



Pour aller plus loin... Introduction

De part le côté « magique » de la communication radio, de part le fait que les ondes électromagnétiques qui se propagent dans l'air soient invisible à l'œil nu, la réalisation de systèmes usant de la transmission sans fil telle que le mini-projet « Service de proximité VAE CODO » interpelle et éveille toujours la curiosité.

A quoi ressemblent les signaux émis et reçus ? Peut-on les visualiser ?

Sur quels paramètres et grandeurs influentes des signaux radios échangés a-t-on agit pour satisfaire les exigences de sécurité (anticollision, respect des priorités) et de prise en charge du client ?

Peut-on améliorer les solutions proposées pour obtenir une meilleure fiabilité des résultats obtenus ?

Aurait-on pu faire autrement pour satisfaire les exigences de service et de sécurité attendues ?

... Les questions qui traversent l'esprit sont multiples.

Selon une démarche déductive, les 3 activités suivantes vont permettre de répondre à l'essentiel des ces interrogations et de démystifier ainsi les grands principes de la modulation/démodulation numérique des systèmes de transmission.

Au sommaire de ces 3 activités :

Act1- Rappels et compléments de cours sur la modulation/démodulation numérique

Modélisation et simulation sous MATLAB SIMULINK des différents étages de la modulation/démodulation numérique

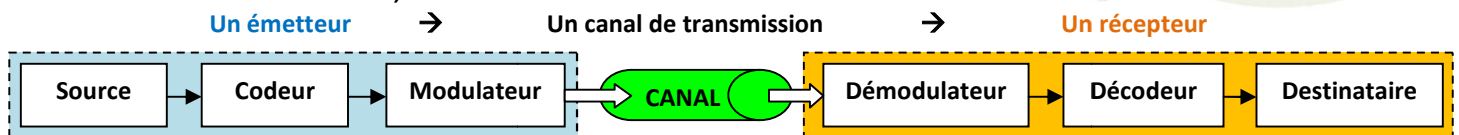
Act2- Mise en application simulée puis expérimentale dédié au module radio de la carte MICRO:BIT du mini-projet

Act3- Analyse qualitative des relevés des spectres de fréquence réceptionnés par le module radio de la carte µBIT à des fins d'améliorations des performances du mini-projet « Service de proximité VAE CODO ».

La Modulation/Démodulation Numérique sous MATLAB SIMULINK

Rappels du principe de base et compléments

Un SYSTEME DE TRANSMISSION, c'est :



Côté émetteur :

- La **source** émet un message analogique ou numérique (message = suite d'éléments binaires ou train binaire)
- Le **codeur** peut, si nécessaire, adapter la source au type de **modulation** et au **canal de transmission** (compression et correction)
- La **modulation** adapte de spectre du signal au **canal** (milieu physique) et aux conditions de transmission.

Côté récepteur :

- Les fonctions de **démodulation** et de **décodage** réalisent l'inverse des fonctions de modulation et de codage pour récupérer le message envoyé.

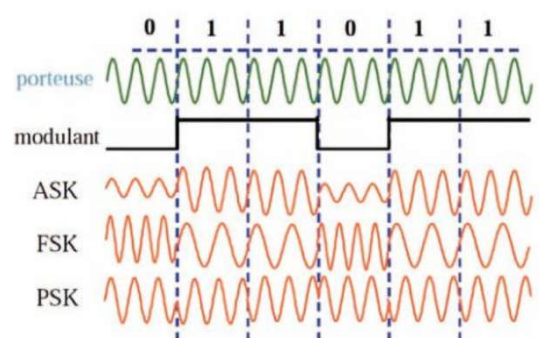
MODULATION

Un signal analogique ou numérique peut être modélisé par la relation mathématique d'une onde sinusoïdale de la forme :

$$s(t) = A(t) \cdot \cos [2\pi f(t) + \varphi(t)]$$

Qu'elle soit d'amplitude (AM), de Fréquence (FM) ou de Phase (PM), la modulation a pour objectif d'adapter le signal à émettre au canal de transmission. Cette opération consiste à modifier un ou plusieurs paramètres d'une onde porteuse centrée sur la bande de fréquence du canal.

Chacune de ces modulations a des propriétés spécifiques qui affectent la complexité du modulateur-démodulateur et son coût, l'encombrement spectral de la porteuse, la consommation de l'émetteur, l'immunité au bruit du signal modulé.



Conformément au programme de SI, nous nous limiterons ici aux modulations numériques de type ASK et FSK (la modulation de phase PSK étant hors programme).

Pourquoi utiliser la modulation numérique (ASK ou FSK) plutôt que la modulation analogique (AM ou FM) ?

En comparaison avec la modulation analogique, la modulation numérique offre :

Une meilleure capacité → Un plus grand nombre d'utilisateurs / au spectre de fréquence qu'il est possible d'utiliser

Une meilleure efficacité spectrale (en bits/s/Hz) à savoir un meilleur rapport entre le débit binaire et la largeur de bande

Une meilleure qualité des communications → meilleure protection contre les interférences même avec signal faible

La possibilité de **transmettre indifféremment** de la voix ou tout autre type de données

Une meilleure sécurité → Possibilités avancées de cryptage des données

Un coût plus faible → Les radios numériques sont plus faciles à produire et plus fiables.

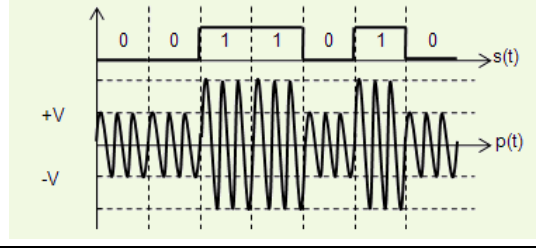
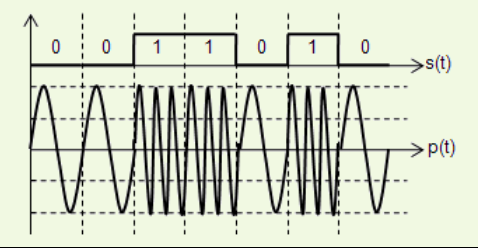
Les paramètres des modulations numériques sont :

Le débit binaire = nombre de bits transmis par seconde (en bits/s)

Le débit Symbole ou la **Rapidité de modulation** = Nombre d'états de modulation ou de symboles par seconde (en bauds)

La qualité de liaison représentée le plus souvent par le TEB (Taux d'Erreur Binaire) ou BER (Bit error rate)

L'efficacité spectrale = rapport entre le débit binaire et la largeur de bande (en bits/s/Hz)

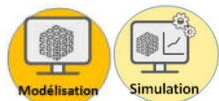
Modulation d'amplitude ASK à 2 états	Modulation de fréquence FSK à 2 états
	
<p>Elle est principalement utilisée dans sa forme binaire.</p> <p>Simple à réaliser mais peu performante et sensible au bruit.</p> <p><i>Elle est utilisée dans des systèmes simples de télécommande.</i></p>	<p>Ce type de modulation est largement utilisé de part sa simplicité de mise en œuvre. A chaque symbole binaire correspond une fréquence.</p> <p>Il existe plusieurs formes dérivées de FSK (<i>exemple : la modulation GFSK utilisée dans le module radio de la carte MICRO:BIT qui permet de réduire le spectre de fréquence à l'aide d'un filtre Gaussien</i>)</p> <p>La FSK est Largement utilisée dans les MODEMS Télécoms, Télécommandes radios et Téléphones sans fils (DECT, Pagers...)</p>

CONCLUSION : Les modulations/démodulations numériques n'offrent que des avantages.

Les systèmes modernes requièrent des techniques de modulation de plus en plus sophistiquées afin de satisfaire des contraintes de spectres, de débit, de qualité et d'intégrité des informations transmises ainsi que des coûts de fabrication.

Seules des modulations numériques associées à des techniques de traitement du signal permettent de répondre à ses besoins. Les performances des modulations numériques sont largement améliorées par les techniques de codage et de multiplexage, notamment en efficacité spectrale et protection aux interférences.

L'utilisation de la modélisation et simulation multi-physiques contribue largement à cette évolution.



Appropriation des connaissances par la MODELISATION et SIMULATION MATLAB-SIMULINK

SYSTEME DE TRANSMISSION



1- Générer une source de données sous MATLAB SIMULINK

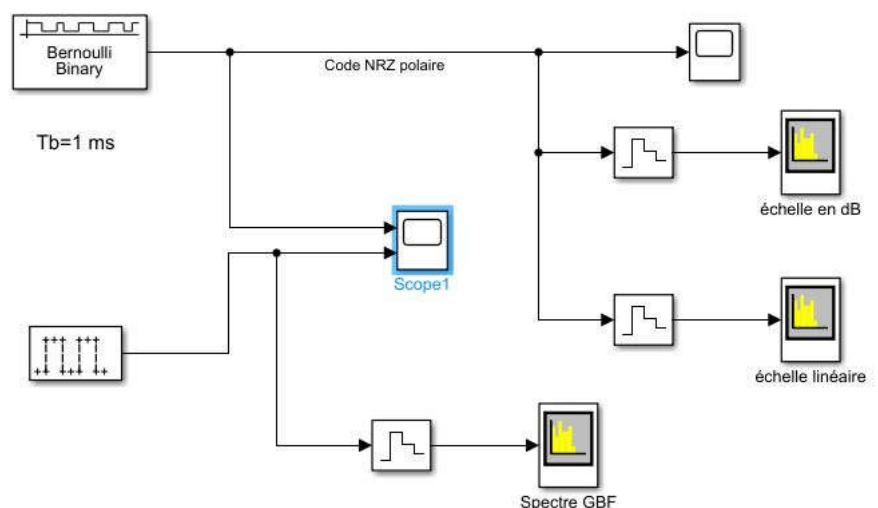
Lorsque l'on conçoit ou étudie un système de transmission, il faut, avant toute chose, être capable de générer des données les plus représentatives qui soient d'un quelconque échange. Ces données peuvent être apparentées à celles contenues dans un texte ou message que l'on souhaiterait envoyer. On peut également les assimiler, dans notre contexte d'étude, aux différents identifiants transmis par les modules radios des cartes MICRO:BIT émettrices des VAE ou des bornes d'appel du mini-projet.

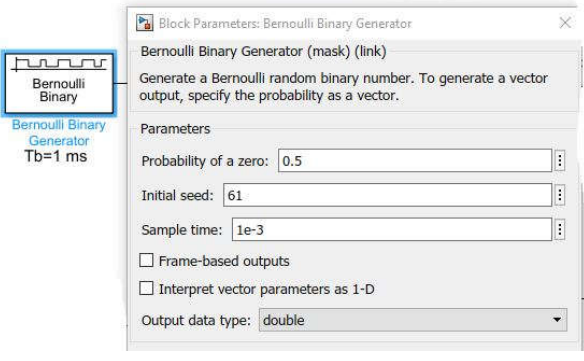
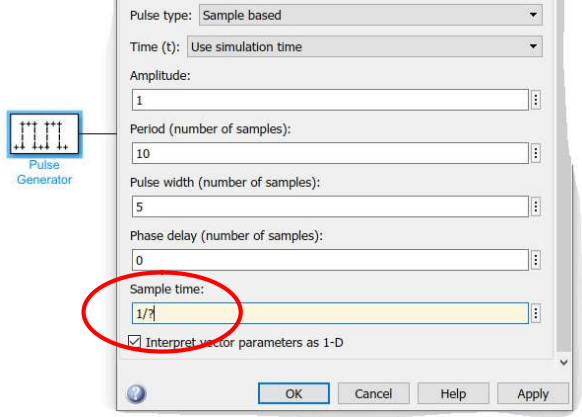
Pour mener à bien cette génération de données, il faut impérativement utiliser un générateur de signaux pseudo aléatoires de 0 et de 1 binaires et non un générateur de signaux basse fréquence (GBF) de signal carré.

PROBLEME : Pourquoi générer des séquences pseudo aléatoires plutôt qu'un signal carré ?

Pour répondre à cette question, nous allons nous aider de MATLAB.

- 1a- Ouvrir le fichier
GenererLaSource1.slx

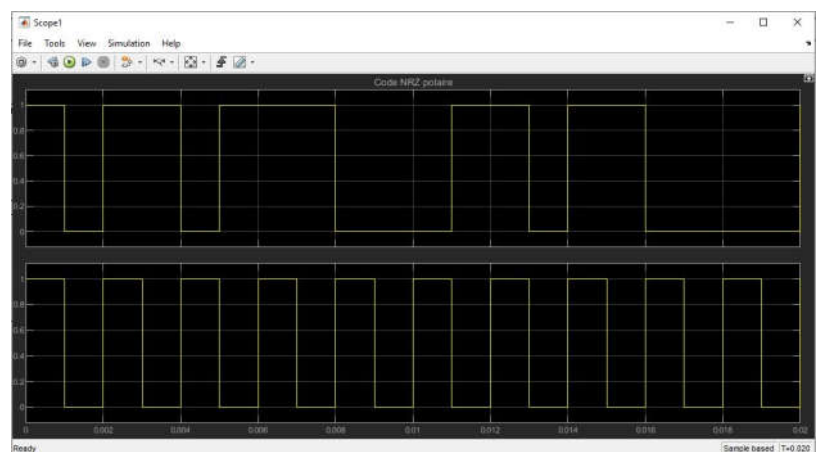


Générateur binaire Pseudo aléatoire	Générateur Basse fréquence (GBF)
 <p>Le générateur de Bernoulli est tel qu'il peut générer un code pseudo aléatoire de 0 binaire ou 1 binaire selon une probabilité de 0.5. Ce qui signifie qu'il y aura autant de chance d'avoir un 0 qu'un 1 en sortie. <i>NB : En effet, dans un quelconque message numérique la probabilité est forte d'avoir autant des 0 binaires que des 1 binaires.</i></p> <p>Le « Sample Time » est réglé à 1.10^{-3} ce qui signifie que la durée d'un bit est Tb = 1 ms.</p> <p>Ce générateur est donc déjà préconfiguré.</p>	 <p>Ce générateur fabrique un signal d'horloge de rapport cyclique égal à 50%.</p> <p>1b- Achever de régler le paramètre « Sample time » de sorte que la durée d'un bit (0 ou 1) soit de 1 ms.</p>

- 1c- Lancer la simulation durant 20 ms et observer les signaux ainsi générés.
- 1d- Valider le réglage du débit binaire du GBF afin d'obtenir des chronogrammes conformes à ceux donnés ci-contre.

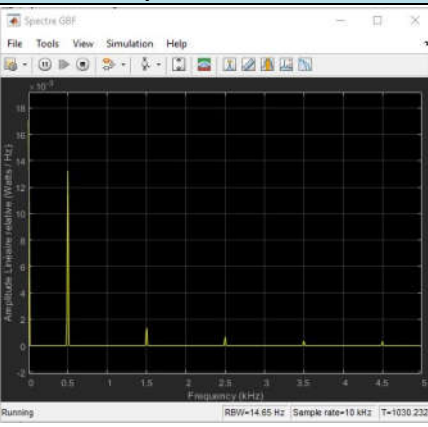
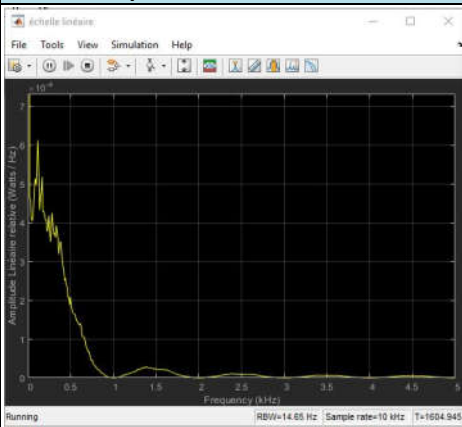
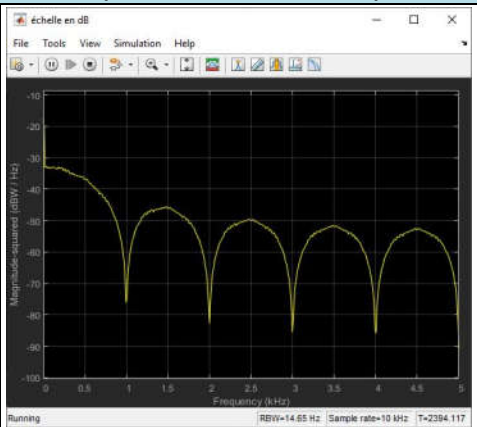
En déduire la valeur du débit binaire en bit/s

- 1e- Quelle est la différence notable entre les 2 signaux ou codes générés ?



Pour pouvoir répondre au problème posé :

- 1f- Lancer la simulation durant un temps infini (Stop Time = « inf »), observer les signaux à l'aide des 2 analyseurs de spectre et répondre au quiz afin d'appréhender les différences entre les 2 spectres de fréquence ainsi générés.

Spectre du GBF	Spectres du Générateur Pseudo aléatoire (en Watts et en dBWatts)																
 <p>Figure 1</p>	 <p>Figure 2</p>	 <p>Figure 3</p>															
Quelle est la valeur de la fréquence du fondamental (raie principale) ?	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Quiz sur le spectre du générateur pseudo aléatoire (fig. 2 et 3)</th><th>Vrai</th><th>Faux</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>On observe des raies discrètes ?</td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>On observe une infinité de raies ?</td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>On observe un spectre continu de raies ?</td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>On observe plusieurs lobes ?</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	Quiz sur le spectre du générateur pseudo aléatoire (fig. 2 et 3)	Vrai	Faux	On observe des raies discrètes ?			On observe une infinité de raies ?			On observe un spectre continu de raies ?			On observe plusieurs lobes ?			
Quiz sur le spectre du générateur pseudo aléatoire (fig. 2 et 3)	Vrai	Faux															
On observe des raies discrètes ?																	
On observe une infinité de raies ?																	
On observe un spectre continu de raies ?																	
On observe plusieurs lobes ?																	

1g- De tous les lobes du spectre de la figure 2 ou 3, quel est celui qui détient la plus grande puissance d'émission ?

NB : L'aire sous la courbe correspond à la densité spectrale de puissance. Le calcul de cette aire permet de déterminer la puissance du signal. Il faut faire appel aux transformées de Fourier et non aux séries de Fourier pour calculer cette aire.

1h- Quelle est la durée de ce lobe ? Quelle est sa bande passante ?

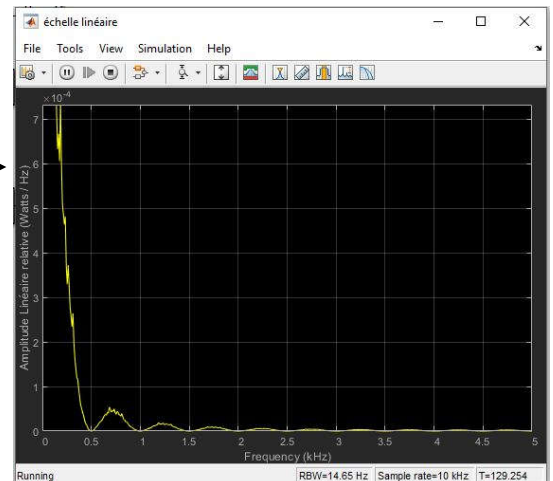
1j- Réduire de moitié la fréquence d'émission d'un bit puis relancer la simulation et commenter le résultat :

Chiffrer la durée d'émission d'un bit et le débit binaire (en bit/s) :

Chiffrer la largeur de bande et donc la bande passante du lobe principal :

Rayer la mauvaise proposition :

Plus la fréquence est petite et plus le débit binaire est	grand	petit
Plus le débit binaire diminue et plus le spectre est	large	étroit
Plus le débit est important et plus la bande passante est	large	étroite



Notons que dans la course à la compétitivité industrielle, tout l'enjeu de la recherche dans le domaine des transmissions numériques est de diminuer la largeur du spectre tout en conservant le même débit binaire. Parmi les défis à relever, il y a notamment celui de trouver un type de codage offrant un spectre le plus étroit possible sans perte d'information.

SYSTEME DE TRANSMISSION



2- Générer différents types de codage de transmission en bande de base sous MATLAB SIMULINK

La séquence binaire générée et encodée précédemment par le générateur pseudo aléatoire est un code de type NRZ polaire qui peut être qualifié de « rustique ». De façon très basique, chaque état binaire y est représenté soit par une tension haute pour le 1 binaire soit par une tension basse (0v) pour le 0 binaire.

Une trop grande émission de 1 ou de 0 consécutifs peut entraîner, côté récepteur, de sérieuses difficultés de reconstitution du signal. L'absence de transition (variation d'état binaire du signal émis) peut entraîner momentanément des pertes de synchronisation des signaux d'horloges donc conduire à la perte fâcheuse de données.

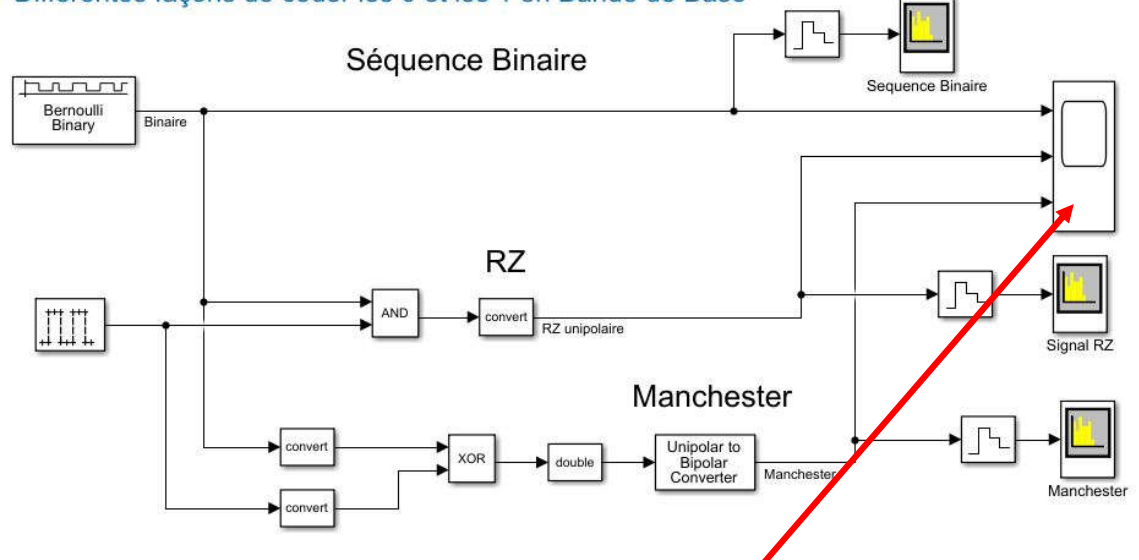
PROBLEME : En quoi la logique d'encodage limite les risques de perte de données à la réception ?

Pour répondre à cette question, nous allons nous aider de MATLAB.

Il existe plusieurs types de codage en bande de base. Voici deux nouveaux codes, le code RZ unipolaire et le code Manchester, qui vont permettre de mieux appréhender la logique de transmission et le problème posé.

2a- Ouvrir le fichier
DiversCODAGES1.slx

Différentes façons de coder les 0 et les 1 en Bande de Base

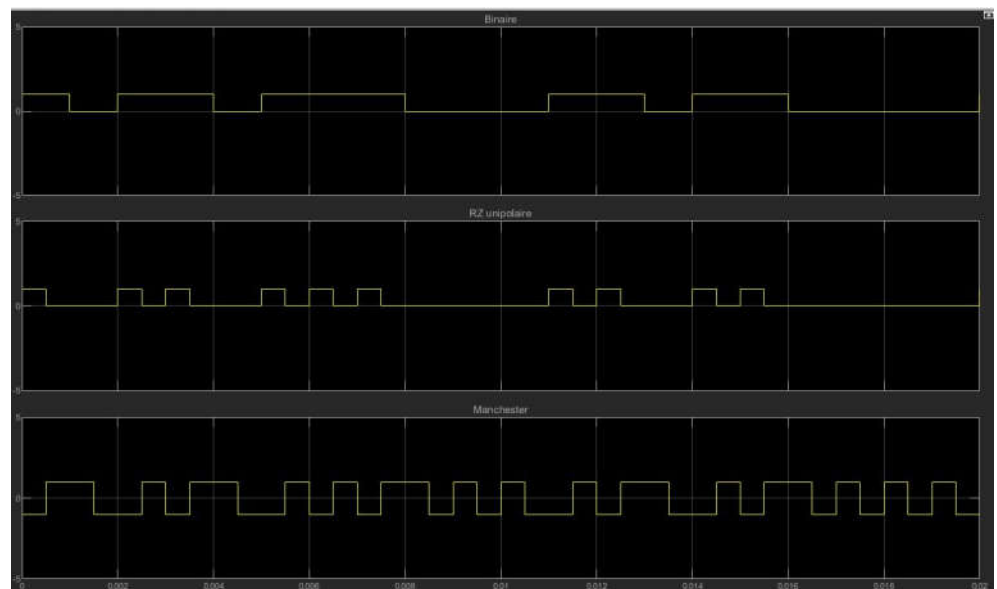


2b- Lancer la simulation durant 20 ms et observer les différents codes générés à l'oscilloscope.

On obtient ces relevés :

NB : Le codage MANCHESTER est encore utilisé dans les réseaux informatiques pour les liaisons Ethernet bas débits (100 Mbits/s).

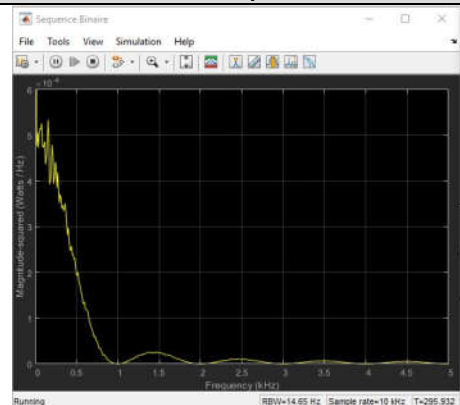
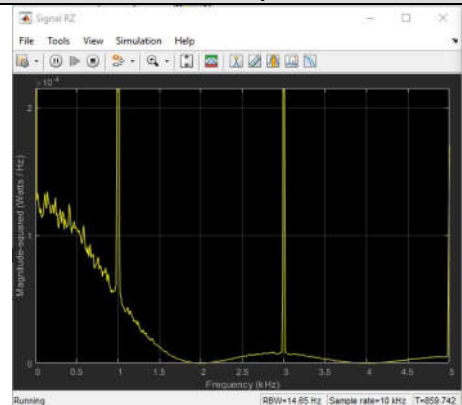
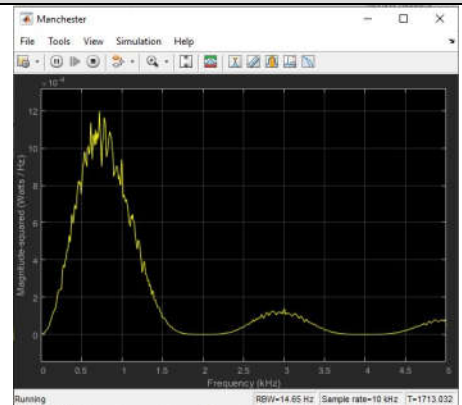
2c- **Analyser temporelle.** Compléter pour cela le tableau suivant en reportant la représentation d'un bit pour un état logique donné et répondre au quiz :



Niveau binaire	Code NRZ polaire	Code RZ unipolaire	Code MANCHESTER
Niveau BAS			
Niveau HAUT			

Analyse des différents types d'encodage proposés	VRAI	FAUX
L'inconvénient du code NRZ polaire est qu'il ne permet pas la création de transition lors de longues séquences de 0 et de 1 d'où le risque de perte de synchronisation et donc de données lors de la phase de décodage.		
Le code RZ unipolaire permet de s'affranchir de la problématique constatée pour le code NRZ polaire lors de l'émission d'une longue séquence de 1.		
L'inconvénient du code RZ unipolaire, comme le code NRZ polaire, ne permet pas la création de transition lors de longues séquences de 0.		
Le code MANCHESTER, de part sa bipolarité, permet de s'affranchir des problèmes constatés dans les 2 codes précédents. La synchronisation de l'horloge du récepteur sur l'émetteur est facilitée.		

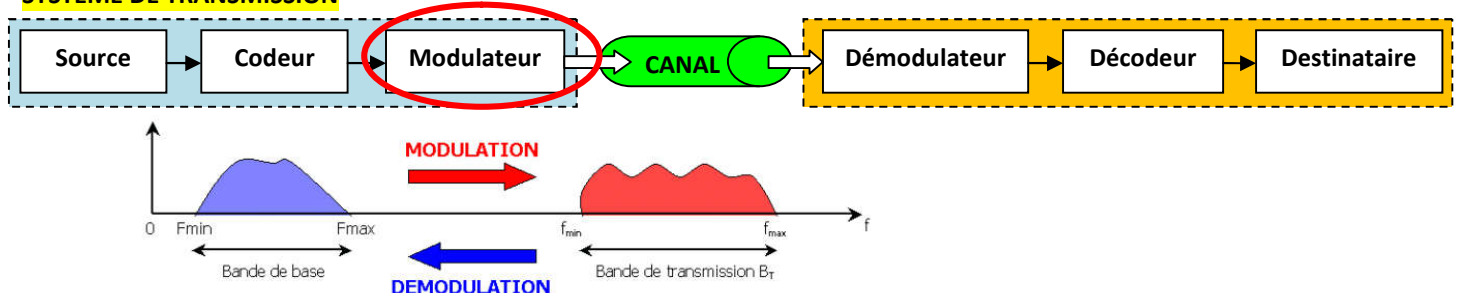
2d- **Analyse spectrale.** Lancer la simulation durant un temps infini (Stop Time = « inf »), observer les différences de spectres selon le code généré et consulter les principaux avantages et inconvénients que l'on peut en extraire.

Code NRZ polaire	Code RZ unipolaire	Code MANCHESTER
		
Avantage : le spectre est plus étroit que pour les 2 autres codes	Avantage : Au spectre continu s'ajoute des raies discrètes pour chaque lobe. Ces raies vont donc faciliter, côté réception, la reconstitution du rythme de l'horloge.	Avantage : A la différence des 2 autres spectres, il n'y a pas d'énergie à fréquence nulle.
Inconvénient : On est en présence d'énergie à fréquence nulle. Autrement dit, le signal numérique présente une composante continue non nulle qui, par définition, ne transporte aucune information et ne fait que provoquer des échauffements liés aux pertes par effet Joule dans les composants. Il convient donc de diminuer sa valeur	Inconvénient : la durée des variations est 2 fois plus courte donc le spectre est 2 fois plus large Inconvénient : idem que pour le code NRZ polaire du point de vue énergie.	Inconvénient : A la différence du code NRZ polaire, la largeur du lobe est également 2 fois plus importante.

Dans le cours, nous avons vu que les applications de la transmission en bande de base se limitent essentiellement à la transmission filaire sur de courtes distances. En effet, plus la distance de transmission augmente et plus l'atténuation du signal devient importante. La dégradation du signal se fait vite ressentir pour des émissions sur de longues distances.

On lui préfère alors « La transmission par Modulation/Démodulation » appelée encore modulation en bande transposée à des fréquences beaucoup plus élevées. Notons que cette technique est obligatoire pour des transmissions de longue distance faisant appel à des canaux non-électriques tels que le canal de transmission radio ou encore le canal de transmission par fibre optique.

SYSTEME DE TRANSMISSION



3- Mettre en œuvre une MODULATION NUMERIQUE de type ASK sous MATLAB SIMULINK

La transmission en modulation de bande transposée du type ASK réalise une translation du spectre de fréquence. Cette translation s'obtient en multipliant le signal en bande de base généré par un **signal modulant** de fréquence plus élevée appelé porteuse. Le signal ainsi obtenu et transmis s'appelle le **signal modulé**.

PROBLEME : Comment créer un signal modulé en amplitude ?

Pour répondre à cette question, nous allons nous aider de MATLAB.

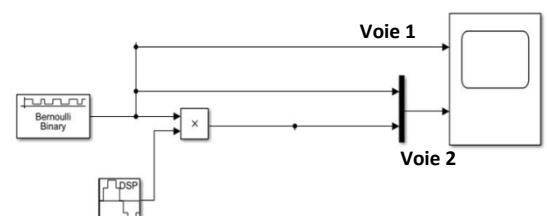
3a- Dédire des 2 relevés suivants :

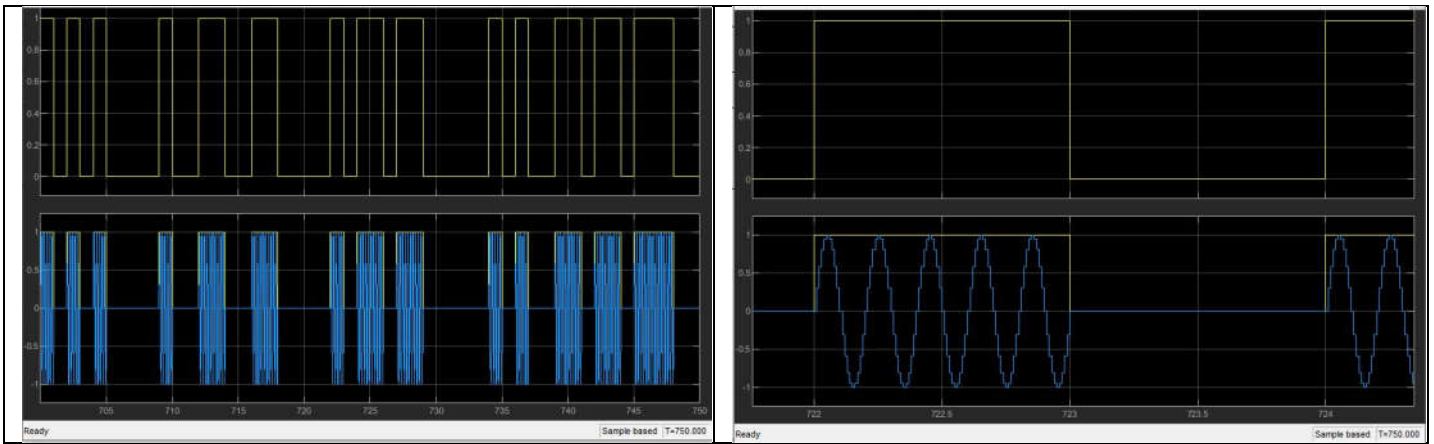
Quelle voie de l'oscilloscope représente le signal en bande de base ?

Quelle voie de l'oscilloscope représente le signal modulé ?

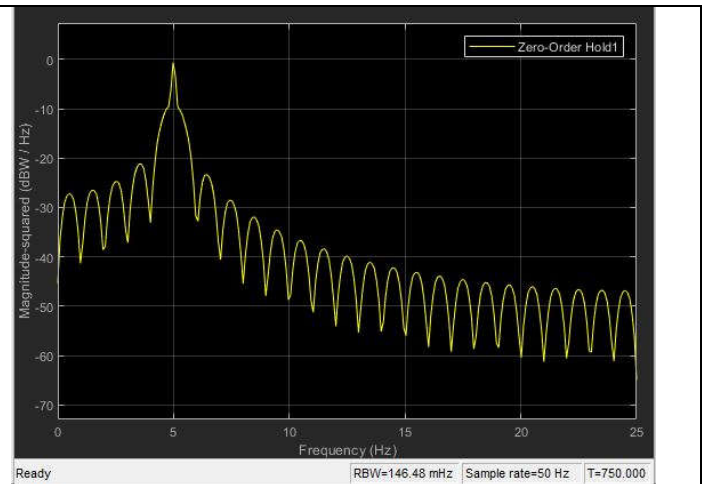
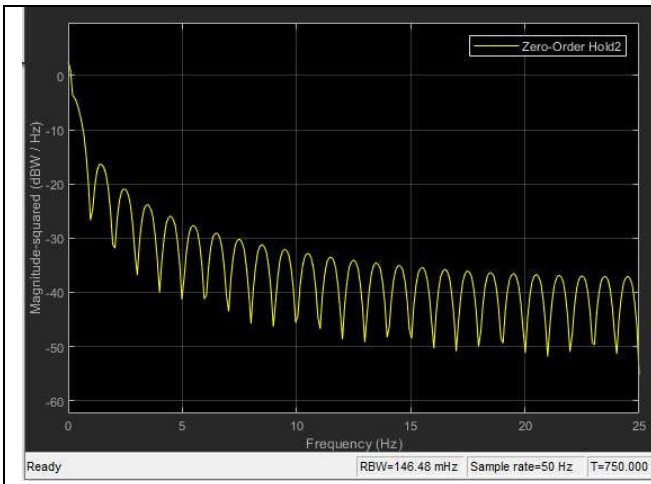
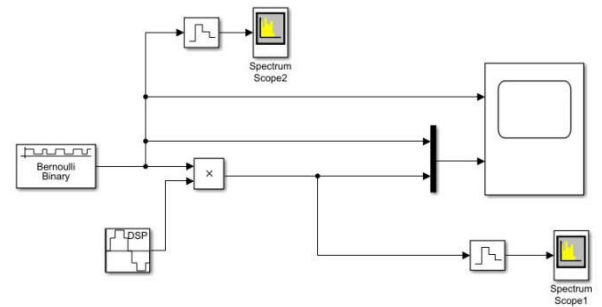
La durée d'un bit : ? En déduire le débit binaire : ?

La fréquence de la porteuse : ?

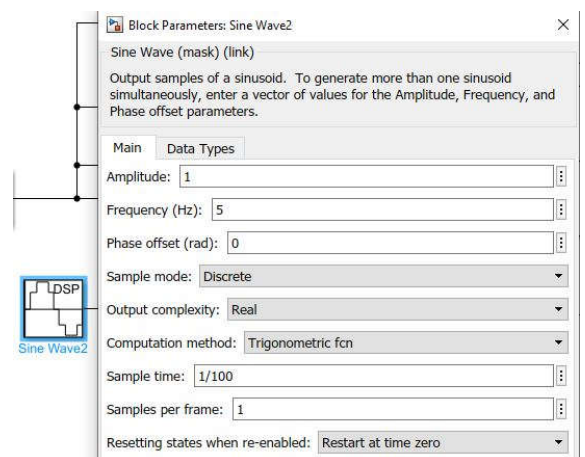
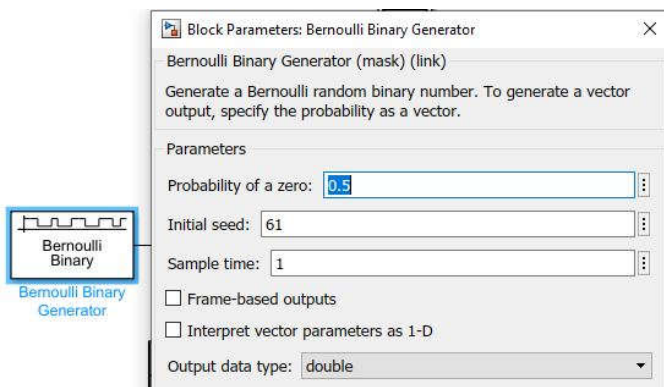




3b- Quel phénomène attendu observe-t-on au niveau des relevés des spectres associés ?



3c- Ouvrir le fichier **ModulationASK1.slx** pour vérifier l'essentiel de vos réponses.



SYSTEME DE TRANSMISSION – MODELISATION COMPLETE (sans et avec bruit)

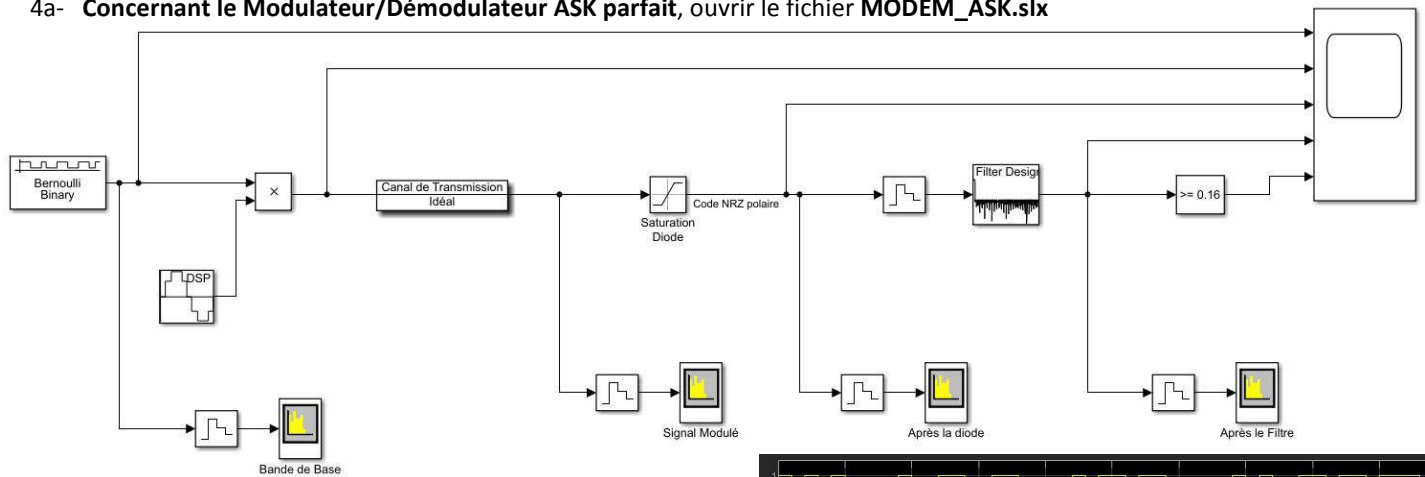


4- Mettre en œuvre une MODULATION/DEMODULATION NUMERIQUE de type ASK sous MATLAB SIMULINK

PROBLEME : Quelles sont les limites d'une modulation/démodulation ASK ?

Pour répondre à cette question, nous allons scinder le travail en 2 parties : **Le MODEM ASK parfait et le MODEM ASK bruité**

4a- Concernant le Modulateur/Démodulateur ASK parfait, ouvrir le fichier **MODEM_ASK.slx**



4b- Localiser la partie émettrice et la partie réceptrice du MODEM sur le modèle.

Repérer le démodulateur et ses 2 fonctions :

- Le détecteur d'enveloppe (redresseur à diode)
- Le filtre numérique

Repérer également le comparateur binaire à seuil

4c- Repérer ci contre le chronogramme du

- Signal de la séquence binaire
- Signal modulé
- Signal démodulé

4d- Quels constats peut-on faire au niveau du signal de sortie ?

4e- Quelles sont les caractéristiques du filtre numérique ?

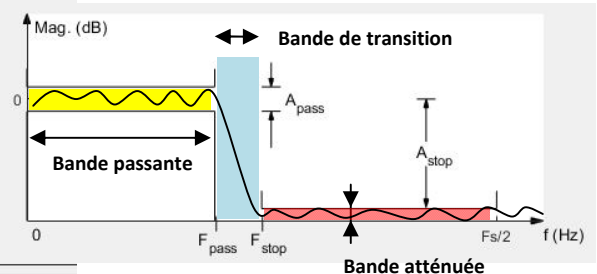
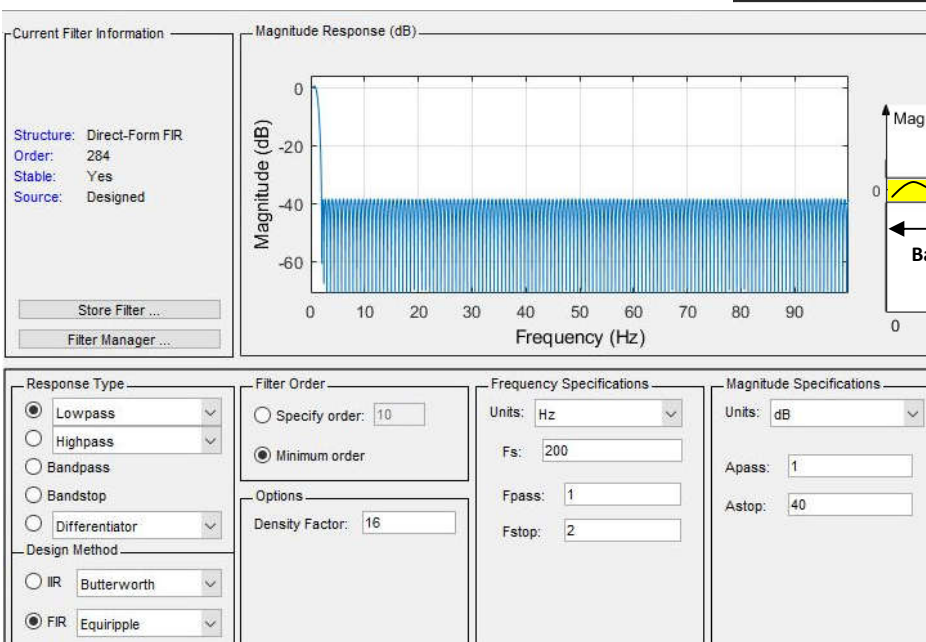
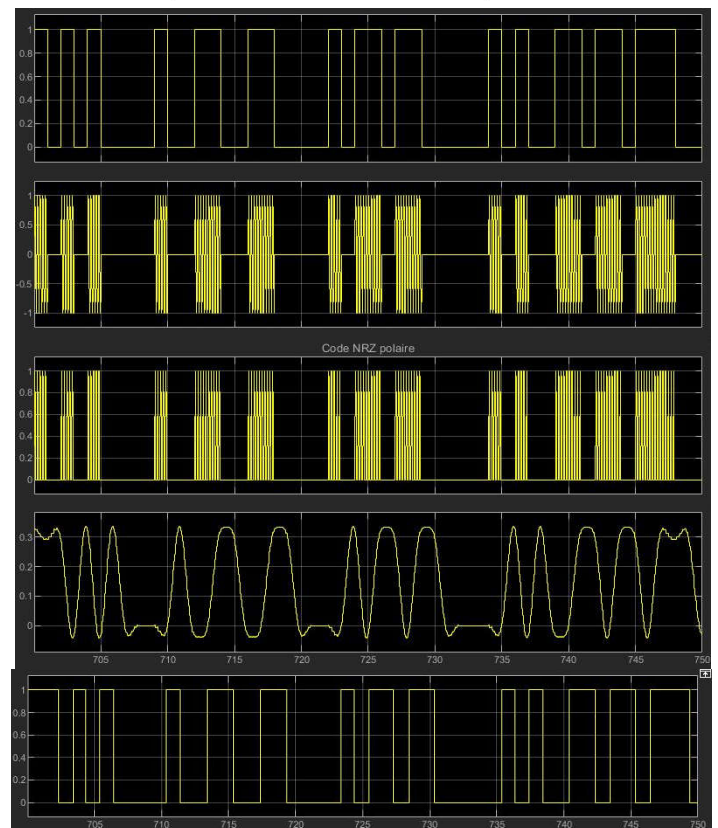
Pour répondre à cette question, préciser :

Le type de filtre employé :

La bande passante (en Hz) :

La largeur de bande de transition (en Hz) :

L'atténuation (en dB) de la bande atténuée :



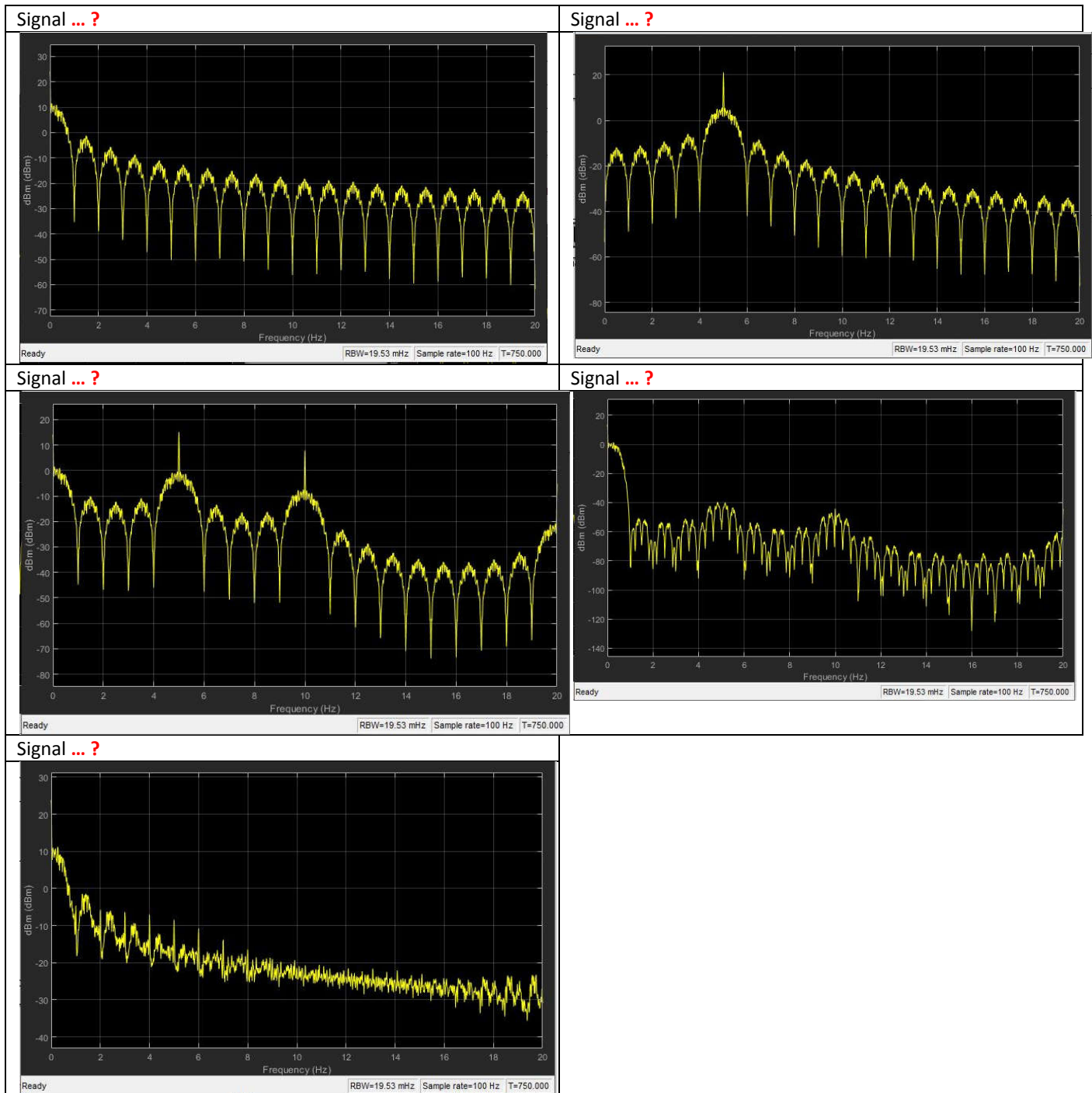
Gabarit du filtre numérique retenu

4f- Analyse spectrale

Reporter pour chacun des spectres l'emplacement du signal en bande de base, du signal en bande transposée, du signal redressé par la diode, du signal filtré et du signal modulé.

Les vertus de la diode permettent de recréer le lobe principal du signal en bande de base. Entourer ce lobe sur le spectre concerné.

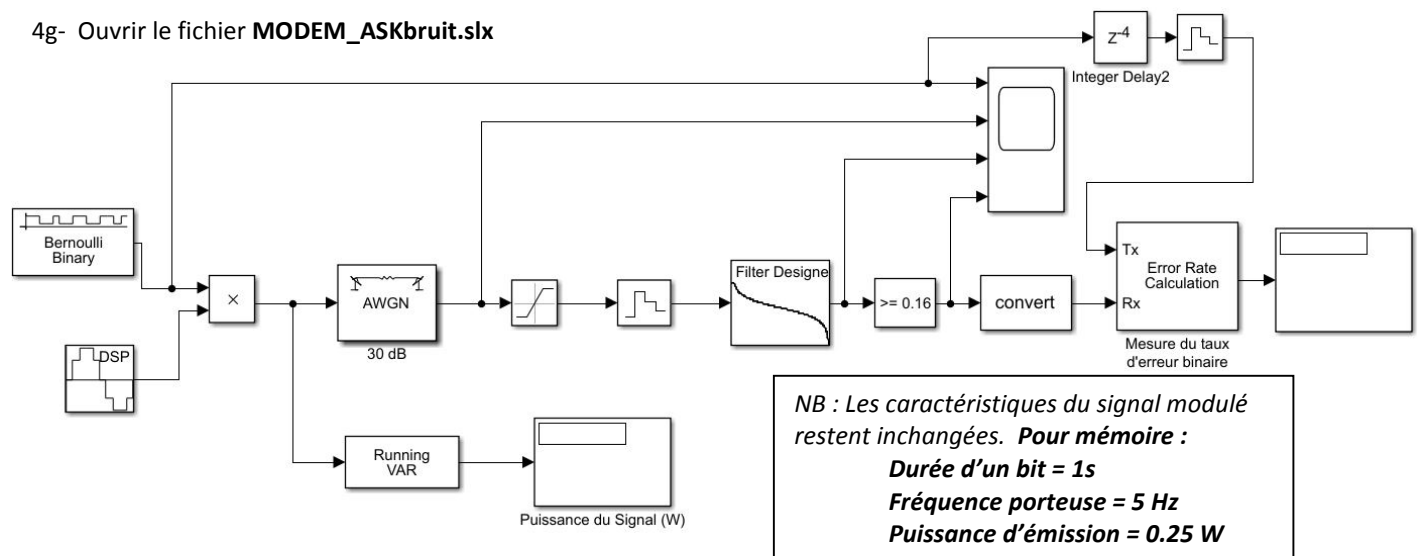
Que deviennent les autres lobes une fois filtrés et adaptés.



Dans la réalité, comme pour tous les signaux échangés dans les systèmes électroniques, les signaux transmis sont soumis à des perturbations indésirables que l'on désigne de façon générale sous l'appellation de bruit. Nous allons voir l'influence d'un signal bruité sur la modulation/démodulation d'amplitude ASK afin de constater les limites de cette dernière en termes de qualité de transmission.

Grace au bloc SIMULINK de modélisation d'un canal de transmission (repéré AWGN dans le schéma suivant), nous allons pouvoir simuler l'influence du bruit sur la ligne de transmission des données. Un dernier bloc de calcul va nous permettre d'évaluer le nombre d'erreurs commises en fonction du réglage du rapport de Densité spectrale de puissance du signal sur Densité spectrale de puissance du bruit (soit un rapport de puissance signal/bruit).

4g- Ouvrir le fichier **MODEM_ASKbruit.slx**



4h- Pour une durée de simulation de 5000 s correspondant à l'émission de 5000 bits, compléter le tableau de relevé pour un rapport de puissance signal/bruit de 30dB puis un rapport de 20 dB.

Rapport de puissance signal / bruit E_b/N_0 (dB)	Nombre de bits émis	Nombre d'erreurs binaires pour le nombre de bits émis	Taux d'erreur binaire
30 dB (signal peu ou pas bruité)			
20 dB (signal bruité)			

4i- Observer les chronogrammes correspondants à chaque rapport de bruit.
Estimer le nombre d'erreurs constatées sur l'extrait de relevé.

Extrait de relevés du signal peu ou pas bruité	Extrait de relevés du signal bruité
Nombre d'erreurs comptabilisées = ?	Nombre d'erreurs comptabilisées = ?

Commentaires associés à ces relevés :

Le taux d'erreur de 10 % pour le signal bruité est absolument irrecevable. Aucun système de transmission de données ne peut tolérer un taux d'erreur aussi élevé.

Pour donner un ordre d'idée, la transmission TNT de programme de télévision numérique tolère un nombre d'erreur maximum de 1 bit pour 1 000 000 de bits émis. Au delà, le signal numérique se fige à l'écran ou n'est plus reçu.

De même, un tel taux d'erreur lors de transfert de données bancaires obligerait à fermer le plus rapidement possible la connexion.

La modulation numérique ASK est donc très sensible au bruit pour la simple raison que le niveau de bruit s'ajoute à l'amplitude du signal. Sachant que l'information à transmettre est contenue dans cette amplitude du signal, cet ajout de bruit génère des erreurs de transmission.

Dans le cas de la modulation numérique FSK, l'information à transmettre est contenue dans la fréquence. Par conséquent l'ajout du bruit en amplitude devient moins gênant rendant ainsi ce type de transmission plus fiable.

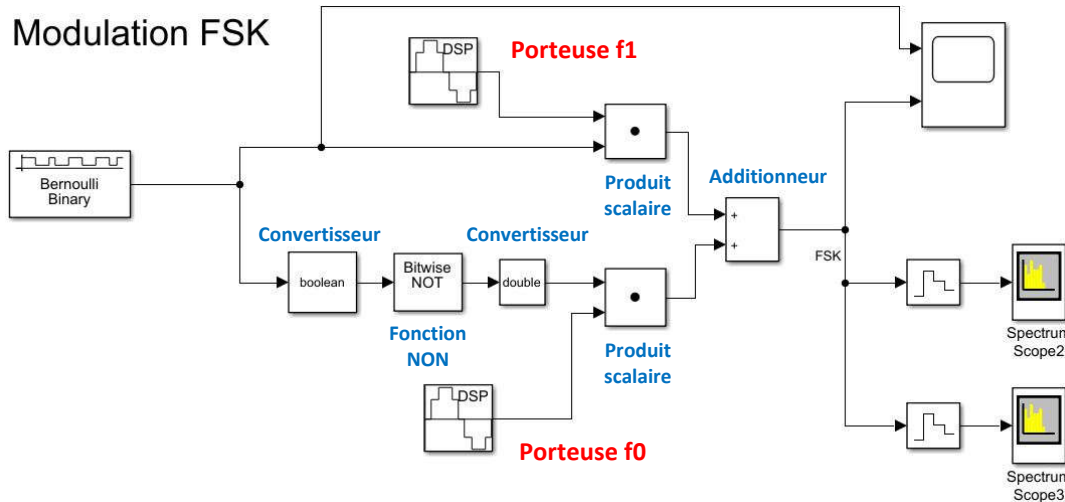
SYSTEME DE TRANSMISSION



5- Mettre en œuvre une MODULATION NUMERIQUE de type FSK sous MATLAB SIMULINK

PROBLEME : Quels sont les avantages et inconvénients d'une modulation FSK ?

Voici la modèle SIMULINK proposé pour répondre à cette interrogation :



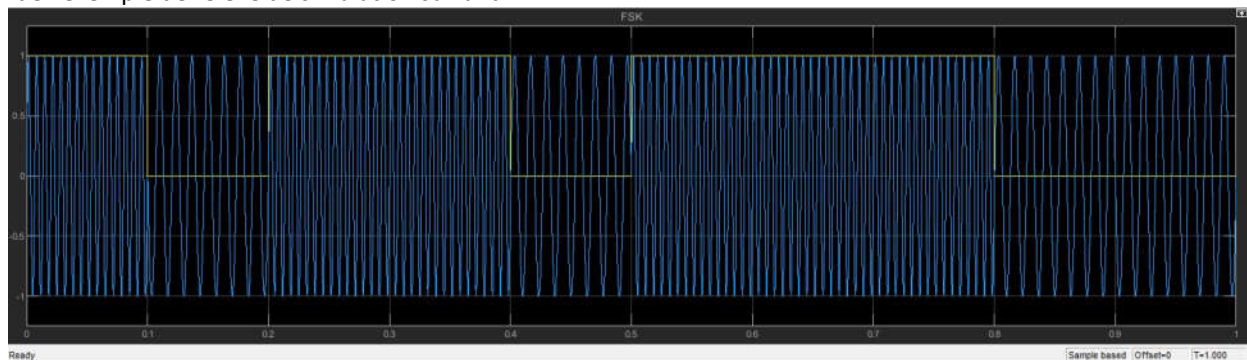
Rappel de cours :

Dans ce type de modulation, la fréquence du signal modulé (ici désignée par le repère FSK) peut prendre 2 valeurs

$f_0 = f_p$: Fréquence de la porteuse pour la transmission d'un 0 binaire

$f_1 = 2 \times f_p$: Fréquence de la porteuse pour la transmission d'un 1 binaire

A partir de l'exemple de relevé de simulation suivant :



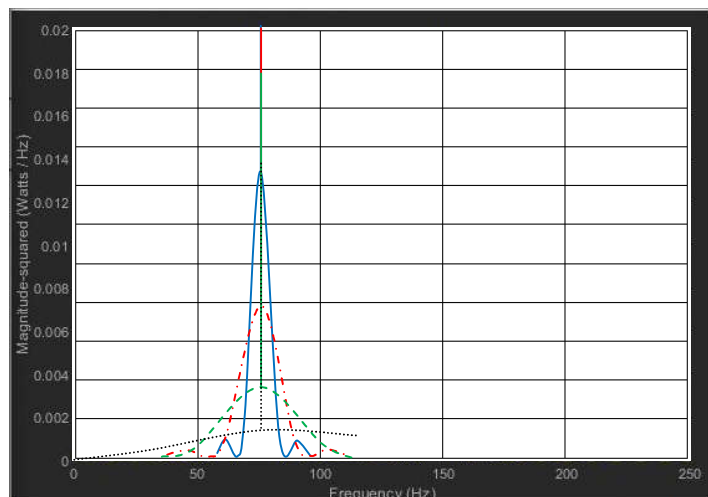
5a- Déterminer le débit binaire (en bps), les fréquences f_0 et f_1 (en Hz).

5b- Compléter ci-contre à main levée l'allure du spectre de fréquence attendu pour un débit binaire de 10 bps (trait continu bleu).

5c- Repérer les allures de spectre dont les débits binaires sont de 20 bps, 40 bps puis 100 bps.

5d- Du point de vue puissance d'émission, l'aire sous la courbe enveloppe de puissance est visiblement constante ou variable ?

5e- Ouvrir le fichier **ModulationFSK.slx** et vérifier les réponses proposées aux questions précédentes.



La modulation FSK offre une meilleure immunité au bruit que la modulation ASK (pour les raisons évoquées précédemment). Le taux d'erreur binaire est donc meilleur.

Il n'y a pas de risque de perte de synchronisation au niveau du récepteur en raison de la présence de raies discrètes pour le 0 et 1 binaire.

La modulation FSK offre également une bonne efficacité énergétique ceci au détriment d'une faible efficacité spectrale. En effet, l'optimisation de la bande passante est loin d'être parfaite car plus le débit binaire augmente et plus l'étalement du spectre nuit à une meilleure densité d'occupation pour une largeur donnée.

Pour palier ce manque d'efficacité spectrale, il existe la MSK (variante de la FSK) qui permet de minimiser la largeur du spectre.

6- MODULATION - DEMODULATION FSK (sans et avec Bruit) (A venir !!!)