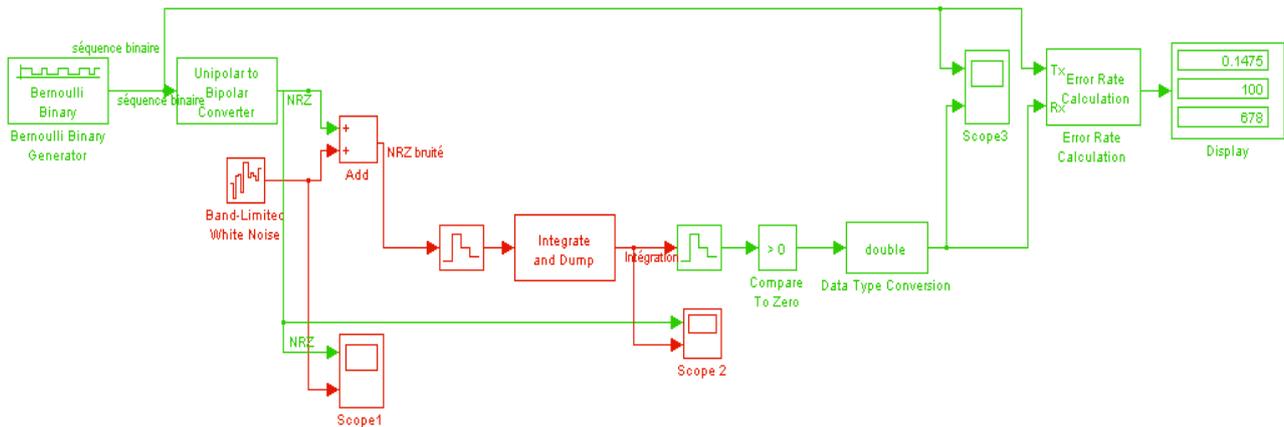


#### Questions

1. Sur le schéma, repérer les blocs "échantillonneur", "intégration" et "comparateur de seuil".
2. Pour une simulation de 12 symboles, représenter les signaux du scope1. Comment fonctionne le bloc "integrate and dump" ?
3. Représenter les signaux du scope2. Pourquoi la séquence reconstituée est décalée d'un symbole ?

## Réception d'un signal bruité

Télécharger le modèle *Reception\_NRZ.mld*



### Questions

1. Pour une simulation de 12 symboles :
  - (a) observer le scope 1 : le bruit vous semble-t-il important ?
  - (b) observer le scope 2 : l'intégration donne-t-elle des indications claires sur la valeur du symbole ?
  - (c) représenter les signaux du scope 3 : est-ce que la séquence décodée comporte des erreurs ? Pourquoi ?
  
2. Pour une simulation d'un grand nombre de symboles,  $10^4$ , faire varier la puissance du bruit (régler dans le bloc "Band-Limited White Noise" : noise Power = 2, 1, 0.5, 0.1, 0.01 et 0.001). Tracer la courbe taux d'erreur binaire fonction de la puissance du bruit.
  
3. Les transmissions numériques vous semblent-elles adaptées pour résister au bruit ? Pourquoi ?



# Partie 3 : canal de transmission

Pour s'adapter à la bande passante du canal, le codage ne se fera plus en bande de base, mais sur fréquence porteuse. Afin d'augmenter le débit de transmission, les symboles ne seront plus constitués d'un bit (1 ou 0), mais de plusieurs bits (par exemple 2 bits : symboles 00, 01, 10, 11). Nous étudierons dans cette partie les modulations QAM (Quadrature Amplitude Modulation) et leurs démodulations. Nous mesurerons l'influence du bruit du canal de transmission sur le taux d'erreur binaire à la réception.

## Modulation QAM-2 ou ASK-2

### 1-Modulation

L'information est constituée de symboles constitués d'un seul bit "1" ou "0". Pour s'adapter au canal de transmission l'information est portée à la fréquence  $F_0$ .

L'information est contenue dans l'amplitude de la porteuse  $A \cos(2\pi F_0 t)$  :

$1 \rightarrow A = +1$  et  $0 \rightarrow A = -1$

Le signal transmis est donc :

$$s(t) = I(t) \cos(2\pi F_0 t)$$

avec  $I(t)$  codage NRZ de la séquence binaire. C'est le signal analogique qui vaut soit +1, soit -1 pendant le temps symbole, selon qu'il représente un 1 ou un 0.

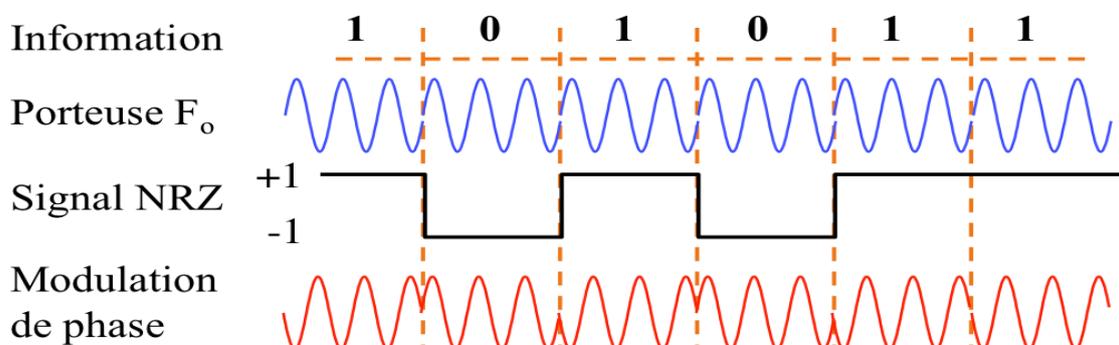
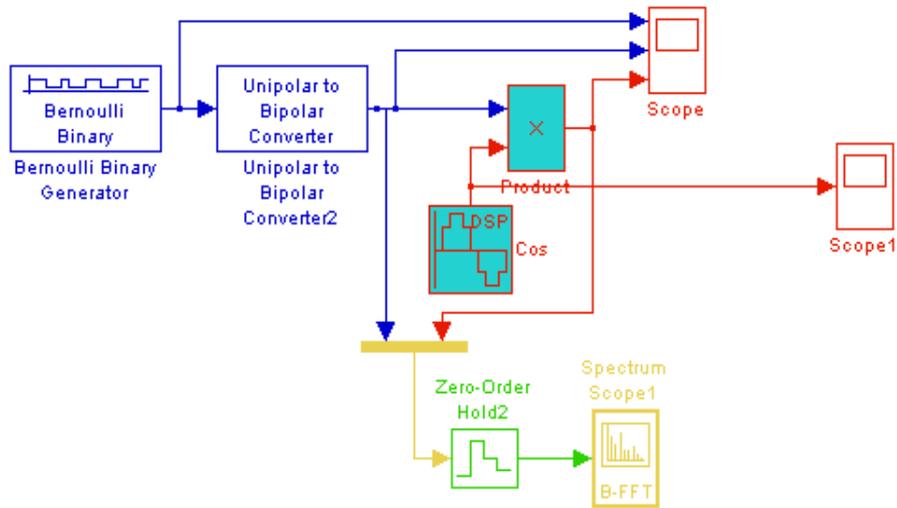


FIGURE 3 – Modulation sur fréquence porteuse  $F_0$

## Mise en oeuvre : Télécharger le modèle *ASK2.mdl*



### Questions

1. Représenter la représentation temporelle du signal porté (régler le temps de simulation à 12s).
2. Représenter le spectre de ce signal (temps de simulation 100000s). Commentaires.

## 2-Demodulation

Nous réaliserons une démodulation synchrone :

1. Le signal  $s(t)$ , modulé et porté, est multiplié par une sinusoïde en phase avec la fréquence porteuse. On obtient

$$s_1(t) = s(t) \times \cos(2\pi F_0 t) = I(t) \times \cos^2(2\pi F_0 t)$$

2. Le signal  $s_1(t)$  est du signe de  $I(t)$ , puisque  $\cos^2(2\pi F_0 t)$  est positif.  $I(t)$  est le codage NRZ de la séquence binaire. Il suffit d'intégrer le signal pendant le temps d'un symbole, pour savoir si  $I(t)$  est positif ou négatif, et donc si le symbole transmis est un "1" ou un "0".

### Remarque

La synchronisation avec la fréquence porteuse est importante. Si la sinusoïde utilisée pour la démodulation n'est pas synchrone avec la porteuse et vaut  $\cos(2\pi F_0 t + \psi)$  on obtient alors :

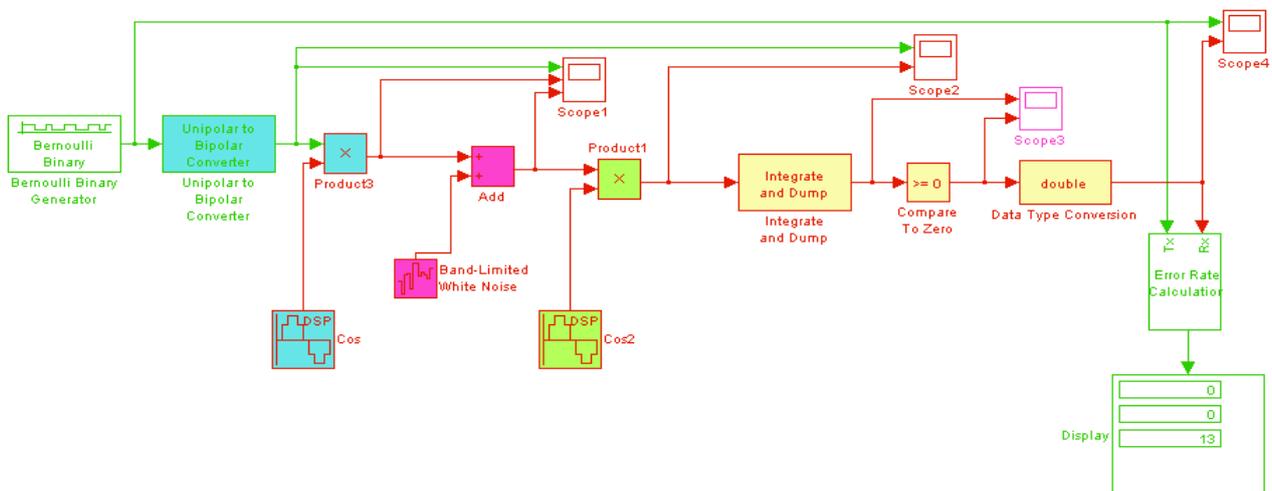
$$s_1(t) = s(t) \times \cos(2\pi F_0 t + \psi) = I(t) \times \cos(2\pi F_0 t) \times \cos(2\pi F_0 t + \psi) = \frac{I(t)}{2} \times \cos(\psi) + \frac{I(t)}{2} \times \cos(4\pi F_0 t + \psi)$$

On intègre le signal  $s_1(t)$  pendant le temps  $T_s$ .

On remarque que  $\cos(4\pi F_0 t + \psi)$  est à moyenne nulle sur une période de  $1/2F_0$ , donc sur le temps symbole  $T_s$ . Donc,  $\frac{I(t)}{2} \times \cos(4\pi F_0 t + \psi)$  ne donne aucune information sur le signe de  $I(t)$ .

l'intégrale du signal  $s_1(t)$  pendant le temps  $T_s$  sera du signe de  $\frac{I(t)}{2} \times \cos(\psi)$ . Si  $\cos(\psi)$  est positif, elle sera du signe de  $I(t)$ , si  $\cos(\psi)$  est négatif, elle sera du signe de  $-I(t)$  et si  $\psi = \frac{\pi}{2}$ , l'intégrale vaudra 0 sur le temps symbole et il sera impossible de décider si le signal représente un "1" ou un "0".

## Mise en oeuvre : Télécharger le modèle *ASK2demod.mld*



Questions

1. Observer pendant 12s les représentations temporelles des signaux sur les scopes 1, 2, 3 et 4. Préciser, sur le schéma, où sont les principales étapes : codage en BdB, modulation, démodulation synchrone sont réalisées.
  
2. Faire varier la phase du cosinus utilisé pour la démodulation synchrone (bloc Cos1). Que se passe-t-il lorsque la phase du cosinus vaut  $\pi/2$  (le cosinus est alors un sinus) ?
  
3. Pour un grand nombre de symboles,  $10^4$ , faire varier la puissance du bruit (dans le bloc "Band-Limited White Noise", faire varier : noise Power = 2, 1, 0.5, 0.1, 0.01 et 0.001). Tracer, en fonction de la puissance du bruit, le taux d'erreur binaire .

## Modulation en phase et quadrature : QAM-4

Pour augmenter le débit, on ne va plus envoyer un bit pendant le temps  $T_s$ , mais deux. Les symboles à transmettre seront donc une suite aléatoire de 00, 01, 10 ou 11.

### Modulation

On utilise deux séquences binaires. La première séquence binaire  $\{i_1, i_2, \dots, i_k, \dots\}$ , représente le premier bit des symboles. Elle est codée NRZ et représentée par le signal analogique  $I(t)$ , qui sera porté "en phase" :  $I(t) \cdot \cos(2\pi F_0 t)$ .

La seconde séquence binaire  $\{q_1, q_2, \dots, q_k, \dots\}$ , correspond au deuxième bit des symboles. Elle est codée NRZ et représentée par  $Q(t)$ , qui sera porté "en quadrature" (déphasage de  $\pi/2$ ) :  $Q(t) \cdot \cos(2\pi F_0 t + \pi) = -Q(t) \cdot \sin(2\pi F_0 t)$ .

Le signal transmis sera :

$$s(t) = I(t) \cdot \cos(2\pi F_0 t) + Q(t) \cdot \sin(2\pi F_0 t)$$

Pendant le temps  $T_s$  on aura donc transmis un symbole de 2 bits : le débit est multiplié par 2.

### Démodulation

Pour obtenir les trains binaire  $\{i_1, i_2, \dots, i_k, \dots\}$  et  $\{q_1, q_2, \dots, q_k, \dots\}$ , on procède de la façon suivante :

1.  $s(t)$  est multiplié par  $\cos(2\pi F_0 t)$ .

On obtient  $s_1(t) = I(t) \cdot \cos^2(2\pi F_0 t) + Q(t) \cdot \sin(2\pi F_0 t) \cos(2\pi F_0 t)$ .

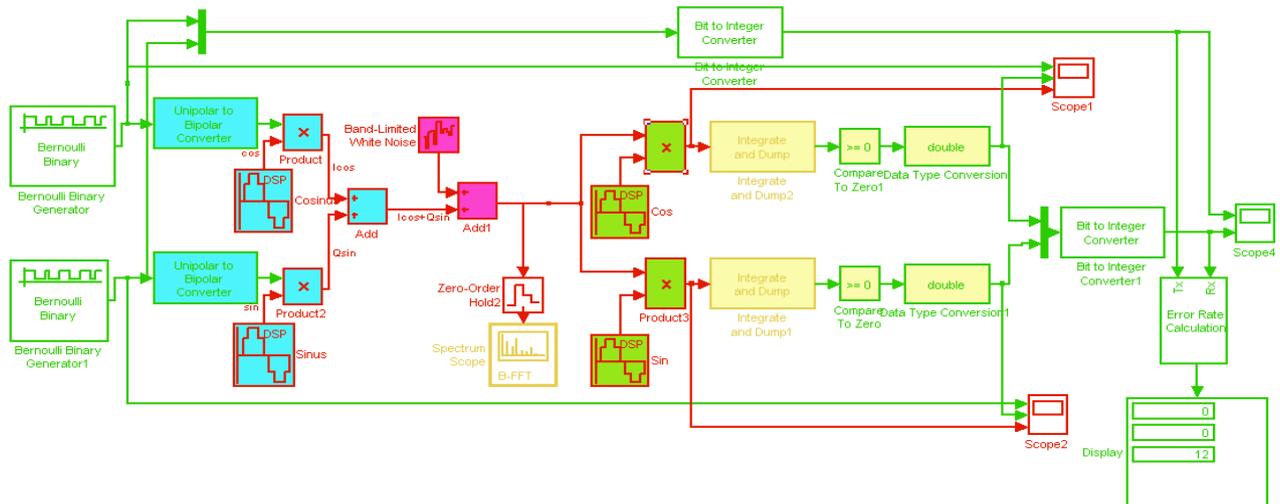
On intègre le signal pendant la durée du symbole. En remarquant que  $Q(t) \cdot \sin(2\pi F_0 t) \cos(2\pi F_0 t)$  est à moyenne nulle, l'intégrale a donc le signe de  $I(t)$ . Si l'intégrale est positive, le premier bit du symbole transmis est un "1", si elle est négative, c'est un "0".

2. Simultanément,  $s(t)$  est multiplié par  $\sin(2\pi F_0 t)$ .

On obtient  $s_2(t) = I(t) \cdot \cos(2\pi F_0 t) \sin(2\pi F_0 t) + Q(t) \cdot \sin^2(2\pi F_0 t)$ .

L'intégrale du signal pendant le temps d'un symbole a le signe de  $Q(t)$ . Le signe de l'intégrale nous permet de reconnaître le deuxième bit du symbole transmis.

## Mise en oeuvre : Télécharger le modèle *QAM-4.mld*



### Questions

1. Observer les représentations temporelles des signaux (régler le temps de simulation à 12s) et décrire les principales étapes réalisées (codage en BdB, modulation, démodulation synchrone).
2. Observer le spectre du signal (temps de simulation  $10^4$ ).
3. Pour une simulation d'un grand nombre de symboles,  $10^4$ , faire varier la puissance du bruit (à régler dans le bloc "Band-Limited White Noise" : noise Power = 2, 1, 0.5, 0.1, 0.01 et 0.001) et mesurer le taux d'erreur binaire. Tracer la courbe taux d'erreur binaire fonction de la puissance du bruit. La modulation QAM-4 est-elle plus résistante au bruit que la modulation ASK-2 ?

# **P**artie 4 : Transmissions **Wi-Max**

Dans cette partie, nous étudierons une chaîne de transmission WiMax . Une transmission WiMax est portée à 5GHz. Les symboles sont constitués de 6 bits (QAM-64), et la durée d'un symbole est de  $\frac{6}{54 \times 10^6} s$ , ce qui permet d'obtenir un débit de 54 Mbits/s.

Nous allons donc étudier la modulation QAM-64

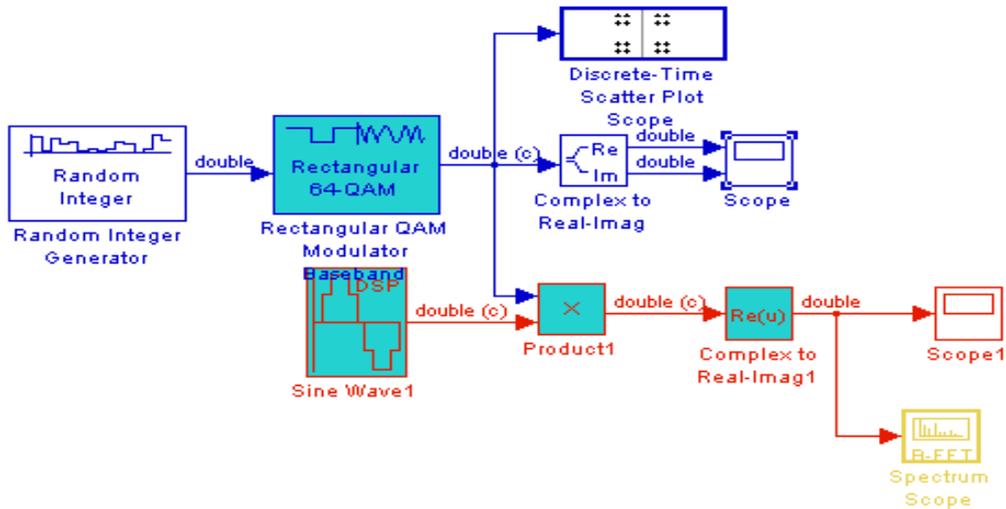
## **Modulation QAM-64**

Pour obtenir un débit important, on va transmettre des symboles constitués de 6 bits. On a donc  $2^6 = 64$  symboles différents. Les symboles sont séparés en deux trains de bits, constitués chacun de 3 bits qui seront codés en bande de base de la façon suivante :

100 $\longrightarrow$ 7	000 $\longrightarrow$ -7
101 $\longrightarrow$ 5	001 $\longrightarrow$ -5
111 $\longrightarrow$ 3	011 $\longrightarrow$ -3
110 $\longrightarrow$ 1	010 $\longrightarrow$ -1

Ces symboles seront alors portés, en phase et en quadrature, à la fréquence adaptée au canal de transmission :  $5GHz$  pour une transmission WiMax.

## Mise en oeuvre : Télécharger le modèle *QAM64.mld*



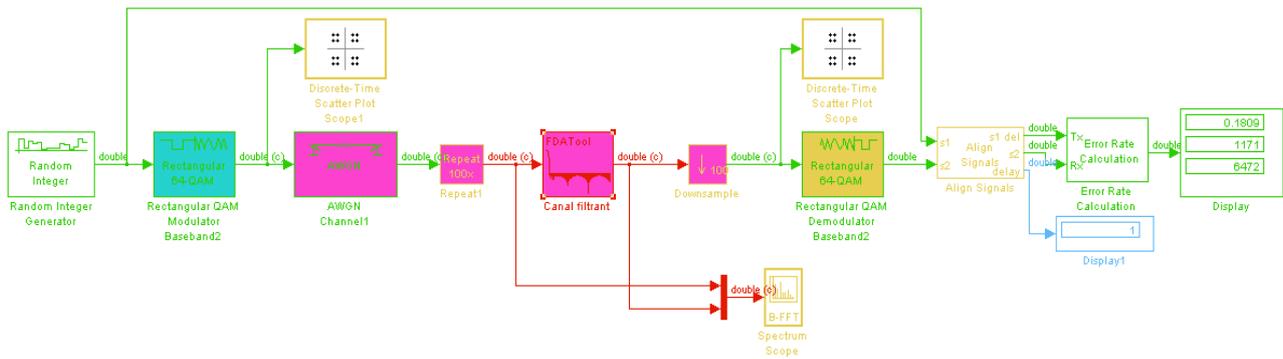
### Questions

1. Observer et représenter les signaux en fonction du temps (régler le temps de simulation à  $12/(9 \times 10^6)$  s), soit 12 symboles à 9 GHz.
2. Observer et représenter le spectre des signaux et la constellation des 64 points correspondant aux symboles envoyés (temps de simulation inf).

## Chaîne de Transmission

Une chaîne de transmission est simulée avec les blocs simulink. Le canal de transmission est bruité et à bande limitée.

Télécharger le modèle *ChaîneTrans.mdl*



### Questions

1. Observer les constellations à l'émission et à la réception.
2. Faire varier la puissance du bruit et observer les constellations et le taux d'erreur.
3. Soit un train binaire dont le débit binaire est de 1 Mbit/s. Quel est le débit des symboles si on utilise une modulation QAM-64 ?
4. Pourquoi, à la réception, le signal transmis est-il altéré ?
5. Quels sont les avantages et désavantages des transmissions numériques ?