

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة سعد دحلب البلدية  
UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA



كلية الهندسة – دائرة الطيران  
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR  
DEPARTEMENT D'AERONAUTIQUE

**MEMOIRE DE  
PROJET DE FIN D'ETUDES  
POUR L'OBTENTION DU DIPLOME  
D'INGENIEUR D'ETAT EN AERONAUTIQUE  
OPTION : INSTALLATION**

**ETUDE COMPARATIVE ET SIMULATION SOUS  
SIMULINK D'UNE MODULATION/DEMODULATION  
M-QAM ET M-PSK  
APPLICATION AUX MODEMS ADSL**

**PRÉSENTÉ PAR :** *LAIEB Amine*

*MADJOUR Hamoud*

**SESSION :** *JUIN 2009/2010*

**ENCADRÉ PAR :** *Mr. HELLAL Mahmoud*

**ملخص:**

النماذج الحاسوبية لنظم الاتصالات هي وسيلة فعالة لتسليط الضوء على الأداءات والتحديات الرئيسية لتصميمها. من خلال الاستفادة من المكتبات ، وأداة المحاكاة مثل السيميلينك يمكن للغاية تمثيل سلاسل نقل المعلومات ، على سبيل المثال ، لتحليل الأداء من حيث نسبة الخطأ، وهكذا قمنا بتحليل ومحاكاة لنموذجين من خطوط نقل المعلومات، باستعمال نوعين من التضمين (تضمين التربيعي لمدى الإشارة ) و (التضمين بنقل الطور).

**Résumé :**

La modélisation informatique de systèmes de communications est un moyen efficace et rapide pour mettre en lumière les performances et les principales difficultés de conception de ces derniers. En se servant de bibliothèques, un outil de simulation comme Simulink permet de modéliser de façon très pédagogique des chaînes de transmissions, pour en analyser par exemple les performances en termes de taux d'erreur binaire (**TEB**). C'est ainsi que nous avons analysé et simulé deux modèles de chaînes la transmission à savoir la **M-QAM** et **M-PSK**.

**Summary:**

Computer modeling of communication systems is a fast and effective way to highlight performance and the main difficulties in designing them. By making use of libraries, a simulation tool like Simulink can model very pedagogical transmission chains, for example, to analyze the performance in terms of bit error rate (**BER**). Thus, we analyzed and simulated two models of transmission lines namely **M-QAM** and **M-PSK**.

\*\*\*\*\*

## REMERCIEMENTS

\*\*\*\*\*

*Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet de fin d'études, au  
Département D'Aéronautique De Blida*

*Premièrement et avant tout Dieu merci de nous avoir donné foi,  
force et santé pour lire écrire et produire.*

*Ensuite un remerciement particulier à des gens particuliers je veux  
bien sur parler de nos parents qui n'ont cessé de nous soutenir tout  
au long de notre cursus.*

*On exprime notre profonde gratitude à l'ensemble des enseignants  
qui ont contribué à assurer notre formation et qui ont contribué de  
près ou de loin à achever ce travail.*

*Un merci particulier à monsieur HÉLAL. M notre promoteur.*

*Et enfin, à tous nos collègues de la promotion d'ingénieur 2010  
pour tous les moments de joie et de bonheur.*

*Laieb Amine  
Madjour Hamoud  
Installation 2010*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail  
À mes très chers parents en signe de  
reconnaissance pour tous les sacrifices  
consentis à mon égard, et encouragements tout  
au long de mes études.*

*À mes frères et ma sœur, et à toute ma famille.*

*À mes proches HAMZA, FAYCAL, BILAL,  
HASSEN, AMINE, ALILO, KAMEL,  
ZOHIR,*

*SAMIRA, LEILA, SOUMIA...*

*À toutes les DOUWISTE chacun par son  
nom.*



*MADJOUR Hamoud*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail  
À mes très chers parents en signe de  
reconnaissance pour tous les sacrifices  
consentis à mon égard, et encouragements tout  
au long de mes études.*

*À mon frère et mes sœurs, et à toute ma  
famille.*

*À mes proches KHIRO, MOHAMED,  
BRAHIM, HICHAM, OTHMANE ...*

*Spécialement à la chère SABRINE.*

*À toutes mes amis chacun par son nom.*



*LAIEB Amine*



# SOMMAIRE

<b>INTRDUCTION GENERALE</b> .....	1
<b>I. CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA MODULATION NUMERIQUE.</b>	
I.1 INTRODUCTION :.....	2
I.2 RAPPELS ET DEFINITIONS DE BASE :.....	3
I.3 LA MODULATION NUMERIQUE :.....	3
I.4 INTERET DE LA MODULATION :.....	4
I.5 DEFINITIONS ET APPELLATIONS :.....	5
I.6 PRINCIPE DE LA MODULATION NUMERIQUE :.....	6
I.7 LES CRITERES DE CHOIX D'UNE MODULATION :.....	9
I.8 LA MODULATION ELEMENTAIRE :.....	10
I.9 LA MODULATION COMPLEXE :.....	10
I.10 LES SYSTEMES DE MODULATION :.....	10
I.11 LE MULTIPLEXAGE :.....	11
I.12 LE CODAGE :.....	11
I.13 CONCLUSION :.....	11
<b>II. CHAPITRE II : LA MODULATION D'AMPLITUDE EN QUADRATURE (QAM).</b>	
II.1 INTRODUCTION :.....	12
II.2 LA MODULATION D'AMPLITUDE EN QUADRATURE :.....	12
II.3 QUELQUE PROPRIETES DE LA QAM :.....	14
II.3.1 L'efficacité spectrale de la QAM :.....	14
II.3.2 La densité spectrale de puissance des constellations QAM :.....	14
II.3.3 La bande passante :.....	14
II.4 PRINCIPE DE LA MODULATION D'AMPLITUDE EN QUADRATURE :.....	15
II.5 LES CONSTELLATIONS M-QAM :.....	18
II.6 MODULATION ET DEMODULATION DE LA QAM :.....	19
II.7 « QAM » EST UNE GENERALISATION DE LA MDP ET LA MDA :.....	21
II.8 LA PROBABILITE D'ERREUR PAR SYMBOLE :.....	22
II.9 APPLICATION DE LA MODULATION D'AMPLITUDE EN QUADRATURE :.....	23
II.10 CONCLUSION :.....	24
<b>III. CHAPITRE III : SIMULATION SOUS MATLAB/SIMULINK.</b>	
III.1 INTRODUCTION :.....	25
III.2 STRUCTURE DU MATLAB/SIMULINK :.....	25
III.3 PRESENTATION DU SIMULINK :.....	26
III.3.1 Pour démarrer Simulink :.....	26
III.3.2 Explorateur de la bibliothèque Simulink:.....	28
III.3.3 Création d'un nouveau modèle :.....	29
III.3.4 Les compartiments utilisés dans le modèle à simuler :.....	29

III.3.4.1 « Sources » :.....	29
III.3.4.2 « Sinks » :.....	30
III.4 MISE EN ŒUVRE SOUS MATLAB/SIMULINK :.....	30
III.4.1 Le modèle simulink M-QAM :.....	30
III.4.1.1 Le bloc « Random Integer Generator »:.....	32
III.4.1.2 Le modulateur Rectangular M-QAM en bande de base :.....	33
III.4.1.3 Le canal de transmission «AWGN» :.....	35
III.4.1.4 Le démodulateur Rectangular M-QAM en bande de base .....	36
III.4.1.5 Le bloc «Error rate calculation» :.....	37
III.4.1.6 Les blocs d’affichage :.....	38
III.4.2 Le modèle simulink M-PSK :.....	44
III.4.2.1 Le bloc «M-PSK Modulator Baseband» :.....	46
III.4.2.2 Le bloc «M-PSK Demodulator Baseband» :.....	47
III.5 CONCLUSION :.....	48
<b>IV. CHAPITRE IV: DISCUSSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS.</b>	
IV.1 INTRODUCTION :.....	49
IV.2 CAHIER DE CHARGES :.....	49
IV.3 CONFIGURATION DES BLOCS :.....	50
IV.4 FIGURES ET RESULTATS DE LA SIMULATION :.....	50
IV.4.1 Simulation M-QAM.....	50
IV.4.1.1 La 16-QAM.....	50
IV.4.1.2 La 31-QAM.....	53
IV.4.1.3 La 64-QAM.....	55
IV.4.2 Simulation M-PSK.....	57
IV.4.2.1 La 16-PSK.....	57
IV.4.2.2 La 32-PSK.....	59
IV.4.2.3 La 64-PSK.....	60
IV.4.3 Diagramme de l’œil.....	62
IV.4.4 Les visualisations XY.....	62
IV.4.5 Signal de sortie.....	63
IV.5 COMPARAISON DES RESULTATS :.....	64
IV.5.1 L’efficacité spectrale :.....	64
IV.5.2 Le taux d’erreur par bit :.....	65
IV.5.3 Interprétation des figures de constellations :.....	68
IV.6 CONCLUSION :.....	70
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>71</b>

## *LISTES DES TABLEAUX*

*Tableau II.1 : Le gain en débit binaire et en efficacité spectrale.*

*Tableau II.2 : Table de correspondance.*

*Tableau III.1 : Description des compartiments.*

*Tableau IV.1 : résultats des taux d'erreurs binaires pour un SNR de 10 dB.*

*Tableau IV.2: résultats des taux d'erreurs binaires pour un SNR de 30 dB.*

## LISTES DES FIGURES

- Figure I.1 : *Les caractéristiques d'un signal.*
- Figure I.2 : *Schéma d'un système de transmission numérique.*
- Figure I.3 : *Les différents types de modulation.*
- Figure I.4 : *Forme générale d'un modulateur.*
- Figure I.5 : *Position d'un symbole dans le plan de Fresnel.*
- Figure I.6 : *Définition d'une constellation numérique.*
- Figure I.7 : *multiplexage et démultiplexage.*
- Figure II.1 : *représentation des deux sous-porteuses avec la résultante.*
- Figure II.2 : *la bande passante à -3 dB.*
- Figure II.3 : *Schéma synoptique d'un modulateur en quadrature.*
- Figure II.4 : *Exemple de codage.*
- Figure II.5 : *La constellation de points.*
- Figure II.6 : *représentation vectorielle d'un point.*
- Figure II.7 : *représentation d'un seul quadrant.*
- Figure II.8 : *présentation de deux types de constellation.*
- Figure II.9 : *La constellation de la 16-QAM et de la 64-QAM.*
- Figure II.10 : *La constellation de la 32-QAM et de la 128-QAM.*
- Figure II.11 : *Modulateur M-QAM.*
- Figure II.12 : *Démodulateur M-QAM.*
- Figure II.13 : *train binaire avec la trame symbole.*
- Figure II.14 : *Constellation de la MDAP-16.*
- Figure III.1 : *La fenêtre de commande du MATLAB.*
- Figure III.2 : *accès à la bibliothèque du simulink.*
- Figure III.3 : *la bibliothèque Simulink.*
- Figure III.4 : *un nouveau modèle Simulink.*
- Figure III.5 : *Le modèle simulink d'une transmission numérique M-QAM.*
- Figure III.6 : *Le bloc « Random Integer Generator ».*
- Figure III.7 : *boîte de dialogue de bloc générateur des nombres entiers aléatoires.*
- Figure III.8 : *la forme du signal d'entrée (source d'information).*
- Figure III.9 : *le modulateur rectangulaire M-QAM en bande de base.*

- Figure III.10 : *paramètre et boîte de dialogue d'un modulateur QAM.*
- Figure III.11 : *Canal de transmission « AWGN channel ».*
- Figure III.12 : *La fenêtre de paramètres et boîte de dialogue du bloc « AWGN Channel ».*
- Figure III.13 : *Le bloc "Rectangular QAM Demodulator Baseband".*
- Figure III.14 : *Boîte de dialogue de bloc Rectangular QAM Demodulator Baseband.*
- Figure III.15 : *Le bloc « Error rate calculation ».*
- Figure III.16 : *fenêtre de paramètres et boîte de dialogue de bloc de calcul de taux d'erreur.*
- Figure III.17 : *calculateur des erreurs.*
- Figure III.18 : *le bloc "Power Spectral Density".*
- Figure III.19 : *La fenêtre de paramètres et boîte de dialogue.*
- Figure III.20 : *Le bloc d'affichage « XY Graph »*
- Figure III.21 : *fenêtre de Paramètre et boîte de dialogue d'un « XY Graphe ».*
- Figure III.22 : *le bloc d'affichage «Discrete-Time Eye Diagram Scope».*
- Figure III.23 : *fenêtre de paramètre et boîte de dialogue de" Discrete-Time Eye Diagram Scope".*
- Figure III.24 : *le bloc d'affichage «Display».*
- Figure III.25 : *La fenêtre de paramètre et boîte de dialogue du bloc « Display ».*
- Figure III.26 : *Le bloc « Scope ».*
- Figure III.27 : *la fenêtre du « Scope ».*
- Figure III.28 : *boîte de dialogue de propriétés des axes.*
- Figure III.29 : *onglet permettant d'ajuster les paramètres du « Scope ».*
- Figure III.30 : *onglet permettant d'ajuster les paramètres du « Scope ».*
- Figure III.31 : *le model simulink pour la modulation M-PSK.*
- Figure III.32 : *le démodulateur rectangulaire QAM en bande de base.*
- Figure III.33 : *fenêtre de paramètre et boîte de dialogue.*
- Figure III.34 : *le bloc « Demodulator Baseband ».*
- Figure III.35 : *fenêtre de paramètre et boîte de dialogue.*
- Figure IV.1 : *les modulations QAM utilisés par les modems ADSL.*
- Figure IV.2 : *forme du signal à moduler.*
- Figure IV.3 : *La densité spectrale de puissance avant et après la modulation.*
- Figure IV.4 : *constellations des points du signal modulé.*
- Figure IV.5 : *Affichage de TEB pour la 16-QAM à 10 dB.*
- Figure IV.6 : *Affichage de TEB pour la 16-QAM à 10 dB.*
- Figure IV.7 : *forme du signal à moduler (l'information).*
- Figure IV.8 : *La densité spectrale de puissance avant et après la modulation.*
- Figure IV.9 : *les constellations des points du signal modulé pour la 32-QAM.*

- Figure IV.10 : *Affichage de taux d'erreur binaire à 10 dB et à 30 dB pour la 32-QAM.*
- Figure IV.11 : *Forme du signal d'entrée pour la 64-QAM.*
- Figure IV.12 : *Les constellations des points du signal modulé pour la 64-QAM.*
- Figure IV.13 : *Affichage du TEB pour un SNR de 10 dB.*
- Figure IV.14 : *Affichage du TEB pour un SNR de 30 dB.*
- Figure IV.15 : *La constellation des points pour la 16-PSK.*
- Figure IV.16 : *La densité spectrale de puissance de la 16-PSK pour un SNR de 10dB et 30dB.*
- Figure IV.17 : *Affichage de  $TEB_{10dB}$  et  $TEB_{30dB}$ .*
- Figure IV.18 : *La constellation des points pour la 32-PSK dans les deux cas du SNR.*
- Figure IV.19 : *La densité spectrale de puissance de la 32-PSK pour un SNR de 10dB et 30dB.*
- Figure IV.20 : *Affichage de TEB pour la 32-PSK.*
- Figure IV.21 : *Les constellations des points à l'émission et à la réception pour la 64-PSK.*
- Figure IV.22 : *La densité spectrale de puissance.*
- Figure IV.23 : *Affichage de taux d'erreur par Bit pour la 64-PSK.*
- Figure IV.24 : *Diagramme de l'œil.*
- Figure IV.25 : *le diagramme vectoriel pour le signal d'entrée de la 16-QAM et de la 16-PSK.*
- Figure IV.26 : *le diagramme vectoriel pour le signal d'entrée de la 16-QAM et de la 16-PSK.*
- Figure IV.27 : *le signal d'entrée et de sortie.*
- Figure IV.28 : *Fenêtre de configuration du TEB.*
- Figure IV.29 : *Trace de la courbe TEB pour les différents types de modulation utilisés.*
- Figure IV.30 : *Présence de bruit.*
- Figure IV.31 : *constellation 64-PSK bruité.*
- Figure IV.32 : *la constellation 32-QAM.*

## *ABBREVIATIONS*

**ADSL** : Asymmetric Digital Subscriber line  
**Wi-Fi** : Wireless Fidelity  
**DECT** : Digital Enhanced Cordless Telecommunications  
**UWB** : Ultra Wide Band  
**GSM** : Global System for Mobile  
**EDGE** : Enhanced Data rates for GSM Evolution  
**UMTS** : Universal Mobil Telecommunications System  
**P<sub>e</sub>**: Probabilité D'erreur  
**TEB**: Taux D'erreur Binaire  
**MDA**: Modulation par Déplacement D'amplitude  
**MDP**: Modulation par Déplacement de Fréquence  
**MDPD**: Modulation par Déplacement de Phase et de Fréquence  
**QAM**: Quadrature Amplitude Modulation  
**ASK**: Amplitude Shift Keying  
**PSK**: Phase Shift Keying  
**AFSK**: Amplitude Frequency Shift Keying  
**AFSK-PM**: Amplitude Frequency Shift Keying – Phase Modulation  
**rect**: Rectangulaire  
**OS**: Occupation Spectrale  
**QPSK**: Quadrature Phase Shift Keying  
**PSD**: Densité Spectrale de Puissance  
**PAM**: pulse amplitude modulation  
**BP**: Bande Passante  
**MDAP**: Modulation par Déplacement D'amplitude et de Phase  
**erfc**: La fonction d'erreur complémentaire  
**P<sub>s</sub>**: probabilité d'erreur par symbole  
**MATLAB**: MATrix-LABoratory  
**SER**: taux d'erreur par symbole  
**SNR**: signal-to- noise ratio  
**BER**: taux d'erreur par bit  
**D<sub>b</sub>**: débit binaire  
**D<sub>spé</sub>**: débit spécifique  
**N<sub>e</sub>**: Nombre de bits erronés  
**AWGN**: Additive White Gaussian Noise

★★★★★★ *INTRODUCTION* ★★★★★★★

De nos jours, les systèmes de transmission numériques qui emploient des techniques diverses pour transporter l'information sont devenues les éléments de base de la communication.

Ces techniques sont utilisées dans notre quotidien et connaissent un développement remarquable à savoir celles utilisées dans les fibres optiques, les transmissions satellitaire, les modems à haut débit. Les systèmes modernes de communication numérique sont complexes et requièrent des circuits de modulation et de démodulation de plus en plus sophistiqués. Ces technologies s'orientent vers l'amélioration des performances d'une transmission numérique, en employant des techniques de modulation de manière à optimiser le taux de transmission (bits/sec) tout en minimisant la largeur de bande du signal modulé ainsi que le taux d'erreurs et évidemment, le prix du système. Tout un contrat, où des compromis seront nécessaires.

Les techniques de modulation numérique linéaire (M-QAM, M-PSK, etc.) sont utilisées dans les nouvelles générations de systèmes de communications, car elles sont plus appropriées pour réduire l'occupation spectrale (c.-à-d. caractérisées par une meilleure efficacité spectrale) et satisfaire les besoins en débits de communication.

Avec le développement de logiciels de simulation tel Simulink, il est maintenant facile de simuler une chaîne de transmission complète réaliste: émission - canal de transmission - réception. Nous avons fait le choix de développer notre mémoire avec les logiciels MATLAB et Simulink, associés aux toolbox "Communications system".

Pour optimiser et améliorer la qualité de transmission (rapport signal sur bruit  $S/N$ , interférence entre symboles, puissances d'émission, débits) sur un canal radioélectrique, plusieurs techniques de modulation, de codage, et d'utilisation de spectre sont utilisées, telles les modulations QAM (quadrature ) et PSK (*Phase Shift Keying*).

L'objectif de notre projet est de faire une étude comparative avec ces deux types de simulation à savoir une modulation/démodulation M-QAM et M-PSK en utilisant le logiciel Simulink. Nous avons appliqué notre simulation aux modems ADSL, tout en essayant de voir l'influence du changement des paramètres d'entrée sur la qualité de transmission et de l'information récupérer.

Pour cela nous avons élaboré le plan de travail suivant, en commençant par une introduction suivi de quatre chapitres et nous terminerons par une conclusion générale.

Les quatre chapitres sont :

- ❖ Le premier chapitre aura pour but de donner une vue générale sur la modulation numérique.
- ❖ Le deuxième chapitre est consacré à définir la modulation d'amplitude en quadrature et à donner les différents types utilisés pour la QAM.
- ❖ Le troisième chapitre présente la partie la plus importante de notre projet, utilisation du logiciel simulink pour simuler et comparer plusieurs types de modulations.
- ❖ Le dernier chapitre est la comparaison entre la M-QAM et la M-PSK et discussion des résultats avec l'interprétation des figures.

## I.1 INTRODUCTION :

Les temps ont beaucoup changé depuis l'invention du code morse ou du téléphone. Les capacités et la disponibilité des systèmes de télécommunications font exploser leur utilisation: accès Internet haut débit (ADSL, câble), communication sans fil et mobiles (DECT, Bluetooth, Wi-Fi, UWB) et mobiles (GSM, EDGE, UMTS), transmission satellitaires, télévision numérique terrestre, ...). Cette révolution de la société de l'information est due à l'avènement du numérique. La conception d'un système de communications numériques complet nécessite aujourd'hui des compétences multiples : électronique et microélectronique (Radiofréquences, architectures matérielle), antennes (physique et propagation), réseaux (informatique, protocoles et systèmes distribués), théorie de l'information et codage, ...La multiplicité des supports de transmission et des perturbations associées (bruit, échos, affaiblissement et trajets multiples,...) forment le canal de transmission. Toutes les composantes d'une chaîne de transmission numérique s'articulent autour de la mise en forme de l'information sur ce canal physique et de sa récupération par le(s) destinataire(s).

La modulation et la démodulation sont une étape dans la communication d'une information entre deux utilisateurs. Par exemple, pour faire communiquer deux utilisateurs de courriers par une ligne téléphonique, des logiciels, un ordinateur, des protocoles, un modulateur et un démodulateur sont nécessaires. La ligne téléphonique est le canal de transmission, sa bande passante est réduite, il est affecté d'atténuation et de distorsions. La modulation convertit les informations binaires issues des protocoles et des logiciels, en tension et courant dans la ligne. Le type de modulation employé doit être adapté d'une part au signal (dans ce cas numérique), aux performances demandées (taux d'erreur), et aux caractéristiques de la ligne.

Tout signal transportant une information doit passer par un moyen de transmission entre l'émetteur et le récepteur. Une fois élaboré, le signal est rarement adapté à la transmission directe par le moyen choisi. Il faut le modifier avant de commencer sa transmission.

Le but des modulations numériques est d'assurer un débit maximum de données binaires, avec un taux d'erreur acceptable par les protocoles et correcteurs amont et aval. Dans l'empilement des protocoles OSI (architecture standard des télécommunications numériques), la modulation est l'élément principal de la couche physique.

Le terme « **bande de base** » signifie que le signal est transmis sur le canal sans l'opération de modulation qui translate (éventuellement en le modifiant) le spectre du signal pour le centrer sur une fréquence porteuse  $f_0$ . Autrement dit, la fréquence porteuse d'une transmission en bande de base est la fréquence zéro.

Nous allons présenter dans un autre chapitre les principaux types de modulations et donner leurs performances.

## I.2 RAPPELS ET DEFINITIONS DE BASE:

Un signal est :

- Une fonction du temps :  $x(t)$
- Une fonction de fréquences  $X(f)$  définie sur le spectre de fréquence du signal (c'est-à-dire; l'intervalle de fréquences où est concentrée la puissance du signal).

Un signal périodique (*figure I.1*)  $S(t) = A \sin(2\pi f t + \phi)$  est caractérisé par :

Son amplitude  $A$ , sa fréquence  $f = 1 / T$  (période  $T$ : nombre de cycles par seconde), et sa phase  $\phi$ .

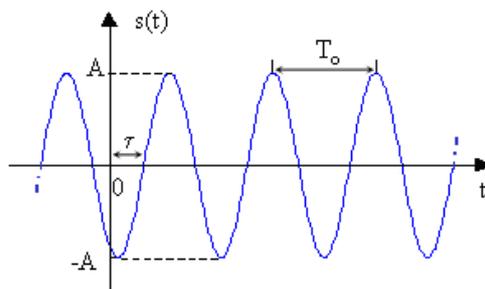


Figure I.1 : Les caractéristiques d'un signal

C'est sur ces trois valeurs que va intervenir le traitement du signal.

## I.3 LA MODULATION NUMERIQUE:

Les systèmes de transmission numérique véhiculent de l'information entre une source et un destinataire en utilisant un support physique comme le câble, la fibre optique ou encore, la propagation sur un canal radioélectrique. Les signaux transportés peuvent être soit directement d'origine numérique, comme dans les réseaux de données, soit d'origine analogique (parole, image...) mais convertis sous une forme numérique. La tâche du système de transmission est d'acheminer l'information de la source vers le destinataire avec le plus de fiabilité possible.

*Le schéma synoptique d'un système de transmission numérique est donné à la figure I.1 où l'on se limite aux fonctions de base :*

- La source émet un message numérique sous la forme d'une suite d'éléments binaires.
- Le codeur peut éventuellement supprimer des éléments binaires non significatifs (*compression de données ou codage de source*), ou au contraire introduire de la redondance dans l'information en vue de la protéger contre le bruit et les perturbations présentes sur le canal de transmission (*codage de canal*). Le codage de canal n'est possible que si le débit de source est inférieure à la capacité du canal de transmission (*la probabilité d'erreur  $P_e$  tend dans ce cas vers 0 d'après les travaux de Hartley - Shannon*).
- La modulation a pour rôle d'adapter le spectre du signal au canal (*milieu physique*) sur lequel il sera émis.
- Enfin, du côté récepteur, les fonctions de démodulation et de décodage sont les inverses respectifs des fonctions de modulation et de codage situées du côté émetteur.

Les trois caractéristiques principales permettant de comparer entre elles les différentes techniques de transmission sont les suivantes:

- La probabilité d'erreur **Pe** par bit transmis permet d'évaluer la qualité d'un système de transmission. Elle est fonction de la technique de transmission utilisée, mais aussi du canal sur lequel le signal est transmis. Il est à noter que **Pe** est une valeur théorique dont une estimation non biaisée au sens statistique est le Taux d'Erreur par Bit **TEB**.
- L'occupation spectrale du signal émis doit être connue pour utiliser efficacement la bande passante du canal de transmission. On est contraint d'utiliser de plus en plus des modulations à grande efficacité spectrale.
- La complexité du récepteur dont la fonction est de restituer le signal émis est le troisième aspect important d'un système de transmission (figure I.2).

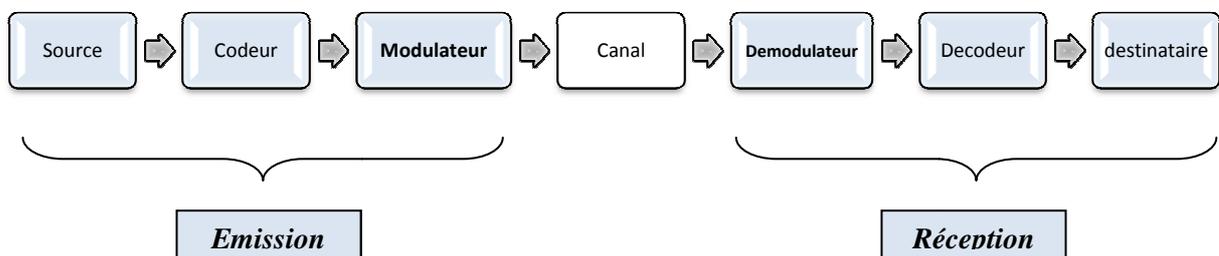


Figure I.2 : Schéma d'un système de transmission numérique

#### I.4 INTERET DE LA MODULATION :

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.

Supposons que l'on veuille transmettre un signal sonore audible. Il encombrerait une plage de fréquences s'étendant de 50 Hz à 20 kHz. La transmission directe de ce signal, par ondes hertziennes, est impossible car :

- il serait impossible, à la réception, de distinguer ce signal de tous les autres occupant la même plage de fréquences.
- Les dimensions des antennes sont grandes d'environ une longueur d'onde du signal. Celle-ci atteindrait alors des dimensions prohibitives.

Pour un signal de fréquence 20 kHz: la longueur de l'antenne serait d'au moins

$$\lambda = c \cdot T = c/f = (3 \cdot 10^8)/(10^4) = 30 \text{ Km} \quad (1)$$

Où  $c$  est la vitesse de la lumière - célérité.

$T$ ,  $f$  et  $\lambda$  sont respectivement la période, la fréquence et la longueur d'onde.

Même s'il était possible de construire l'antenne, étant donné que, dans notre cas, la fréquence du signal varie sur une large plage de fréquences, l'antenne ne serait pas adaptée.

L'intérêt de la modulation réside donc dans la possibilité d'avoir un signal aisément discernable et qui se propage correctement.

### I.5 DEFINITIONS ET APPELLATIONS :

Nous citons ici quelques définitions des paramètres utilisés dans notre étude :

- *Un symbole* est un élément d'un alphabet. Si  $M$  est la taille de l'alphabet, le symbole est alors dit  $M$ -aire. Lorsque  $M=2$ , le symbole est dit binaire. En groupant, sous forme d'un bloc,  $n$  symboles binaires indépendants, on obtient un alphabet de  $M=2^n$  symboles  $M$ -aire. Ainsi un symbole  $M$ -aire véhicule l'équivalent de  $n=\log_2 M$  bits.

- *La rapidité de modulation  $R$*  se définit comme étant le nombre de changements d'états par seconde d'un ou de plusieurs paramètres modifiés simultanément. Un changement de phase du signal porteur, une excursion de fréquence ou une variation d'amplitude sont par définition des changements d'états.

La "rapidité de modulation"  $R=1/T_b$  s'exprime en "bauds".

- *Le débit binaire  $D$*  se définit comme étant le nombre de bits transmis par seconde. Il sera égal ou supérieur à la rapidité de modulation selon qu'un changement d'état représentera un bit ou un groupement de bits.

Le "débit binaire"  $D=1/T_b$  s'exprime en "bits par seconde".

Pour un alphabet  $M$ -aire, on a la relation fondamentale :  $T = n.T_b$  soit  $D = n R$ .

Il y a égalité entre débit de source et rapidité de modulation uniquement dans le cas d'une source binaire (alphabet binaire).

La qualité d'une liaison est liée au *taux d'erreur par bit* :

$$TEB = \frac{\text{nombre de bits faux}}{\text{nombre de bits total}} \quad (2)$$

On notera la différence entre  $P_e$  et  $TEB$ . Au sens statistique, on a  $P_e = E(TEB)$ .  $TEB$  tend vers  $P_e$  si le nombre de bits transmis tend vers l'infini.

- *L'efficacité spectrale* d'une modulation se définit par le paramètre  $\eta$ .

Tel que :

$$\eta = \frac{D}{B} \text{ [bit/sec/Hz]} \quad (3)$$

La valeur  $D$  est le "débit binaire" et  $B$  est la largeur de la bande occupée par le signal modulé.

Pour un signal utilisant des symboles  $M$ -aire, on aura :

$$\eta = \frac{1}{T_b B} \log_2 M \text{ [bit/sec/Hz]} \quad (4)$$

Remarquons que pour  $B$  et  $T$  donnés, l'efficacité spectrale augmente, comme on pouvait s'y attendre, avec le nombre de bit/symbole  $n = \log_2 M$ . C'est en effet la raison d'être de la modulation  $M$ -aire.

La qualité d'une transmission sera définie par le rapport signal sur bruit, Ce rapport peut être également donné en dB.

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{\text{Puissance du signal}}{\text{Puissance du bruit}} \right) \quad [dB] \quad (5)$$

## I.6 PRINCIPE DE LA MODULATION NUMERIQUE :

Le signal se présente sous la forme d'une onde de base régulière :

$$\text{Porteuse } p(t) = A_p \cos(2\pi f_p t + \Phi_p)$$

On fait subir des déformations (ou modulations) à cette porteuse pour distinguer les éléments du message.

Un grand nombre de méthodes différentes (*Figure I.3*) permettent de moduler un signal, mais seuls trois éléments de base du signal sont modifiables dans le temps : l'amplitude, la phase ou la fréquence (la phase et la fréquence n'étant en réalité que deux façons différentes de visualiser ou de mesurer la même variation du signal).

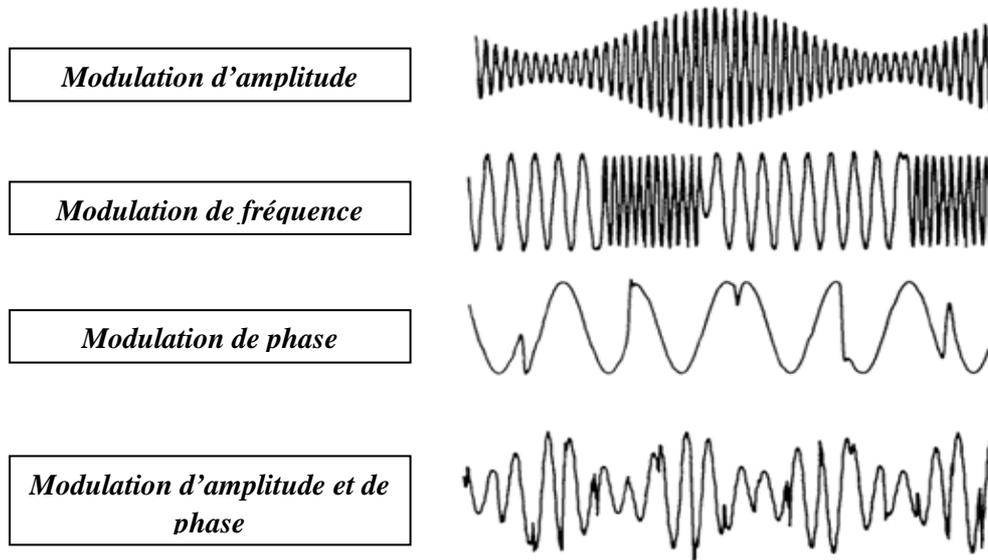


Figure I.3– Les différents types de modulation

Dans les procédés de modulation binaire, l'information est transmise à l'aide d'un paramètre qui ne prend que deux valeurs possibles.

Dans les procédés de modulation M-aire, l'information est transmise à l'aide d'un paramètre qui prend M valeurs. Ceci permet d'associer à un état de modulation un mot de n digits binaires. Le nombre d'états est donc  $M = 2^n$ . Ces n digits proviennent du découpage en paquets de n digits du train binaire issu du codeur.

Les types de modulation les plus fréquemment rencontrés sont les suivants :

- Modulation par Déplacement d'Amplitude MDA.
- Modulation par Déplacement de Phase MDP.
- Modulation par Déplacement de Phase Différentiel MDPD.
- Modulation d'amplitude de deux porteuses en quadrature (QAM).
- Modulation par Déplacement de Fréquence MDF.

Le message à transmettre est issu d'une source binaire. Le signal modulant, obtenu après codage, est un signal en bande de base, éventuellement complexe, qui s'écrit sous la forme :

$$C(t) = \sum_k c_k \cdot g(t - kT) = C_k(t) = \sum_k (a_k(t) + j b_k(t)) g(t - kT_s) \quad (6)$$

Avec

$$c_k = a_k + j b_k \quad (7)$$

La fonction  $g(t)$  est une forme d'onde qui est prise en considération dans l'intervalle  $[0, T[$  puisque  $t$  doit vérifier la relation :

$$KT \leq t < (K + 1)T \quad (8)$$

Dans les modulations MDA, MDP et QAM, la modulation transforme ce signal  $c(t)$  en un signal modulé  $m(t)$  tel que :

$$m(t) = \text{Re} \left[ \sum_k C(t) \cdot e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)} \right] \quad (9)$$

$$m(t) = \text{Re} [\sum_k a_k(t) + j b_k(t)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + j \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (10)$$

La fréquence  $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$  et la phase  $\varphi_0$  caractérisent la sinusoïde porteuse utilisée pour la modulation.

Si les  $C_k(t) = a_k(t) + j b_k(t)$  sont réels ( $b_k(t) = 0$ ), la modulation est dite unidimensionnelle, et s'ils sont complexes la modulation est dite bidimensionnelle.

Le signal modulé s'écrit aussi plus simplement :

$$m(t) = \sum_k a_k(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) - \sum_k b_k(t) \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (11)$$

Ou encore :

$$m(t) = a(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) - b(t) \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (12)$$

En posant :

$$a(t) = \sum_k a_k(t) \quad \text{et} \quad b(t) = \sum_k b_k(t) \quad (13)$$

Le signal  $a(t) = \sum_k a_k(t)$  module en amplitude la porteuse en phase  $\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$  et le signal  $b(t) = \sum_k b_k(t)$  module en amplitude la porteuse en quadrature  $\sin(\omega_0 t + \varphi_0)$ .

Dans la plupart des cas les signaux élémentaires  $a_k(t)$  et  $b_k(t)$  sont identiques à un coefficient près et ils utilisent la même forme d'impulsion  $g(t)$  appelée aussi "formant".

$$a_k(t) = a_k \cdot g(t - KT) \quad \text{et} \quad b_k(t) = b_k \cdot g(t - KT) \quad (14)$$

Les deux signaux  $a(t)$  et  $b(t)$  sont aussi appelés "trains modulants" et s'écrivent :

$$a_k(t) = \sum_k a_k \cdot g(t - KT) \quad \text{et} \quad b_k(t) = \sum_k b_k \cdot g(t - KT) \quad (15)$$

Les symboles  $a_k$  et  $b_k$  prennent respectivement leurs valeurs dans l'alphabet  $(A_1, A_2, \dots, A_M)$  et dans l'alphabet  $(B_1, B_2, \dots, B_M)$ .

Le schéma théorique du modulateur est représenté sur la (figure 1.4).

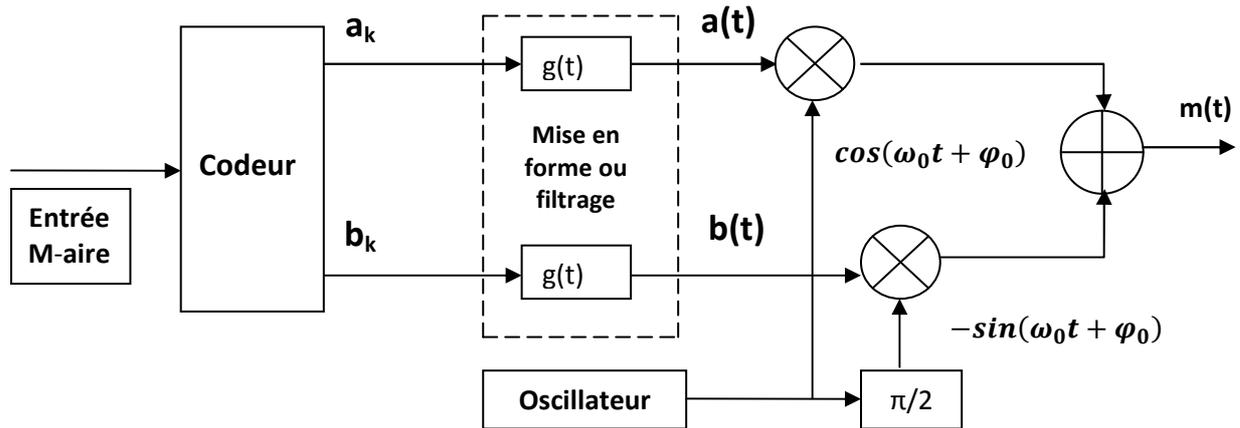


Figure 1.4 : Forme générale d'un modulateur

Les différents types de modulations sont définis par les alphabets décrits ici dessus et par la fonction  $g(t)$ .

A chaque symbole émis correspond un signal élémentaire de la forme :

$$m_k(t) = a_k \cdot g(t - KT) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) - b_k \cdot g(t - KT) \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (16)$$

Cette forme peut être représentés (figure 1.5) dans un espace à deux dimensions dont les vecteurs de base sont :

$g(t - KT)\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$  et  $-g(t - KT)\sin(\omega_0 t + \varphi_0)$  (Décomposition de Fresnel)

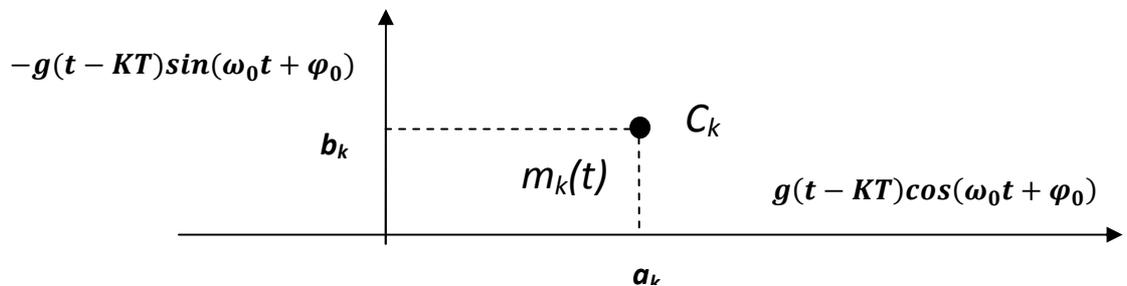


Figure 1.5 : Position d'un symbole dans le plan de Fresnel

Le signal modulé  $m(t)$  véhicule des informations distinctes à travers  $a_k(t)$  et  $b_k(t)$  qui sont deux signaux en bande de base appelés respectivement *composante en phase* (*I* en anglais) et *composante en quadrature* (*Q* en anglais). La récupération de  $a_k(t)$  et  $b_k(t)$  sera possible uniquement si ces deux signaux sont de bande limitée à l'intervalle  $[-B, B]$  avec  $B < f_0$  (Condition de Rayghley).

Une représentation dans le plan complexe qui fait correspondre à chaque signal élémentaire un point  $C_k = A_k + jB_k$  permet de différencier chaque type de modulation. L'ensemble de ces points associés aux symboles porte le nom de **constellation** (figure 1.6).

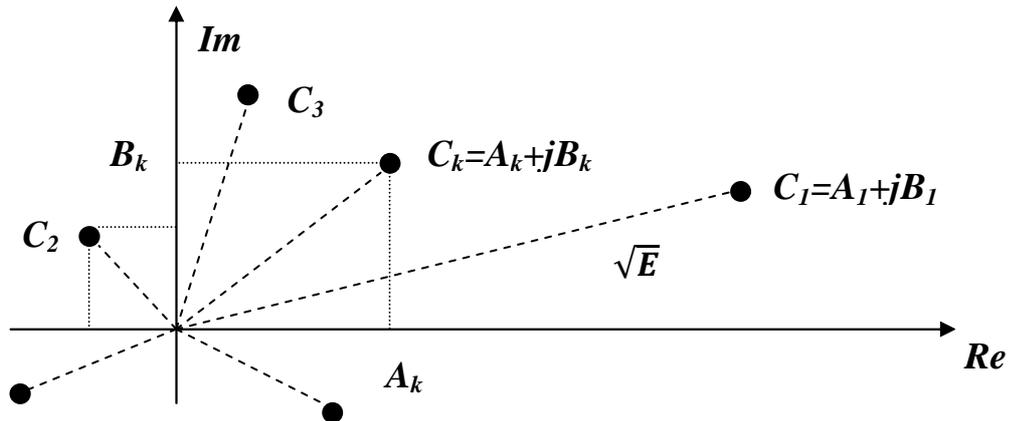


Figure 1.6 : Définition d'une constellation numérique

Le choix de la répartition des points dépend des critères suivants :

- Pour pouvoir distinguer deux symboles, il faut respecter une distance minimale  $d_{min}$ , entre les points représentatifs de ces symboles. Plus cette distance est grande et plus la probabilité d'erreur sera faible. La distance minimale entre tous les symboles est :

$$d_{min} = \text{Max}_{i \neq j} (d_{ij}) \quad (17)$$

Avec :

$$d_{ij} = |C_i - C_j|^2 \quad (18)$$

Ceci est à rapprocher avec la définition de la distance de Hamming.

- A chaque symbole émis correspond un signal élémentaires  $m_k(t)$  et par là même une énergie nécessaire à la transmission de ce symbole. Dans la constellation, la distance entre un point et l'origine est proportionnelle à la racine carrée de l'énergie qu'il faut fournir pendant l'intervalle de temps  $[kT, (k+1)T]$  pour émettre ce symbole.

La puissance moyenne d'émission des symboles est assimilable à  $\sum_i |C_i|^2$  et la puissance crête à  $\text{Max}_i |C_i|^2$ .

Les deux critères évoqués ci-dessus sont antagonistes puisque l'on serait tenté d'une part d'éloigner les symboles au maximum pour diminuer la probabilité d'erreur et d'autre part, de les rapprocher de l'origine pour minimiser l'énergie nécessaire à la transmission.

## I.7 LES CRITERES DE CHOIX D'UNE MODULATION :

Les critères de choix d'une modulation sont :

- ✓ La constellation qui suivant les applications mettra en évidence une faible énergie nécessaire à la transmission des symboles ou une faible probabilité d'erreur.
- ✓ L'occupation spectrale du signal modulé.
- ✓ La simplicité de réalisation (avec éventuellement une symétrie entre les points de la constellation).

En modulation numérique, les paramètres de la porteuse, amplitude ou angle (argument), sont commutés entre plusieurs valeurs discrètes selon les codes binaires à transmettre.

Dans la modulation numérique, on trouve deux types de modulations ; la modulation élémentaire, et la modulation complexe.

### **I.8 LA MODULATION ELEMENTAIRE :**

La modulation élémentaire en tout-ou-rien est une modulation d'une porteuse par un signal digital à deux niveaux, avec des symboles de durée variable. Elle est particulièrement adaptée à la reconnaissance auditive par un opérateur, en télégraphie.

En modulation d'amplitude (*ASK*), l'amplitude est commutée entre plusieurs valeurs discrètes, et en *FSK* ou *PSK* ce sont respectivement la fréquence ou la phase qui sont commutées.

Selon le nombre de niveaux possibles, on ajoutera un chiffre devant le code : ainsi un *8xPSK* correspond à la commutation entre 8 valeurs de phase, permettant de transmettre des mots de 3 bits (8 valeurs) à chaque temps de commutation.

### **I.9 LA MODULATION COMPLEXE :**

Des combinaisons plus complexes sont utilisées pour optimiser le débit vis à vis de la bande passante. Ainsi, la combinaison de deux modulations d'amplitude et de phase simultanées sur une même porteuse permet de doubler le débit binaire. Les appellations sont complexes et nombreuses combinant un chiffre du nombre d'état possibles et les lettres des modulations individuelles utilisées.

Des cas particuliers sont fréquemment utilisés pour certains avantages précis : ainsi le *MSK* ou *minimum shift keying* est une modulation numérique de fréquence d'indice de modulation précis et de largeur spectrale minimale.

Si une sous-porteuse est modulée puis module ensuite une porteuse, les appellations se compliquent encore : Ainsi *AFSK* est une modulation de fréquence d'une sous-porteuse. Une modulation *AFSK-PM* combine la modulation de phase d'une porteuse par une sous-porteuse modulée en fréquence.

### **I.10 SYSTEME DE MODULATION :**

Quand plusieurs informations ou signaux indépendants passent dans un même canal, en utilisant diverses modulations ou sous-porteuses, on parle de "système de modulation".

Ainsi en télévision, le son est transmis par la modulation d'amplitude d'une première porteuse, l'image par modulation d'amplitude à bande latérale réduite sur une porteuse principale, et la composante couleur par modulation de fréquence ou de phase d'une sous-porteuse.

Dans les systèmes de communication radio-mobiles, le choix du type de modulation et de démodulation doit tenir compte d'une part, de l'efficacité spectrale de la largeur de bande et de l'efficacité de puissance, et d'autre part, de la robustesse contre les distorsions et les interférences des signaux.

### I.11 LE MULTIPLEXAGE :

Le multiplexage est une transmission sur un lien unique (haut débit) de communications provenant de multiples voies d'entrée.

Le démultiplexage est la séparation de communications distinctes circulant sur un lien unique vers de multiples voies de sortie (*Figure I.7*).

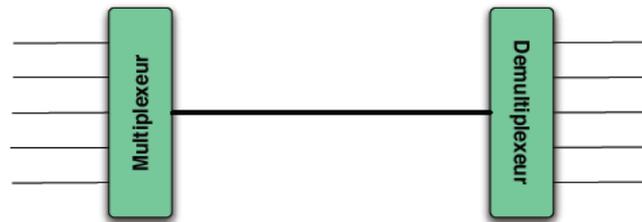


Figure I.7 : multiplexage et démultiplexage

### I.12 LE CODAGE :

La source d'information est le premier maillon de la chaîne de transmission. Elle fournit le message porteur de l'information. Le message peut être de nature analogique ou numérique et la source peut être représentée par une interface homme-machine ou machine-machine.

**Le codage source :** Le codage source consiste d'une part à convertir le message continu en une séquence numérique (utilisation d'un convertisseur analogique-numérique) et à transformer le message de la source en une séquence d'information de façon à :

- Minimiser la taille du message en éliminant les redondances naturelles de l'information source (algorithme de compression) ;
- Pouvoir retrouver le message original à partir de la séquence de substitution (algorithme réversible).

Le but de cette opération est d'optimiser les ressources nécessaires à la transmission (*temps, puissance, bande passante, etc.*).

**Le codage canal :** Le codage canal a pour rôle de protéger l'information émise contre les perturbations du canal de transmission susceptible de modifier son contenu. Il s'agit donc de rajouter de la redondance de manière à détecter et éventuellement corriger les erreurs lors de la réception si la stratégie adoptée le permet.

### I.13 CONCLUSION :

Les systèmes modernes de communication numérique sont complexes et requièrent des circuits de modulation et de démodulation de plus en plus sophistiqués. Il s'avère que le choix d'un type de modulation est toujours déterminé par les contraintes de l'application.

Le développement des transmissions numériques s'est appuyé sur les progrès rapides réalisés dans le domaine des circuits intégrés de traitement des signaux. Ainsi, l'utilisation de solutions intégrées devient indispensable au fur et à mesure que le niveau de complexité des systèmes s'accroît et que le prix consenti par le consommateur diminue.

## II.1 INTRODUCTION :

La modulation d'amplitude en quadrature M-QAM est devenue plus répandue dans les systèmes de transmission, en tant qu'une vidéo et modulation de données. Avec ses M bits par symbole numérique (M bits/symbole), elle offre à l'efficacité de largeur de bande la plus élevée aujourd'hui disponible parmi les signaux numériques de câble. Les espérances sont que M-QAM évoluera pour devenir un format dominant de modulation du multiplex numérique.

Nous allons définir dans ce chapitre la modulation d'amplitude en quadrature et préciser leurs performances en jouant sur le débit, et comparer les caractéristiques de ces différents types.

## II.2 LA MODULATION D'AMPLITUDE EN QUADRATURE (QAM) :

« *Quadrature Amplitude Modulation (QAM)* » est la combinaison de la modulation d'amplitude et de phase.

Ce type de modulation consiste à prendre deux porteuses de même fréquence, mais déphasées l'une par rapport à l'autre de  $90^\circ$  (quadrature). Ces porteuses sont ensuite modulées en amplitude, sans porteuse, puis additionnées l'une avec l'autre.

La notation générale des axes est :

- **I** (*In phase*) pour l'axe représentant l'origine.
- **Q** (*quadrature*) pour l'axe déphasé de  $90^\circ$ , en avance par rapport à l'axe I.

Les états possibles d'une configuration particulière peuvent être le mieux noté en utilisant un diagramme de constellation. Dans un diagramme de constellation, les constellations de points sont disposés dans une grille carrée avec un espacement d'égalité horizontale et verticale (d'autres configurations sont également possibles). Dans la communication numérique, comme des données est binaire, il s'ensuit que le nombre de points dans la grille sera généralement fonction de la puissance de 2, 4, 8, etc. Les plus courantes sont 16-QAM, 64-QAM, 1258-QAM et 256-QAM.

Afin de maintenir l'énergie moyenne d'une constellation d'ordre supérieur au même niveau, il est impératif que les points de la constellation restent proches les uns des autres. Toutefois, une telle configuration apporte avec elle des chances supplémentaires de bruit et de la corruption supplémentaires. Dans l'application pratique, la hausse des QAM ordre fournit plus de données, mais il offre moins de façon fiable (c'est à dire avec un taux plus élevé d'erreur de bits) que la QAM d'ordre inférieur.

A la base, une astuce d'électronicien, d'utiliser non pas une, mais deux porteuses rigoureusement de même fréquence. Elles sont déphasées de  $90^\circ$  et lorsque l'on additionne deux porteuses de fréquence  $f_0$  en quadrature, on obtient une seule porteuse, toujours de fréquence  $f_0$  ou l'on reconstitue les deux porteuses initiales à partir de la résultante (*figure II.1*).

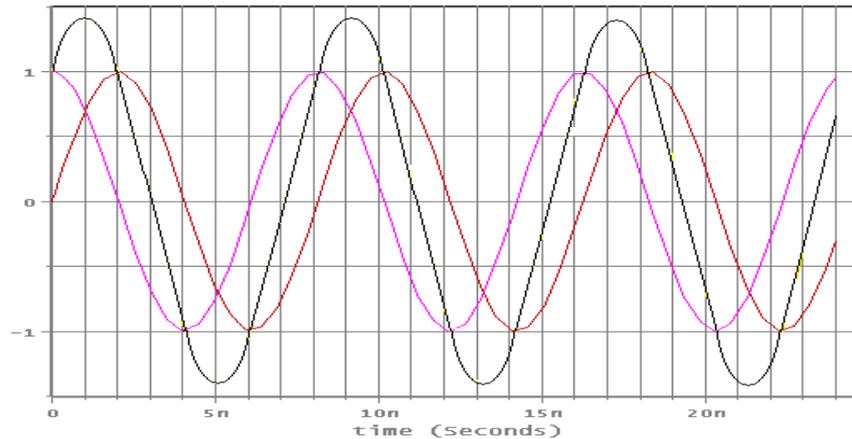


Figure II.1 – représentation des deux sous-porteuses avec la résultante

Autrement dit ; la QAM est un arrangement de modulation bidimensionnel d'un signal qui emploie les mêmes fonctions de base suivantes :

$$\phi_1 = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(2\pi f t) \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \quad (19)$$

$$\phi_2 = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(2\pi f t) \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \quad (20)$$

Où  $T$  est la période du signal.

$f$  est la fréquence.

$\phi_1$  La phase de la première sous porteuse.

$\phi_2$  La phase de la deuxième sous porteuse.

La modulation de phase et la modulation par déplacement de phase peuvent être considérées comme des cas particuliers de la modulation d'amplitude en quadrature.

L'intérêt de la méthode est que la porteuse résultante n'a pas changée de fréquence, mais comme les deux "sous-porteuses" en quadrature vont être modulées indépendamment l'une de l'autre, on peut transporter deux fois plus d'informations par cellule.

La modulation s'appelle M-aire, si chaque symbole émis peut prendre M valeurs possibles. Dans la plupart des cas, le symbole est formé à partir d'un vecteur de k bits, ce qui conduit à  $M = 2^k$ .

Pour M allant de 4 à 256. Les constellations avec  $M = 2^{2p}$  points (avec p entier) ont un contour carré et les constellations avec  $M = 2^{2p+1}$  points ont un contour en croix. Les exemples de la première famille sont la 4-QAM, la 16-QAM, la 64-QAM et la 256-QAM.

De même, les exemples de la seconde famille sont la 32-QAM et la 128-QAM. Une modulation QAM avec un contour carré est constituée de deux modulations MDA en quadrature, les deux axes étant indépendants.

Pour un nombre de points M grand, ni la MDA (modulation par déplacement d'amplitude ou ASK) ni la MDP (modulation par déplacement de phase ou PSK) ne constituent une solution satisfaisante pour utiliser efficacement l'énergie émise. En effet, dans la MDA les points de la constellation sont sur une droite, et dans la MDP les points sont sur un cercle. Or, la probabilité

d'erreur est fonction de la distance minimale entre les points de la constellation, et la meilleure modulation est celle qui maximise cette distance pour une puissance moyenne donnée.

### II.3 QUELQUE PROPRIETE DE LA MAQ :

#### II.3.1 L'efficacité spectrale de la QAM :

On définit l'efficacité spectrale ou débit spécifique par le débit binaire passant dans un hertz de bande. La bande de fréquence occupée étant chiffrée par l'Occupation Spectrale du Canal centré sur la fréquence porteuse  $f_p$ , dite OS Canal.

L'efficacité spectrale ou débit spécifique est donc :

$$D_{spé} = \frac{D_b}{OS_{canal}} \left[ \frac{\text{bits}}{\text{sec}} \right] \text{ Hz} \quad (21)$$

*Des exemples classiques :*

- Les transmissions par modem sur ligne téléphonique, sauf les modems qui utilisent la modulation de fréquence en binaire (FSK-2) comme V21, V23, Bell 103 etc.
- La télévision par satellite en numérique (QPSK ou 4-QAM).
- La télévision "câblée" urbaine (16-QAM, ..... 256-QAM).

Pour une même rapidité de modulation  $R=1/T$ , le débit binaire  $D_b=1/T_b$  de la M-QAM est multiplié par  $n = \log_2(M)$  par rapport celui de la 2-QAM. Autrement dit, pour une largeur de bande  $B$  donnée, l'efficacité spectrale  $\eta=D/B$  est multiplié par :  $n = \log_2(M)$ .

$n$	$M=2^n$	Modulation	Débit Binaire	Efficacité Spectrale : $\eta$
1	2	2-QAM	$D$	$\eta$
2	4	4-QAM	$2-D$	$2-\eta$
4	16	16-QAM	$4-D$	$4-\eta$
6	64	64-QAM	$6-D$	$6-\eta$
8	128	128-QAM	$8-D$	$8-\eta$

Tableau II.1 : Le gain en débit binaire et en efficacité spectrale

Le tableau ci-dessus montre le gain obtenu sur le débit binaire et sur l'efficacité spectrale pour diverses modulations M-QAM, ceci pour une même rapidité de modulation. L'intérêt d'augmenter  $M$ , même au prix d'une complexité accrue, est évident.

#### II.3.2 Densité spectrale de puissance des constellations de MAQ :

Pendant que des constellations carrées de QAM peuvent être considérées comme deux modulations indépendantes orthogonales de PAM qui sont transmises simultanément le PSD de la QAM est simplement deux fois les PSD des différentes modulations de PAM.

#### II.3.3 La bande passante :

La bande passante notée  $B$  ou BP est la largeur l'intervalle de fréquence, mesurée en hertz, d'une plage de fréquence  $f_2 - f_1$  pour lequel l'atténuation est inférieure à 3 dB (Figure II.2)

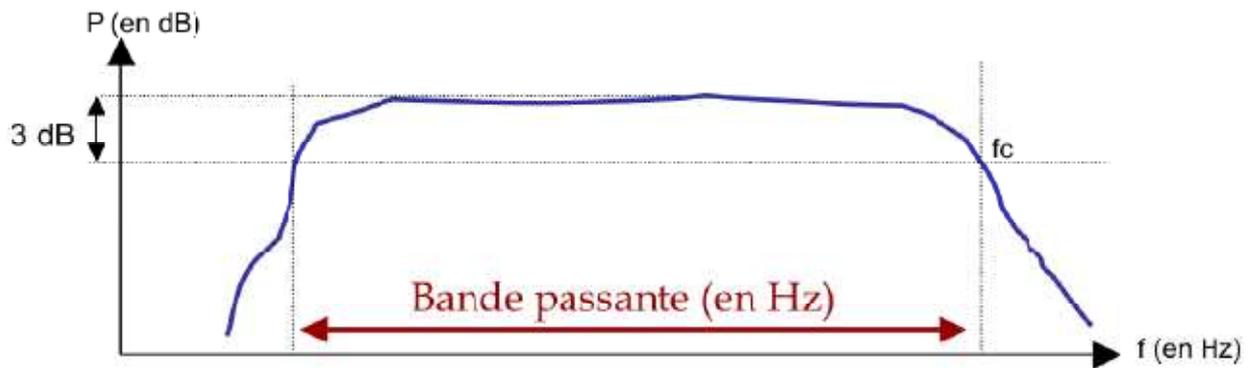


Figure II.2 : la bande passante à -3 dB

Exemples de valeurs de bandes passantes :

- Paire téléphonique (RTC) = 3100 Hz
- Câble coaxial = 10 MHz
- Paire torsadée catégorie 5 = 100 MHz
- Fibre optique = quelques GHz

Soit à transmettre des données binaires au rythme  $f_b$  [b/s]. Chaque bit a donc une durée  $T_b = 1/f_b$ . La bande passante minimale pour transmettre ces données appelée bande de NYQUIST est  $(1/2.T_b) = (f_b/2)$ .

En effet, le canal se comporte comme un filtre passe-bas qui filtre le signal carré composé de signaux binaires de durée  $T_b$ . Ce signal est composé de plusieurs raies et il faut au minimum que le fondamental de ce signal soit transmis.

Or la fréquence de ce fondamental est  $(1/2T_b) = (f_b/2)$ .

#### II.4 PRINCIPE DE LA MODULATION D'AMPLITUDE EN QUADRATURE :

Le Schéma synoptique d'un modulateur QAM est représenté à (la figure II.3). Les deux chemins à l'additionneur désigné typiquement sous le nom du 'I' (en phase), et du 'Q' (quadrature).

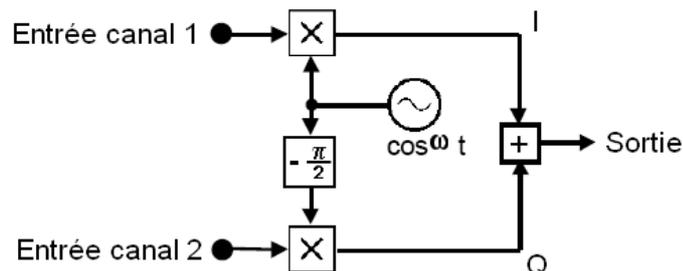


Figure II.3: Schéma synoptique d'un modulateur en quadrature

Cette modulation permet de diminuer la largeur spectrale du signal modulé en utilisant deux ondes porteuses. Cette technique consiste à diviser le signal informatif  $S(t)$  en deux signaux  $S_1(t)$  et  $S_2(t)$  modulant deux porteuses  $S_{p1}(t)$  et  $S_{p2}(t)$  de même fréquence et en quadrature de phase :

$$S_{p1}(t) = A \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad \text{et} \quad S_{p2}(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (22)$$

Les signaux  $S_1(t)$  et  $S_2(t)$  peuvent être constitués en prenant deux composantes de  $s(t)$  : données paires et impaires, la composante de droite et la composante de gauche d'un signal stéréophonique. Le dédoublement du signal à la sortie du codeur permet de diviser par deux la rapidité de modulation et donc de diminuer la largeur spectrale par le même facteur. Par conséquent, on retrouve une occupation spectrale du signal modulé identique à une modulation BLU du signal initial  $s(t)$ . Ce type de modulation est très utilisé dans le domaine de la modulation des signaux numériques.

❖ Prenons par exemple un signal modulé QAM avec 3 bits transmis par baud. Dans notre exemple (*Tableau II.2*), nous prendrons 2 amplitudes combinées avec 4 décalages de phase différents. La table de correspondance pourra être du type :

Groupe de bit	Amplitude	Décalage de phase
000	1	0
001	2	0
010	1	$\pi/4$
011	2	$\pi/4$
100	1	$\pi/2$
101	2	$\pi/2$
110	1	$3\pi/4$
111	2	$3\pi/4$

Tableau II.2 : Table de correspondance

Exemple de codage de la suite binaire 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 est illustré à la (*figure II.4*) :

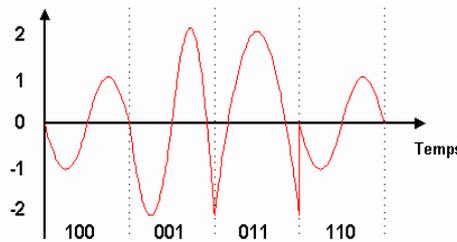


Figure II.4: Exemple de codage

Les combinaisons possibles en modulations QAM sont souvent représentées par une constellation de points (*figure II.5*) représentant chacun un groupe de bits.

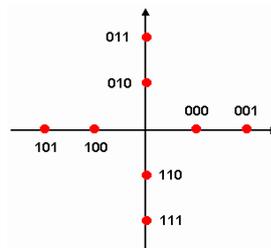


Figure II.5: La constellation de points

Dans la constellation QAM, l'éloignement de chaque point par rapport à l'origine indique l'amplitude, l'angle et le décalage de phase. Les combinaisons possibles en modulations QAM sont souvent représentées par une constellation de points représentant chacun un groupe de bits, dans notre exemple ci-dessus 3 bits par baud.

**Remarque importante :** Si on augmente le nombre de points de la constellation, la largeur du canal d'émission ne change pas, puisque le nombre de symboles émis par seconde (bauds) n'a pas changé.

Dans la pratique, nous augmentons le débit sans augmentation de bande passante, mais au prix d'une relative fragilité du signal. En effet, les points de la constellation étant plus rapprochés, ils seront plus difficiles à décoder en cas de bruitage de la ligne.

**De plus en plus compliqué :** Une autre façon de représenter la constellation consiste à utiliser un modèle vectoriel, c'est à dire un repère polaire, représenté par un module (longueur) et un argument (angle). Comme nous avons ici deux porteuses en quadrature, nous aurons un point de fonctionnement qui sera défini par un vecteur égal à la somme de deux vecteurs en quadrature (figure II.6).

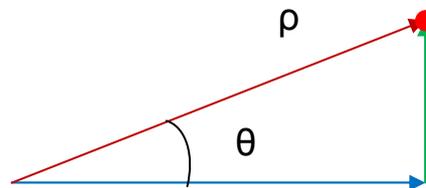


Figure II.6 : représentation vectorielle d'un point

Si l'on reprend l'exemple de la modulation 16-QAM, nous aurons par axe, donc par porteuse, deux vecteurs d'argument  $0^\circ$  et de modules représentant le taux de modulation d'amplitude utilisé et deux autres vecteurs de même module, mais d'argument égal à  $180^\circ$ .

Comme les porteuses sont en quadrature, nous obtenons ceci, dessiné pour un seul quadrant (figure II.7). Bien entendu, la représentation complète reconstitue exactement la constellation vue plus haut.

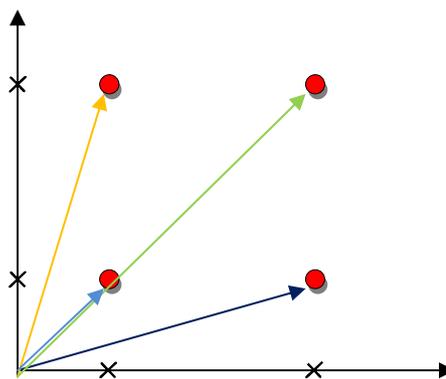


Figure II.7 : représentation d'un seul quadrant

Au bout du compte, nous pouvons même oublier la représentation quadratique et raisonner sur une seule porteuse, qui sera modulée avec une amplitude (module du vecteur, sa longueur) et une phase (argument du vecteur, son angle) calculée par cette méthode.

La répartition des valeurs de symboles sur la constellation ne se fait pas au hasard, elle est normalement prévue pour optimiser la réception, lorsque la constellation a été abîmée par le bruit. Le choix judicieux de cette répartition se fait au moyen d'algorithmes complexes, qui sortent largement du cadre de cet exposé, surtout destiné à expliquer qualitativement comment se fait le transport de données. Des algorithmes plus ou moins compliqués permettent de définir des constellations contenant de plus en plus de points, c'est à dire de plus en plus de bits dans chaque symbole. Ainsi, nous utiliserons des modulations de type (figure II.8).

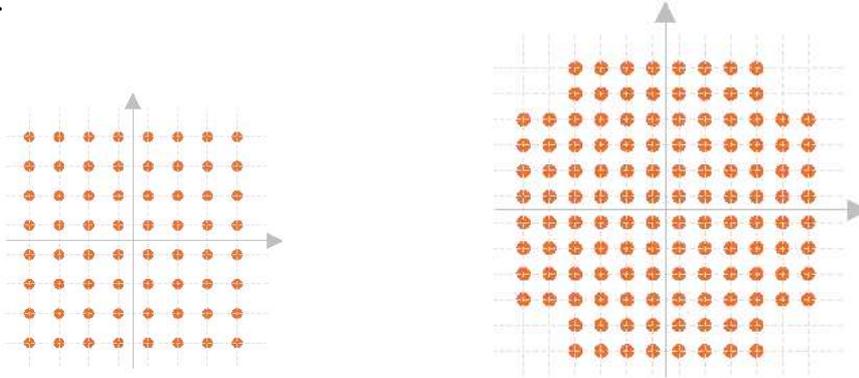
MAQ-64 ( $2^6$ ), 6 bits par symboleMAQ-128 ( $2^7$ ), 7 bits par symbole

Figure II.8 : présentation de deux types de constellation

Gardons présent à l'esprit que ces manœuvres ont comme conséquences :

- ✓ D'augmenter le débit en bits par seconde sans augmenter pour autant la largeur du canal de communication.
- ✓ De diminuer l'immunité au bruit du signal modulé.

## II.5 LES CONSTELLATIONS MAQ-M :

Les symboles  $a_k$  et  $b_k$  prennent respectivement leurs valeurs dans deux alphabets à  $M$  éléments ( $A_1, A_2, \dots, A_M$ ) et ( $B_1, B_2, \dots, B_M$ ) donnant ainsi naissance à une modulation possédant un nombre  $E = M^2$  états. Chaque état est donc représenté par un couple  $(a_k, b_k)$  ou ce qui revient au même par un symbole complexe  $c_k = a_k + j b_k$ .

Dans le cas particulier mais très fréquent où  $M$  peut s'écrire  $M = 2^n$ , alors les  $a_k$  représentent un mot de  $n$  bits et les  $b_k$  représentent aussi un mot de  $n$  bits. Le symbole complexe  $c_k = a_k + j b_k$  peut par conséquent représenter un mot de  $2n$  bits. L'intérêt de cette configuration est que le signal  $m(t)$  est alors obtenu par une combinaison de deux porteuses en quadrature modulées en amplitude par des symboles  $a_k$  et  $b_k$  indépendants.

De plus, les symboles  $a_k$  et  $b_k$  prennent très souvent leurs valeurs dans un même alphabet à  $M$  éléments.

Par exemple, la 16-QAM est construite à partir de symboles  $a_k$  et  $b_k$  qui prennent leurs valeurs dans l'alphabet  $\{\pm d, \pm 3d\}$  où  $d$  est une constante donnée. Une représentation de la constellation de cette modulation est donnée par la figure II.9.

La 16-QAM a été souvent utilisée, notamment pour la transmission sur ligne téléphonique du RTC (à 9600 bit/s) et pour les faisceaux hertziens à grande capacité (140 Mbits/s) développés dans les années 1980.

Plus généralement lorsque les symboles  $a_k$  et  $b_k$  prennent leurs valeurs dans l'alphabet  $\{\pm d, \pm 3d, \pm 5d, \dots, \pm (M-1)d\}$  avec  $M = 2^{2n}$ , on obtient une modulation à  $2^{2n}$  états et une constellation avec un contour carré dont font partie la 4-QAM, la 16-QAM, la 64-QAM et la 256-QAM.

- Les constellations avec  $M = 2^{2p}$  points (avec  $p$  entier) ont un contour carré (figure II.9) :

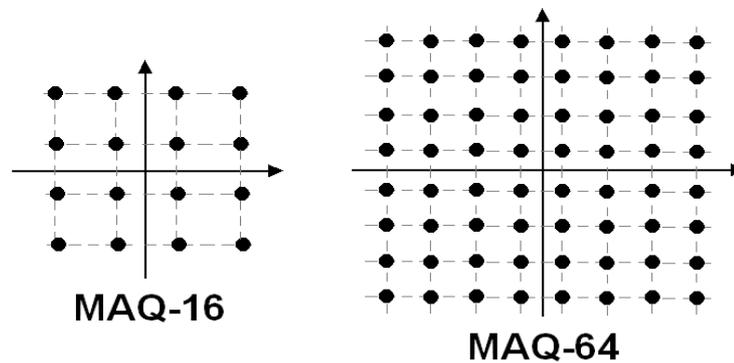


Figure II.9 : La constellation de la 16-QAM et de la 64-QAM

- Les constellations avec  $M = 2^{2p+1}$  points ont un contour en croix (figure II.10):

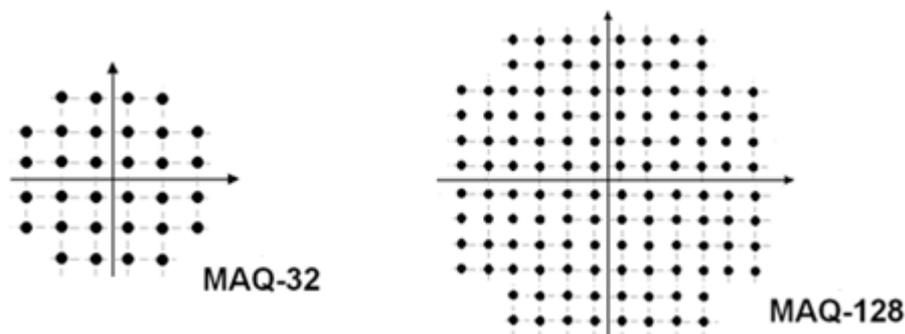


Figure II.10 : La constellation de la 32-QAM et de la 128-QAM

Le diagramme de constellation évolue en fonction du signal. Si le signal est perturbé, le diagramme de constellation est alors déformé. Suivant la déformation, il est possible d'identifier le type d'interférences qui pollue l'information.

## II.6 MODULATION ET DEMODULATION DE LA QAM :

Lorsque le signal  $m(t)$  est obtenu par une combinaison de deux porteuses en quadrature modulées en amplitude par des symboles  $a_k$  et  $b_k$  indépendants, cela simplifie le modulateur et le démodulateur.

En effet, pour le modulateur le train binaire entrant  $\{i_k\}$  est facilement divisé en deux trains  $\{a_k\}$  et  $\{b_k\}$ . Voir la (figure II.11).

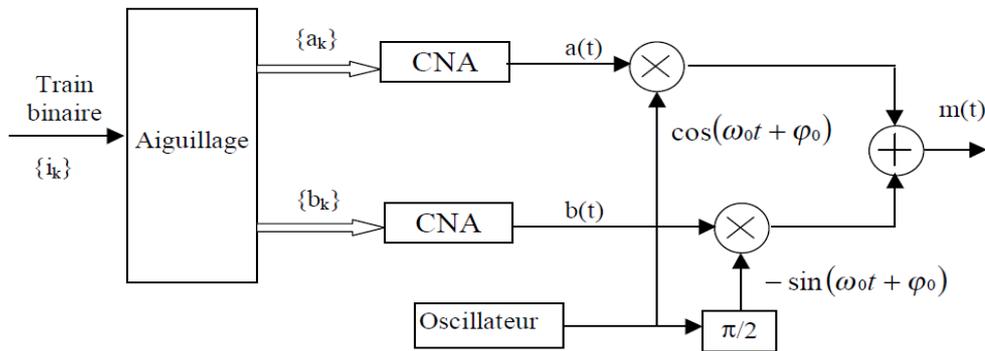


Figure II.11 : Modulateur M-QAM

La réception d'un signal QAM fait appel à une démodulation cohérente et par conséquent nécessite l'extraction d'une porteuse synchronisée en phase et en fréquence avec la porteuse à l'émission.

Le signal reçu est démodulé dans deux branches parallèles, sur l'une avec la porteuse en phase et sur l'autre avec la porteuse en quadrature. Les signaux démodulés sont convertis par deux CAN, puis une logique de décodage détermine les symboles et régénère le train de bits reçus. Le synoptique du démodulateur M-QAM est très voisin de celui proposé pour la démodulation MDP.

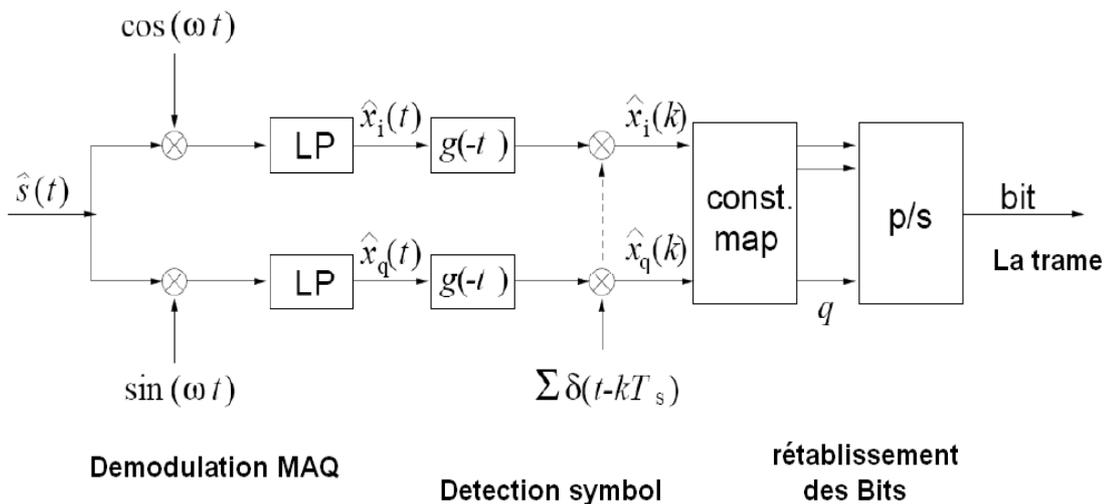


Figure II.12 : Démodulateur M-QAM

Exemple pour k=2 bits par symbole (modulation 4-aire) (figure II.13).

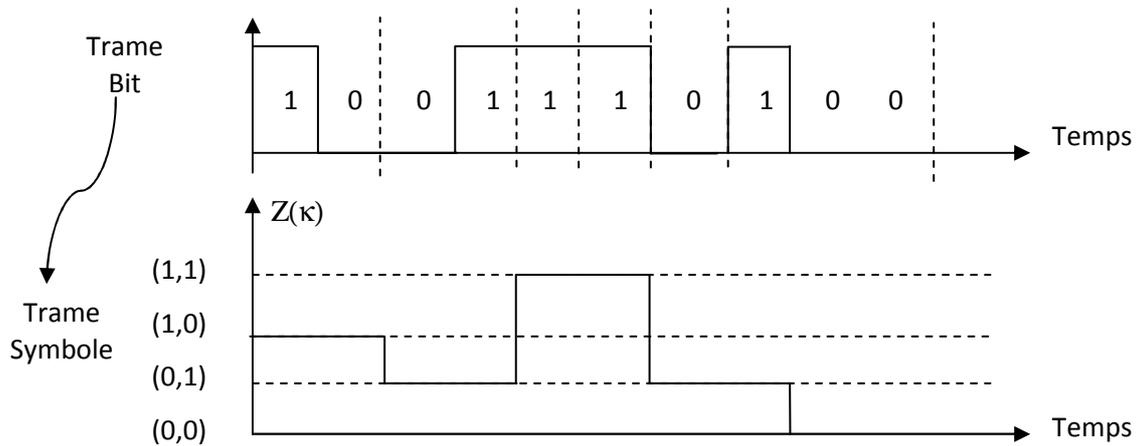


Figure II.13 : train binaire avec la trame symbole

**II.7 « QAM » : UNE GENERALISATION DE LA MDP ET LA MDA :**

En ne considérant le signal  $m(t)$  que pendant une période  $T$ , on a :

$$m(t) = a_k \cos(\omega_0 t + \varphi_0) - b_k \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = \text{Re}[(a_k + j b_k) e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)}] \quad (23)$$

Avec :

$$c_k = a_k + j b_k = A_k \cdot e^{j\varphi_k} \quad (24)$$

En posant :

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad \text{et} \quad \varphi_k = \text{arctg}\left(\frac{a_k}{b_k}\right) \quad (25)$$

Le signal  $m(t)$  s'écrit alors :

$$m(t) = A_k \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_k) \quad (26)$$

Cette écriture montre que la modulation QAM peut être considérée comme une modulation simultanée de la phase et de l'amplitude :

- Ainsi la modulation de phase MDP peut être considérée comme une modulation QAM où  $A_k$  est constant.
- De même, la modulation d'amplitude MDA peut être considérée comme une modulation QAM où les  $b_k$  sont nuls.

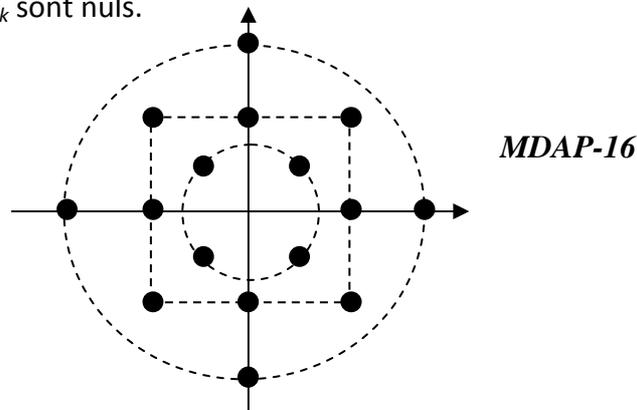


Figure II.14 : Constellation de la MDAP-16

Cette écriture justifie aussi l'appellation de "Modulation par Déplacement d'Amplitude et de Phase" (MDAP) parfois donnée à la QAM.

La modulation MDAP à 4 amplitudes et 4 phases, dont la constellation est donnée à la (figure II.14).

## II.8 LA PROBABILITE D'ERREUR PAR SYMBOLE :

Sur un canal gaussien, la probabilité d'erreur par symbole en sortie du détecteur à seuils est donnée par :

$$P_s(e) = \frac{M-1}{M} \operatorname{erfc} \left( \frac{d}{2\sqrt{N_0}} \right) \quad (27)$$

Ou :

$M$  est le nombre de points de la constellation

$N_0/2$  : désigne la densité spectrale bilatérale de puissance du bruit additif supposé blanc dans la bande du signal. Pour comparer les différentes modulations entre elles, il est d'usage d'exprimer la probabilité d'erreur en fonction du rapport  $E_b/N_0$  (énergie émise par bit sur densité spectrale de puissance de bruit). En fonction de ce rapport, il est facile de démontrer que la probabilité d'erreur par symbole est donnée par la formule :

$$P_s(e) = \frac{M-1}{M} \operatorname{erfc} \left( \frac{3\sqrt{3\log_2 M} E_b}{M^2-1 N_0} \right) \quad (28)$$

La probabilité d'erreur par symbole  $P_s(e)$  est simple à calculer lorsque  $\log_2 M$  est un nombre pair, c'est-à-dire lorsque la constellation a un contour carré. Dans ce cas, la modulation QAM est constituée de deux MDA indépendantes chacune ayant points et une énergie égale à la moitié de celle de la modulation QAM. Si  $p$  désigne la probabilité d'erreur par symbole de l'une des composantes MDA, la probabilité d'erreur par symbole pour la modulation QAM est :

$$P_s(e) = 1 - (1 - p)^2 \quad (29)$$

Ce qui donne asymptotiquement :

$$P_s(e) \approx 2p \quad (30)$$

Avec  $P_s$  = Probabilité d'une erreur de symbole pour la QAM.

En utilisant l'expression de donnée par la formule (...), on obtient :

$$P_s(e) = 2 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{3\sqrt{3\log_2 M} E_b}{2(M-1) N_0} \right) \quad (31)$$

Un choix plus rationnel est alors une modulation qui répartit les points uniformément dans le plan.

Pour faire cela, nous avons vu que le signal modulé  $m(t)$  peut s'écrire :

$$m(t) = a(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) - b(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (32)$$

Et que les deux signaux  $a(t)$  et  $b(t)$  ont pour expression :

$$a(t) = \sum_k a_k \cdot g(t - kT) \quad \text{et} \quad b(t) = \sum_k b_k \cdot g(t - kT) \quad (33)$$

Le signal modulé  $m(t)$  est donc la somme de deux porteuses en quadrature, modulées en amplitude par les deux signaux  $a(t)$  et  $b(t)$ .

La modulation QAM ne se prête pas à une démodulation non cohérente comme dans le cas de la PSK. La démodulation du signal reçu nécessite l'extraction d'une porteuse synchronisée en phase et en fréquence avec la porteuse à l'émission.

Le signal reçu est démodulé dans deux branches parallèles, sur l'une avec la porteuse en phase et sur l'autre avec la porteuse en quadrature. Les signaux  $I$  et  $Q$  démodulés sont échantillonnés à la cadence symbole  $1/T_s$  et envoyés ensuite vers deux circuits de décision à seuils.

## II.9 APPLICATIONS DE LA MODULATION D'AMPLITUDE EN QUADRATURE:

Les domaines d'applications des diverses techniques de transmission numérique que nous venons d'exposer sont très variés. Quelques-uns d'entre eux vont être décrits ci après.

### Les modems téléphoniques :

La transmission de données sur le canal téléphonique a été pendant les années 60 et 70 à l'origine du développement d'un grand nombre de techniques de traitement du signal en télécommunications. La transmission d'un grand débit sur le canal téléphonique (sur une bande de fréquence de 3500 Hz environ) a nécessité la mise en œuvre de modulations à grand nombre d'états comme la 16-QAM, la 32-QAM et la 128-QAM.

On pensait que le débit ne pourrait pas dépasser les 9,6 kbit/s à cause du rapport S/B limité des liaisons. En fait certaines techniques de codage, de filtrage et l'utilisation de constellations de type treillis ont permis de franchir un saut spectaculaire en matière de qualité et de débit que l'on peut atteindre. On assiste aujourd'hui au développement de modems "V-Fast" dont le débit atteint 28 kbit/s voir 56 kbit/s sur des liaisons de bonne qualité.

### Les faisceaux hertziens :

Au début de la numérisation, les faisceaux hertziens faisaient usage de modulations simples comme la 4-PSK mais l'utilisation efficace du spectre radioélectrique disponible a nécessité le développement de faisceaux hertziens utilisant des modulations à grand nombre d'états comme la 16-QAM et la 64-QAM. C'est la modulation 16-QAM qui a permis la transmission d'un débit de 140 Mbit/s dans la bande 6,4-7,1 GHz pour des canaux espacés de 40 MHz.

Aujourd'hui, des faisceaux hertziens utilisent la modulation 256-QAM qui offre un débit de 280 Mbit/s pour des canaux espacés de 30 MHz. Notons que l'émetteur doit avoir une bonne linéarité pour transmettre ce type de modulations.

Le problème principal dans les faisceaux hertziens numériques est la propagation par trajets multiples qui dégrade sérieusement la qualité et limite la possibilité de liaisons à grande capacité. Ce phénomène s'accroît lorsque le nombre d'états de la modulation augmente.

64-QAM et 256-QAM sont souvent utilisés en modem câble et d'applications numériques de télévision par câble. En fait, 64-QAM et 256-QAM sont les directives de modulation obligatoire pour la télévision par câble numérique. Au Royaume-Uni, 16-QAM et 64-QAM sont également utilisés actuellement dans la télévision numérique terrestre.

Ils existent d'autres domaines d'application, comme les transmissions par satellite, les transmissions sur fibre optique et les radiocommunications avec les mobiles.

### **II.9 CONCLUSION :**

Les protocoles de transmission de données comportent toujours des algorithmes de correction d'erreur et des algorithmes de récupération en cas d'erreur (répétition de l'émission des données), mais plus il y aura d'erreurs, plus on perdra de temps, si bien que vouloir passer trop d'informations à la fois peut aboutir à une perte de temps.

En général, les modems sont prévus pour pouvoir se replier sur des modes de modulation disposant de constellations moins denses, plus faciles à démoduler en cas de bruit. Le débit diminue, mais le taux d'erreurs aussi.

Les divers types de modulations utilisés ne sont que des exemples. Le principe reste cependant toujours le même, à savoir:

- ✓ Construire des algorithmes qui permettent de passer le plus d'informations possible dans une largeur de canal donnée (le plus possible de bits par symbole, avec le nombre maximum de symboles par seconde que l'on peut utiliser sans déborder du canal).
- ✓ Prévoir des solutions de repli lorsque la qualité du signal en réception se détériore à cause du bruit électronique.

### III.1 INTRODUCTION :

Aujourd'hui, on assiste à un développement remarquable de la technologie incitant les chercheurs à relever les défis lancés pour obtenir le meilleur produit, de petites tailles et de plus en plus rapide. Il leur devient donc de plus en plus difficile de fournir un travail productif et efficace vu que l'exploitation des différentes possibilités de conceptions exige des outils et des méthodologies de plus en plus puissantes. En effet, avec la mise en point des logiciels de simulation, la conception et la réalisation des systèmes électroniques et de communications deviennent plus aisées car elles permettent de travailler dans des conditions très proches de la réalité, à moindre coût avec des résultats rapides et en temps réel.

Ce chapitre présente le logiciel de simulation « Simulink », qui est l'un des logiciels les plus utilisés pour la simulation des systèmes les plus modernes.

Après l'illustration du logiciel utilisé pour la simulation, on va consacrer ce chapitre pour décrire la partie de simulation de notre projet.

### III.2 LA STRUCTURE DU MATLAB/SIMULINK :

MATLAB dont le nom provient de « MATrix-LABoratory » est le noyau d'un ensemble d'outils logiciels dédiés au calcul scientifique.

MATLAB est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple. Avec ses fonctions spécialisées, il peut être aussi considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques. MATLAB est un interpréteur dont les instructions sont interprétées et exécutées ligne par ligne.

*Il existe deux modes de fonctionnement:*

➤ **Mode interactif:**

MATLAB exécute les instructions au fur et à mesure qu'elles sont données par l'utilisateur.

➤ **Mode exécutif:**

MATLAB exécute ligne par ligne un "fichier M" (programme en langage MATLAB).

Simulink est une plateforme de simulation multi-domaine et de modélisation et d'analyse des systèmes dynamiques. Il soutient les systèmes linéaires et non linéaires, modèle dans le temps continu, prélevé temps, ou un hybride des deux.

Simulink fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal.

Simulink est intégré à MATLAB, fournissant ainsi un accès immédiat aux nombreux outils de développement algorithmique, de visualisation et d'analyse de données de MATLAB. C'est

un lointain rapport des paquets précédents de simulation qui exigent de vous de formuler des équations et des équations à différences dans une langue ou un programme.

Simulink inclut une bibliothèque complète de bloc des évier, les sources, les composants linéaires et non linéaires, et les connecteurs. Vous pouvez également adapter aux besoins du client et créer vos propres blocs.

Les modèles sont hiérarchiques, ainsi vous pouvez établir des modèles en utilisant des approches de haut en bas et de bas en haut. Vous pouvez regarder le système à un à niveau élevé, puis double-click sur des blocs pour passer vers le bas par les niveaux pour voir les niveaux croissants du détail modèle. Cette approche fournit la perspicacité dans la façon dont le model est organisé et la façon dont ses pièces agissent l'un sur l'autre.

Après que vous définissiez un modèle, vous pouvez le simuler, en utilisant un choix des méthodes d'intégration, de Simulink les menus ou en entrant commande dans la fenêtre de la commande de MATLAB.

Les menus sont particulièrement commodes pour le travail interactif, alors que la commande-ligne approche est très utile pour courir une série de simulations. En utilisant des portées et d'autres blocs d'affichage, vous pouvez voir les résultats de simulation tandis que la simulation fonctionne. En outre, vous pouvez changer des paramètres et immédiatement voir ce qui se produit, pour « ce qui si » exploration. Les résultats de simulation peuvent être mis dans la zone de travail de MATLAB pour le traitement et la visualisation.

### III.3 PRESENTATION DU SIMULINK :

#### III.3.1 Pour démarrer Simulink :

Tapez simulink ↩ dans la fenêtre de commande de MATLAB ou, ce qui revient au même, cliquez sur l'icône Simulink de la barre des tâches (figure III.1).

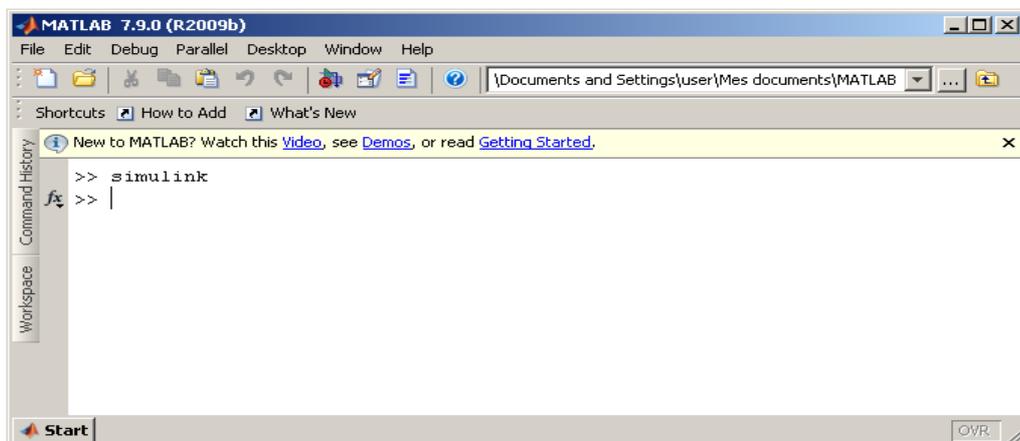


Figure III.1 : La fenêtre de commande du MATLAB

Cette action ouvre la fenêtre Simulink « *Library Browser* » qui permet l'accès à la Bibliothèque Simulink ainsi qu'à d'autres bibliothèques (Control System, par exemple). Simulink, comme chaque bibliothèque importante, est subdivisée en compartiments.

Cette fenêtre contient des collections de blocs que l'on peut ouvrir en cliquant sur les compartiments indiqués au tableau III.1:

N°	Compartiment	Définition
1	<b><i>Commonly Used Blocks</i></b>	Blocs Utilisés Généralement
2	<b><i>Continuous</i></b>	Continue
3	<b><i>Discontinuous</i></b>	Discontinue
4	<b><i>Discrete</i></b>	Discret
5	<b><i>Logic And Bit Operations</i></b>	Operation Logique et Binaire
6	<b><i>Lookup Table</i></b>	Tableau De Consultation
7	<b><i>Math Operations</i></b>	Operations Mathématiques
8	<b><i>Model Verification</i></b>	Verification Des Modèles
9	<b><i>Model-Wide Utilities</i></b>	Utilités Modèle- Large
10	<b><i>Ports &amp; Subsystems</i></b>	Ports et Sous Systèmes
11	<b><i>Signal Attributes</i></b>	Attributs Du Signal
12	<b><i>Signal Routing</i></b>	Cheminement Du Signal
13	<b><i>Sinks</i></b>	Eviers
14	<b><i>Sources</i></b>	Sources
15	<b><i>User-Defined Functions</i></b>	Fonctions Définies Par L'utilisateur
16	<b><i>Additionnal Math &amp; Discrete</i></b>	Math D'additionnelle Discrete

Tableau III.1 : Description des compartiments

La figure III.2 nous montre comment-y accéder à la bibliothèque du Simulink.

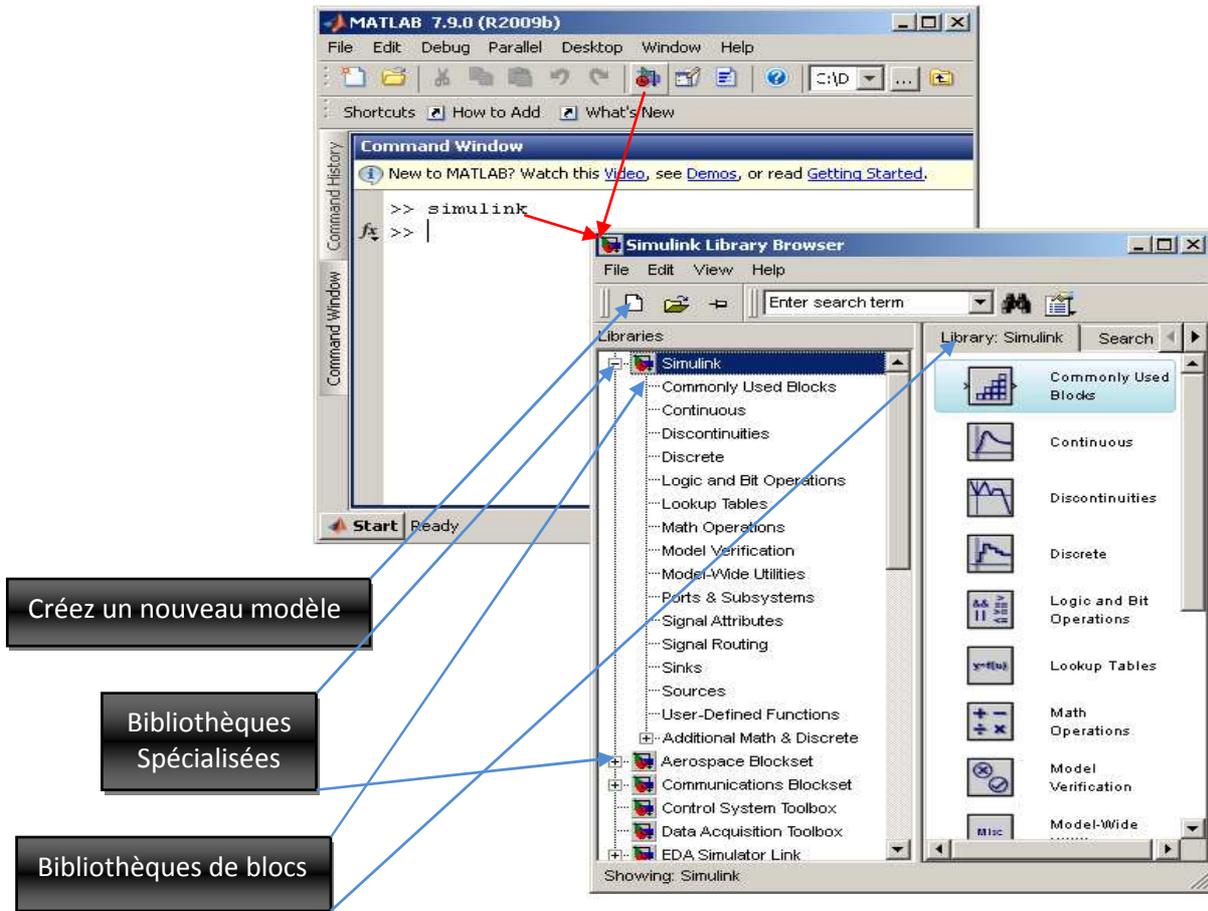


Figure III.2 : accès à la bibliothèque du simulink

### III.3.2 Explorateur de la bibliothèque Simulink :

La figure III.3 nous montre comment explorer la bibliothèque Simulink.

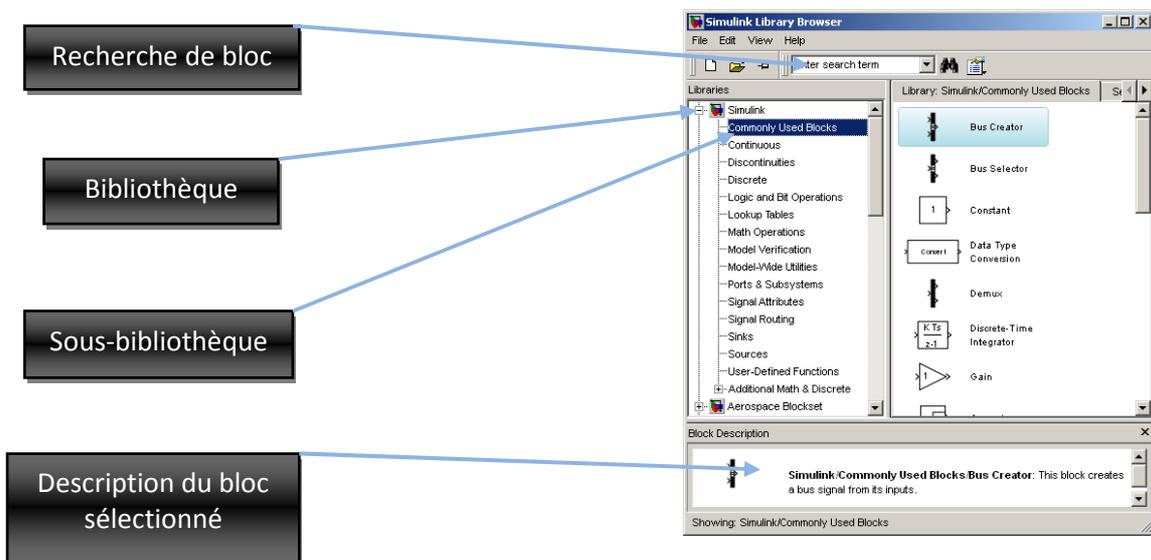


Figure III.3 : la bibliothèque Simulink

### III.3.3 Création d'un nouveau modèle :

Pour ajouter un bloc à un modèle, faites-le glisser dans le schéma-bloc depuis l'explorateur de la bibliothèque. Les blocs sont donnés en liste alphabétique dans chaque sous bibliothèque (figure III.4).

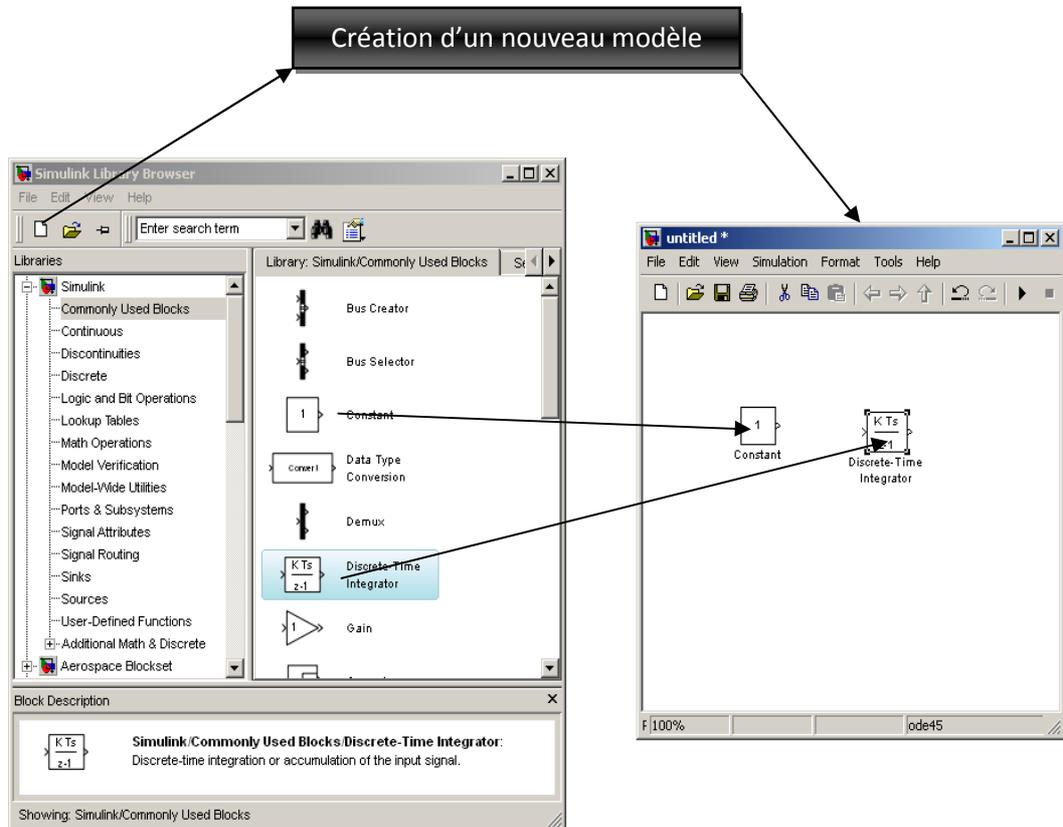


Figure III.4 : un nouveau modèle Simulink

### III.3.4 Les compartiments utilisés dans les modèles a simuler :

#### III.3.4.1 « Sources » :



Ce compartiment contient quelques générateurs de signaux. Ils se reconnaissent à l'existence d'un seul port, en sortie, matérialisé par une petite flèche sur le côté droit du bloc. Tous les blocs sont paramétrables. Parmi tous les blocs, il est intéressant de remarquer le bloc « *From workspace* », qui permet de construire un signal personnalisé à partir de MATLAB. Pour cela on affecte une matrice  $[T, U]$  dans la fenêtre de commande MATLAB ;  $T$  est un vecteur unicolonne représentatif du temps et  $U$  est un vecteur colonne représentatif du signal à créer.

### III.3.4.2 « Sinks »:



La bibliothèque de Sinks contient les blocs qui acceptent à leur entrée des composantes numériques ou temporels. Ils permettent de tracer n'importe quelle sortie de système simulé.

C'est à partir de ces sorties que sont réalisées des trajectoires, les constellations (avec la fonction constellation). Pour éviter les phénomènes transitoires, il faut configurer ces sorties de telle sorte que le système soit en régime établi lorsque l'on collecte les données.

Les Sinks sont des composantes sans sortie physique.

## III.4 MISE EN ŒUVRE SOUS MATLAB-SIMULINK :

### III.4.1 Le modèle simulink M-QAM :

Notre modèle (figure III.5) comporte des blocs, nous allons les citer selon les bibliothèques qui comprennent ces blocs.

- *La source d'information.*
- *Le modulateur rectangulaire M-QAM en bande de base.*
- *Canal de transmission.*
- *Le démodulateur rectangulaire M-QAM en bande de base.*
- *Les blocs d'affichage.*
- *Calculateur de taux d'erreur.*

Il s'agit d'une chaîne de transmission (figure III.5) intégrant des blocs numériques.

Le point de départ est une information codée en binaire, un modulateur QAM assure ensuite la mise en forme physique des signaux dans la gamme des hyperfréquences.

Ces signaux sont transmis par canal à priori quelconque et parviennent au récepteur sous forme bruité.

Au niveau du récepteur, les signaux captés passent par le démodulateur M-QAM rectangulaire en bande de base.

Puisque le signal reçu est bruité, on doit d'abord estimer les erreurs, et comparer ces derniers avec d'autre type de modulation (PSK) pour voir quelle est la plus avantageuse en termes de performances.

Nous attardons uniquement sur les blocs les plus utiles, en particulier sur ceux dont nous avons eu besoin pour réaliser notre modèle. Des informations approfondies sont disponibles dans le manuel d'utilisateur de Simulink inclus sur MATLAB.

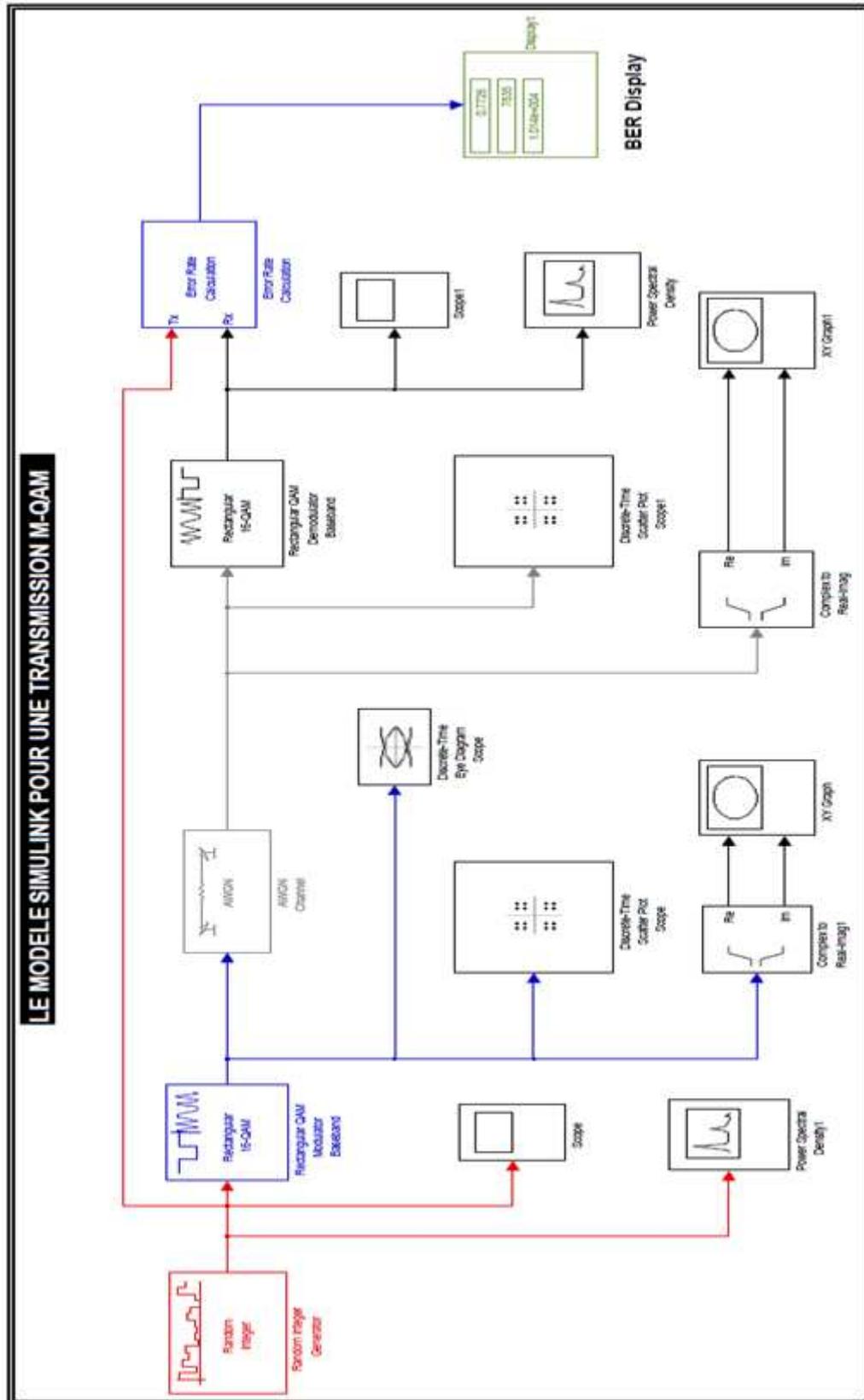


Figure III.5 : Le modèle simulink d'une transmission numérique M-QAM

Les blocs utilisés sont :

#### III.4.1.1 Le bloc « Random Integer Generator » (générateur des nombres entiers aléatoires) :

Ce bloc se trouve dans la sous bibliothèque (comm sources) qu'elle se trouve à son tour dans la bibliothèque (communications blockset), il sert à produire aléatoirement des nombres entiers distribués dans la gamme  $[0, M-1]$  (Figure III.6).

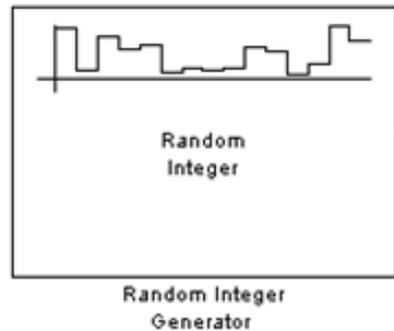


Figure III.6: Le bloc « Random Integer Generator »

La fenêtre de paramètres et boîte de dialogue de ce générateur est montrée à la (Figure III.7)

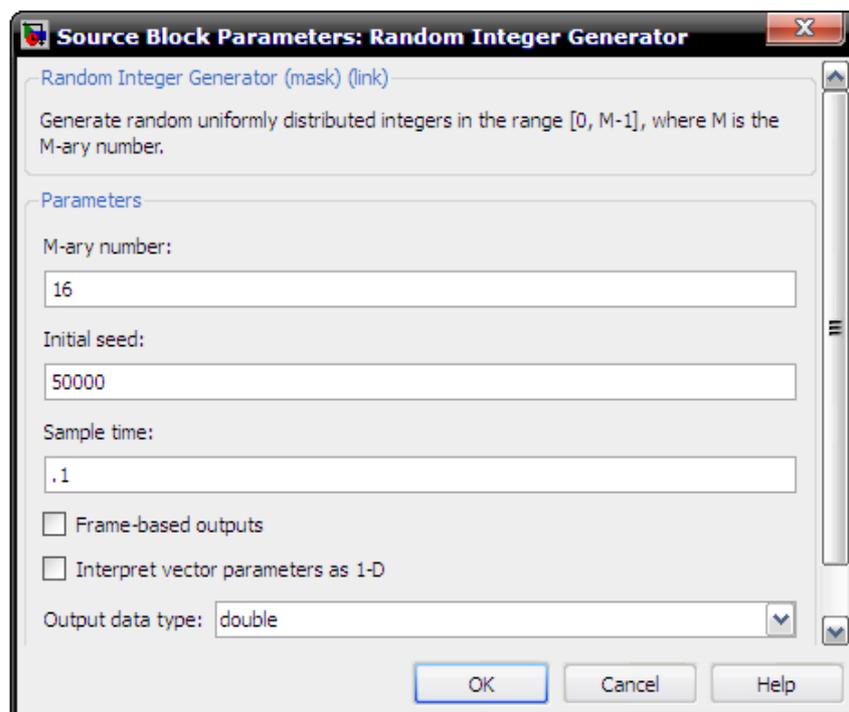


Figure III.7 : boîte de dialogue de bloc générateur des nombres entiers aléatoires

Nous présentons la source comme un générateur des nombres aléatoire de zéro jusqu'à  $M-1$ .

La (figure III.8) nous montre le signal d'entrée généré par la source d'information.

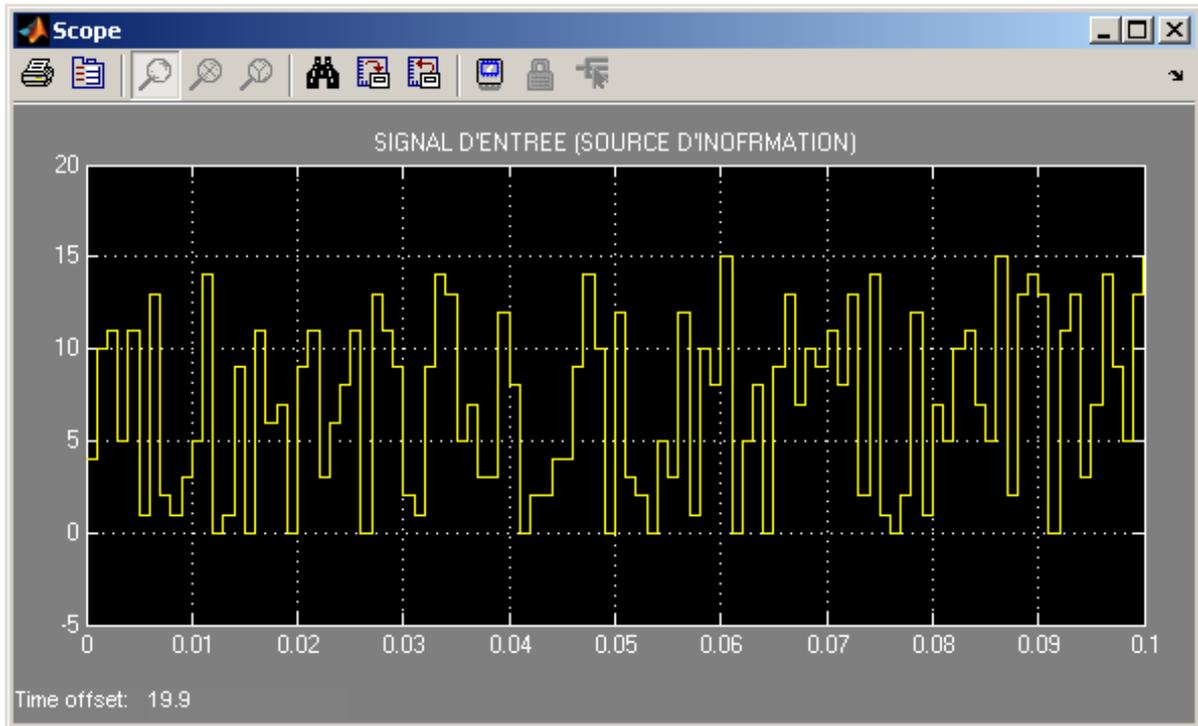


Figure III.8 : la forme du signal d'entrée (source d'information)

#### III.4.1.2 Le modulateur rectangulaire M-QAM en bande de base :

L'opération de modulation a pour but essentiel de transformer le signal numérique en bande de base. Le bloc qui assure cette opération est le modulateur rectangulaire M-QAM en bande de base (figure III.9).

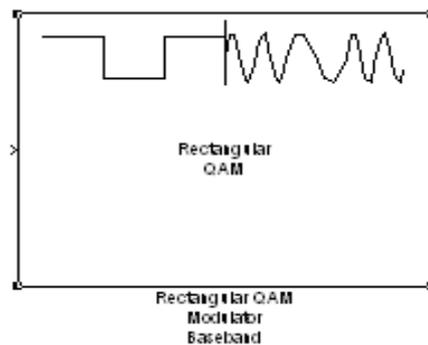


Figure III.9 : le modulateur rectangulaire M-QAM en bande de base

Le type des paramètres d'entrée détermine si le bloc accepte des nombres entiers entre 0 et M-1, ou les représentations binaires des nombres entiers.

**La fenêtre « Paramètres et boîte de dialogue » :**

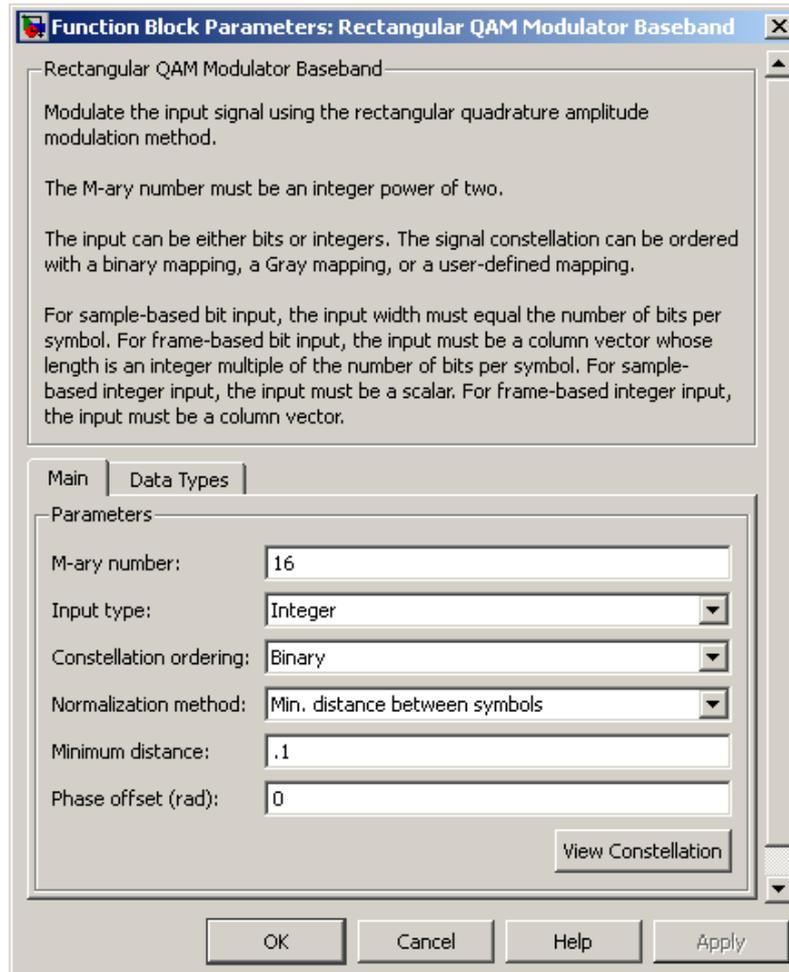


Figure III.10 : paramètre et boîte de dialogue d'un modulateur QAM

Cette fenêtre (figure III.10) contient les paramètres suivants :

- **Le nombre M-aire** : dans notre cas, on a utilisé ; M=16, M=32 et M= 64 pour la QAM
- **Type d'entrée** : Indique si l'entrée se compose des nombres entiers ou des groupes de Bits.
- **La commande de constellation** : détermine comment le bloc trace chaque symbole à un groupe de peu ou de nombre entier de rendement.
- **La méthode de normalisation** : détermine comment le bloc mesure la constellation du signal. Les choix sont distance minimale entre les symboles, puissance moyenne, et puissance de crête.

- **La distance minimale** : La distance entre deux points de constellation les plus proches. Ce champ apparaît seulement quand la méthode de normalisation est placée à la distance minimale entre les symboles.
- **La phase a compensé (rad)** : la rotation de la constellation du signal, en radians.

### III.4.1.3 Canal de transmission (AWGN "Additive White Gaussian Noise" channel):

Selon son contexte, le terme de canal de transmission à des significations différentes. Le canal de transmission (*Figure III.11*) au sens de la propagation est la portion du milieu physique utilisé pour la transmission particulière étudié.

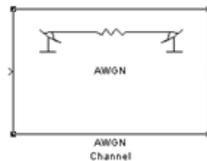


Figure III.11 : Canal de transmission « AWGN channel »

Le bloc d'AWGN ajoute le bruit gaussien blanc à un vrai ou complexe signal d'entrée. Quand le signal d'entrée est vrai, ce bloc ajoute le vrai bruit gaussien et produit un vrai signal de sortie. Quand le signal d'entrée est complexe, ce bloc ajoute le bruit gaussien complexe et produit un signal de sortie complexe. Ce bloc hérite de son temps d'échantillon du signal d'entrée.

**La fenêtre « Paramètres et boîte de dialogue » :**

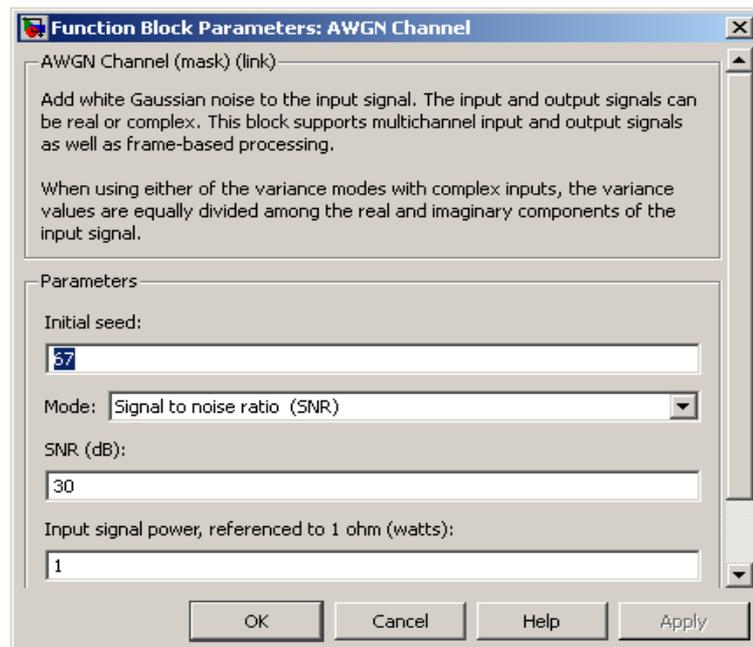
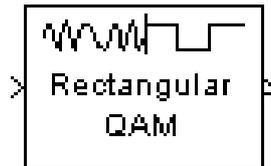


Figure III.12 : La fenêtre de paramètres et boîte de dialogue du bloc « AWGN Channel »

Dans cette fenêtre (*figure III.12*) se trouve un paramètre très important dans la transmission, le rapport signal sur bruit. On peut modifier le SNR depuis cette fenêtre pour voir l'influence de bruit sur le signal utile.

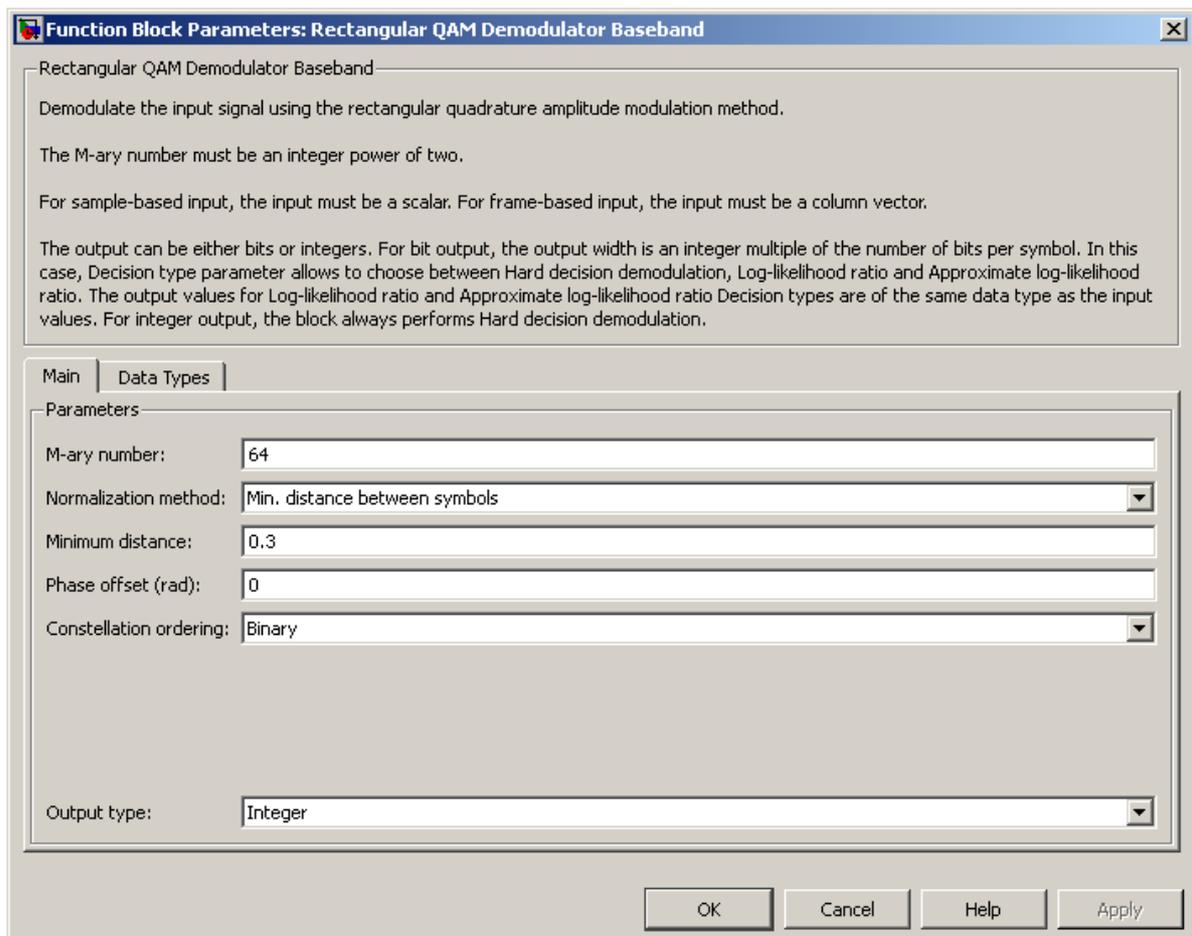
#### III.4.1.4 Le bloc « Rectangular QAM Demodulator Baseband » :

Ce démodulateur possède un oscillateur interne qui génère le signal de la porteuse de référence utilisée pour démoduler le signal. Le bloc est montré à la (*Figure III.13*)



*Figure III.13: Le bloc "Rectangular QAM Demodulator Baseband"*

La fenêtre de paramètres et boîte de dialogue d'un démodulateur QAM est montrée à la (*Figure III.14*).



*Figure III.14 : Boite de dialogue de bloc Rectangular QAM Demodulator Baseband*

### III.4.1.5 Le bloc « Error rate calculation » Calcul du taux de l'erreur :

Ce bloc se trouve à la bibliothèque « Comm Sinks » calcule le taux d'erreur par bit **TEB** ou taux d'erreur par symbole **SER** des données d'entrée. (La Figure III.15)

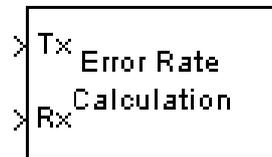


Figure III.15 : Le bloc « Error rate calculation »

Le bloc du calcul du taux de l'Erreur compare les données d'entrée d'un émetteur avec les données d'entrée d'un récepteur.

La fenêtre de paramètres et boîte de dialogue d'un bloc « Error rate calculation » est montrée à la (Figure III.16).

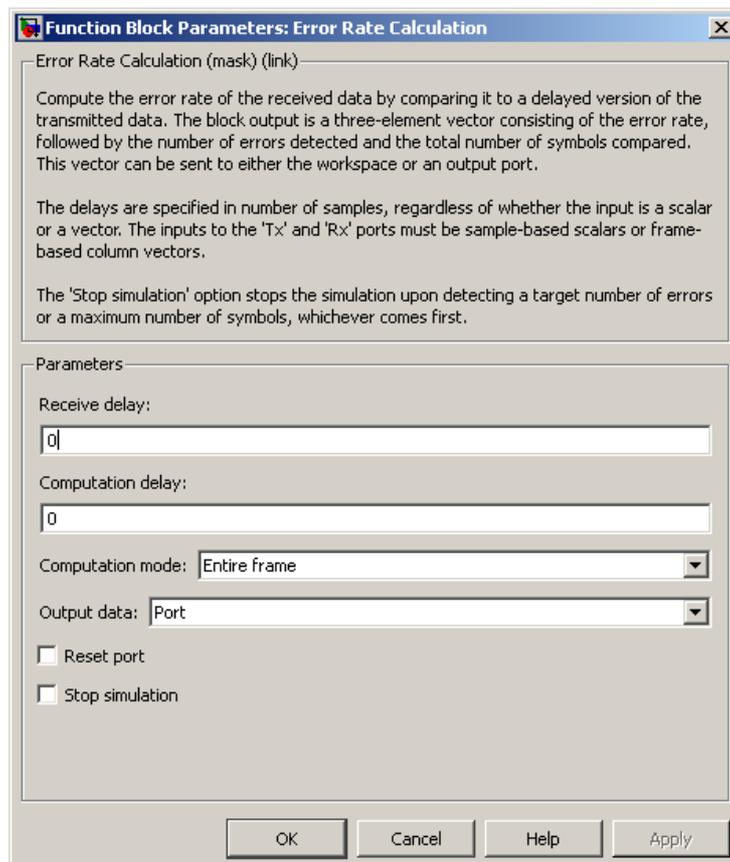


Figure III.16: fenêtre de paramètres et boîte de dialogue de bloc de calcul de taux d'erreur

Dans une transmission numérique, des erreurs peuvent se produire à cause de bruit du canal. Afin de calculer le nombre d'erreurs, on utilise un calculateur qui compare les symboles à la réception avec les symboles à l'émission et donne le nombre total des symboles émis, le nombre d'erreurs et le taux d'erreur par symbole à l'aide d'un dispositif d'affichage « Display » (Figure III.17)

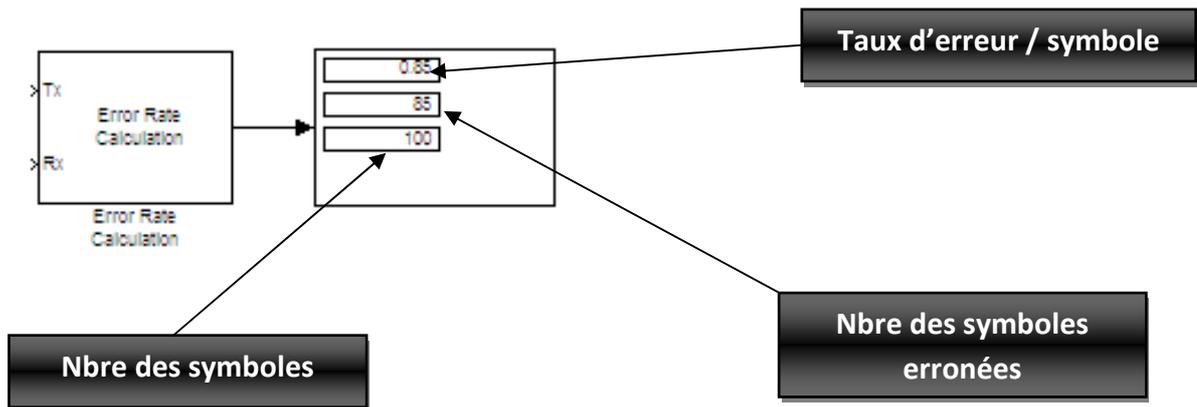


Figure III.17 : calculateur des erreurs

#### III.4.1.6 Les blocs d'affichage :

##### ➤ Le bloc de visualisation "Power Spectral Density" :

Une fois le bloc « Power Density Spectral » (figure III.18) est accroché au rendement d'un système, il nous montre la teneur en fréquence dans la fenêtre graphique.

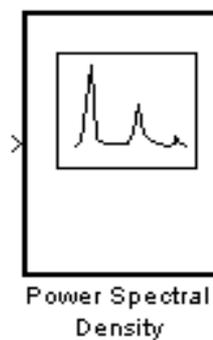


Figure III.18: le bloc "Power Spectral Density"

La fenêtre de paramètres et boîte de dialogue d'un bloc «Power Spectral Density» est illustrée à la (figure III.19).

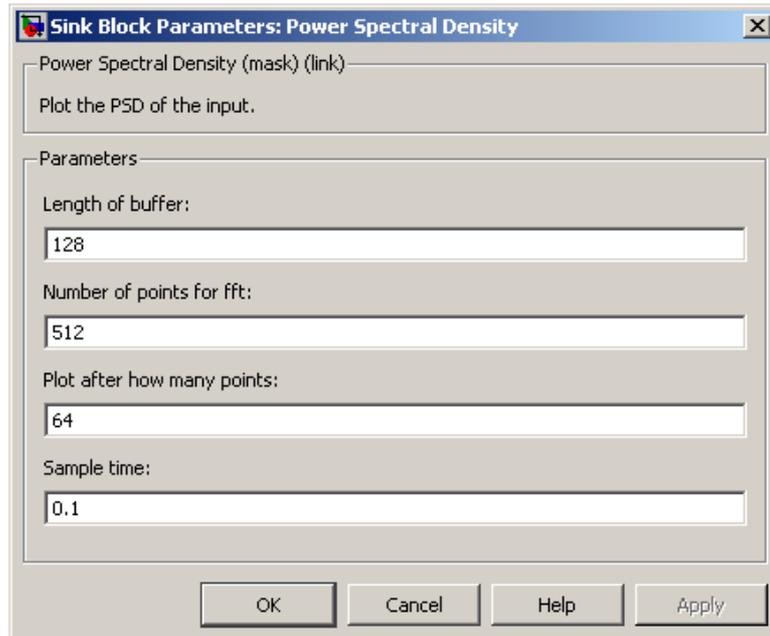


Figure III.19 : La fenêtre de paramètres et boîte de dialogue

➤ **Le bloc « XY Graphe » :**

Montrer le tracé XY des signaux en utilisant la fenêtre des figures de MATLAB (figure III.20).

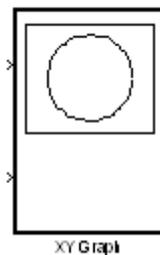


Figure III.20 : Le bloc d'affichage « XY Graph »

Le bloc « X/Y Graph » de graphique accepte de signaux réels des types de données suivants:

- Nombre entier.
- Point fixe avec point mobile.
- Booléen.

La fenêtre de paramètres et boîte de dialogue (*figure III.21*).

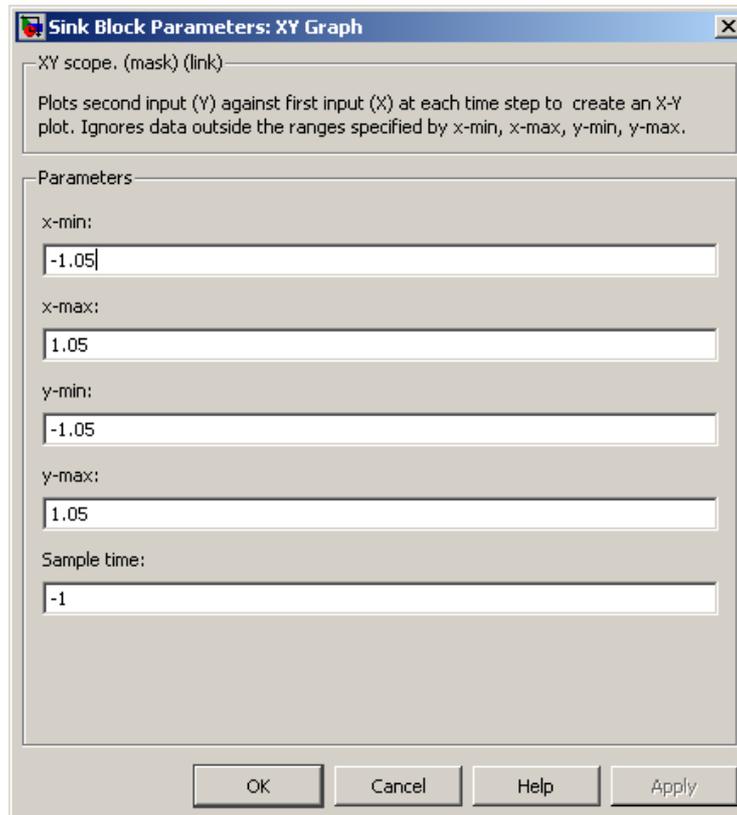


Figure III.21: fenêtre de Paramètre et boîte de dialogue d'un « XY Graphe »

➤ **Le bloc "Discrete-Time Eye Diagram Scope":**

Le bloc d'affichage de diagramme d'oeil (*figure III.22*) montre les traces multiples d'un signal modulé pour produire un diagramme d'oeil.

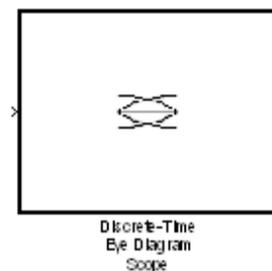


Figure III.22 : le bloc d'affichage «Discrete-Time Eye Diagram Scope»

La fenêtre de paramètre et boîte de dialogue est détaillée par la (figure III.23).

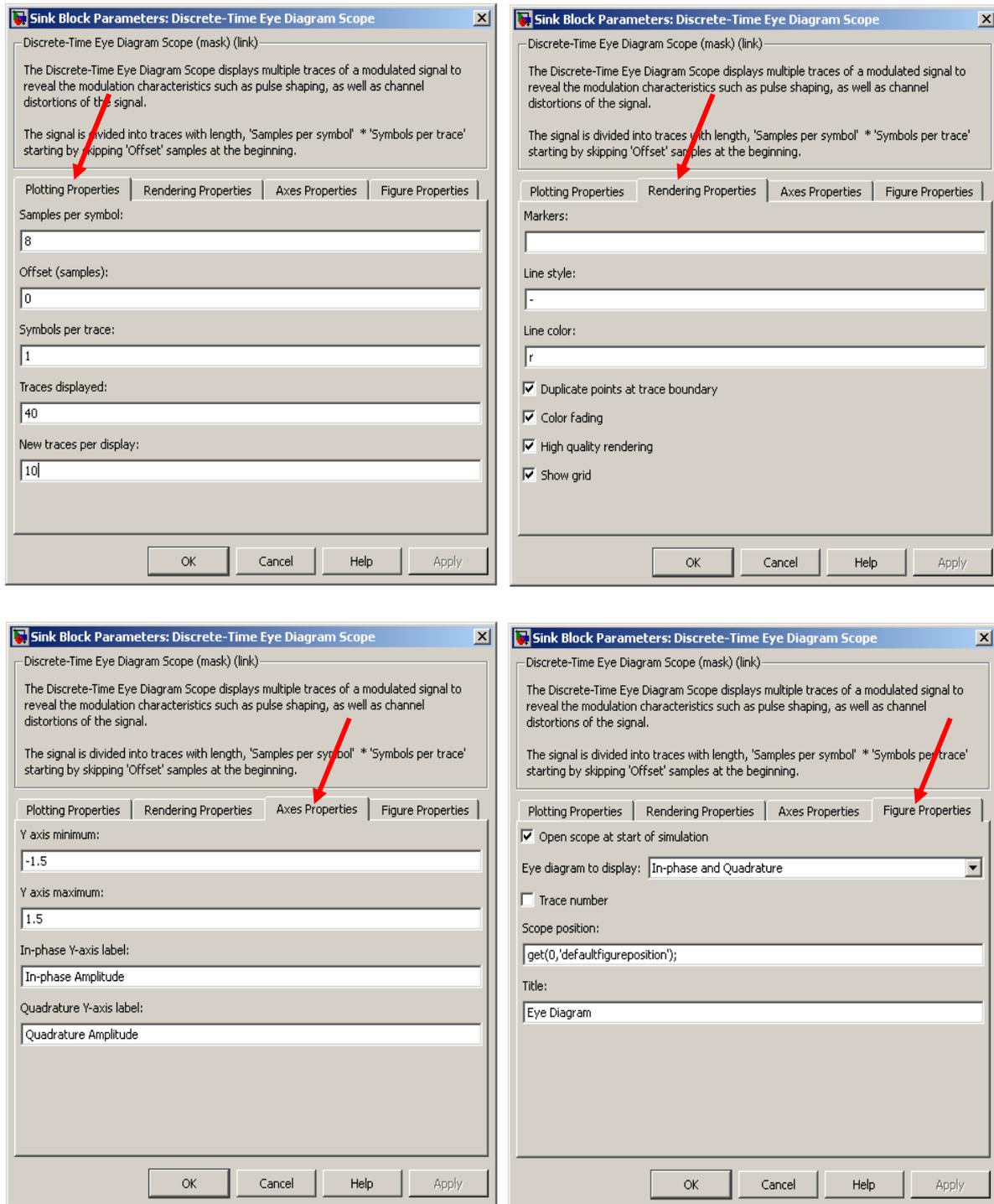


Figure III.23 : fenêtre de paramètre et boîte de dialogue de " Discrete-Time Eye Diagram Scope "

➤ **Le bloc « Display » :**

Le bloc d'affichage « Display » (figure III.24) sert à afficher la valeur de son entrée sur son icône.

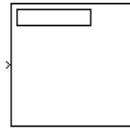


Figure III.24 : le bloc d'affichage «Display»

La fenêtre de paramètre et boîte de dialogue est détaillée par la (figure III.25), elle contient les paramètres de format d'affichage suivants :

- Court
- Longue
- Hexadécimal
- Binaire
- Octal
- décimal

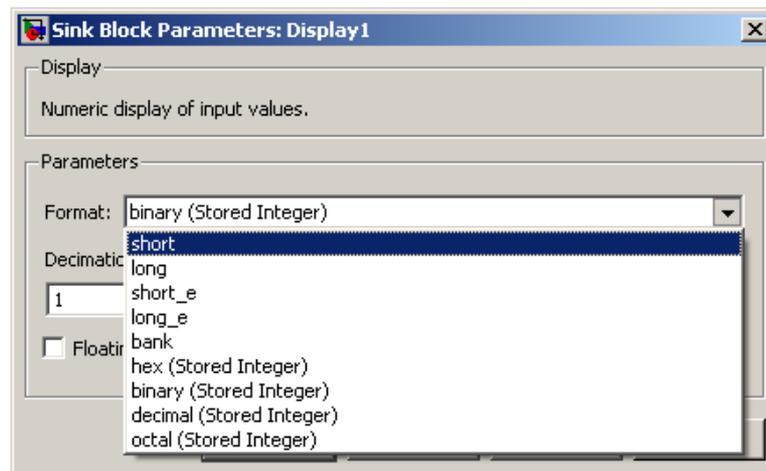


Figure III.25: La fenêtre de paramètre et boîte de dialogue du bloc « Display »

➤ **Le bloc « Scope » (Oscilloscope) :**

Le bloc scope, outil de visualisation du signal, permet de visualiser les signaux en fonction du temps produit pendant la simulation, se trouve dans la librairie « Sinks ».

Il permet la mesure des signaux, la loupe x agrandit l'axe X, la loupe y agrandit l'axe Y, la paire de jumelle permet l'adaptation d'échelle automatique, et l'icône « autoscale » permet d'ajuster les échelles pour voir le signal complet. On y a accès que lors de la simulation. On peut imprimer les résultats. Il est montré à la (figure III.26).

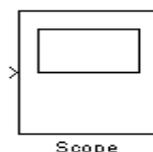


Figure III.26 : Le bloc « Scope »

Celui-ci permet de visualiser les courbes résultant de la simulation et aussi d'enregistrer ces données pour qu'elles soient récupérées dans MATLAB.

-Double- cliquer sur le bloc « Scope ». Une fenêtre s'ouvre (figure III.27) : c'est là que seront affichées les courbes suite à la simulation.

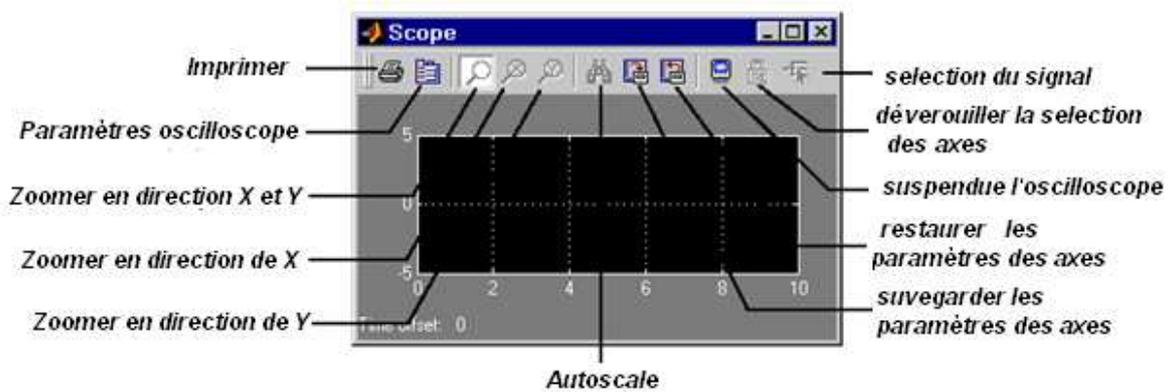


Figure III.27: la fenêtre du « Scope »

Clique droite sur la fenêtre de « scope » pour modifier les propriétés de l'axe Y (figure III.28)

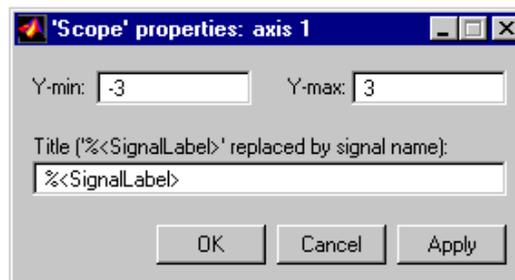


Figure III.28 : boîte de dialogue de propriétés des axes

Il est possible d'avoir plusieurs entrées dans le bloc « Scope ». Pour ce faire, il s'agit de

- Cliquer sur le bouton «**Parameters**» (voir figure III.27).
- Aller dans les deux onglets «*General Data History*» (figure III.29 et figure III.30),
- Sélectionner «**Save data**» to workspace,
- Au besoin, modifier le nom de variable «Scope Data» pour le nom voulu,
- Choisir le format «*Array*»,
- Cliquer sur l'onglet «**General**» et configurer les paramètres du bloc Scope suivant la (figure II.26).
- Cliquer sur le bouton **OK** pour confirmer.

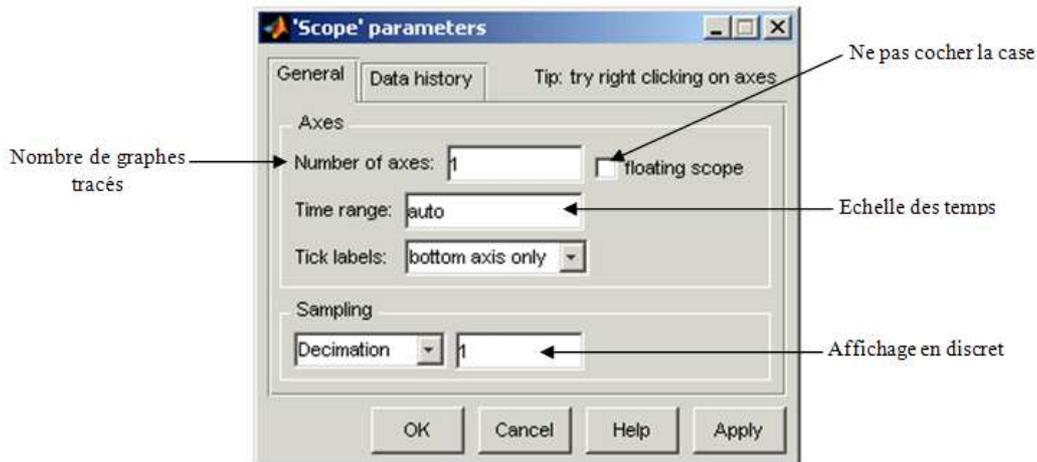


Figure III.29 : onglet permettant d'ajuster les paramètres du « Scope »

L'oscilloscope « Scope » ne conserve que les dernières données de la simulation. Il est possible de fixer le nombre de points conservés en l'indiquant à la suite de la mention «**Limit data points to last**» de la fenêtre «**Data History**» (figure III.30). Par défaut, le nombre de points est fixé à 5000, ce qui s'avère généralement adéquat.

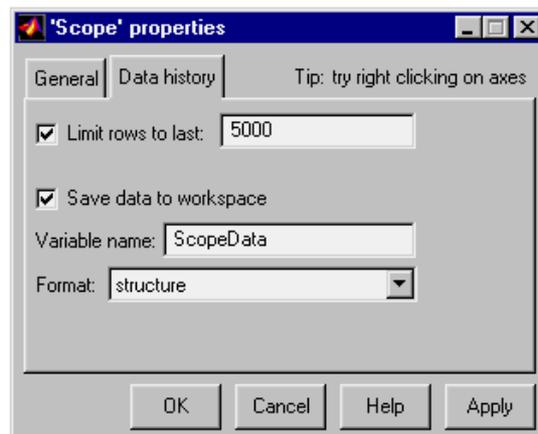


Figure III.30 : onglet permettant d'ajuster les paramètres du « Scope »

### III.4.2 Le model simulink M-PSK :

La simulation du modèle M-PSK est effectuée pour les cas suivants :

- Avec un SNR = 10 dB
  - 16-PSK
  - 32-PSK
  - 64-PSK
- Avec un SNR = 30 dB
  - 16-PSK
  - 32-PSK
  - 64-PSK

Le modèle M-PSK conçu pour la simulation est le même que le modèle précédent (figure III.31).

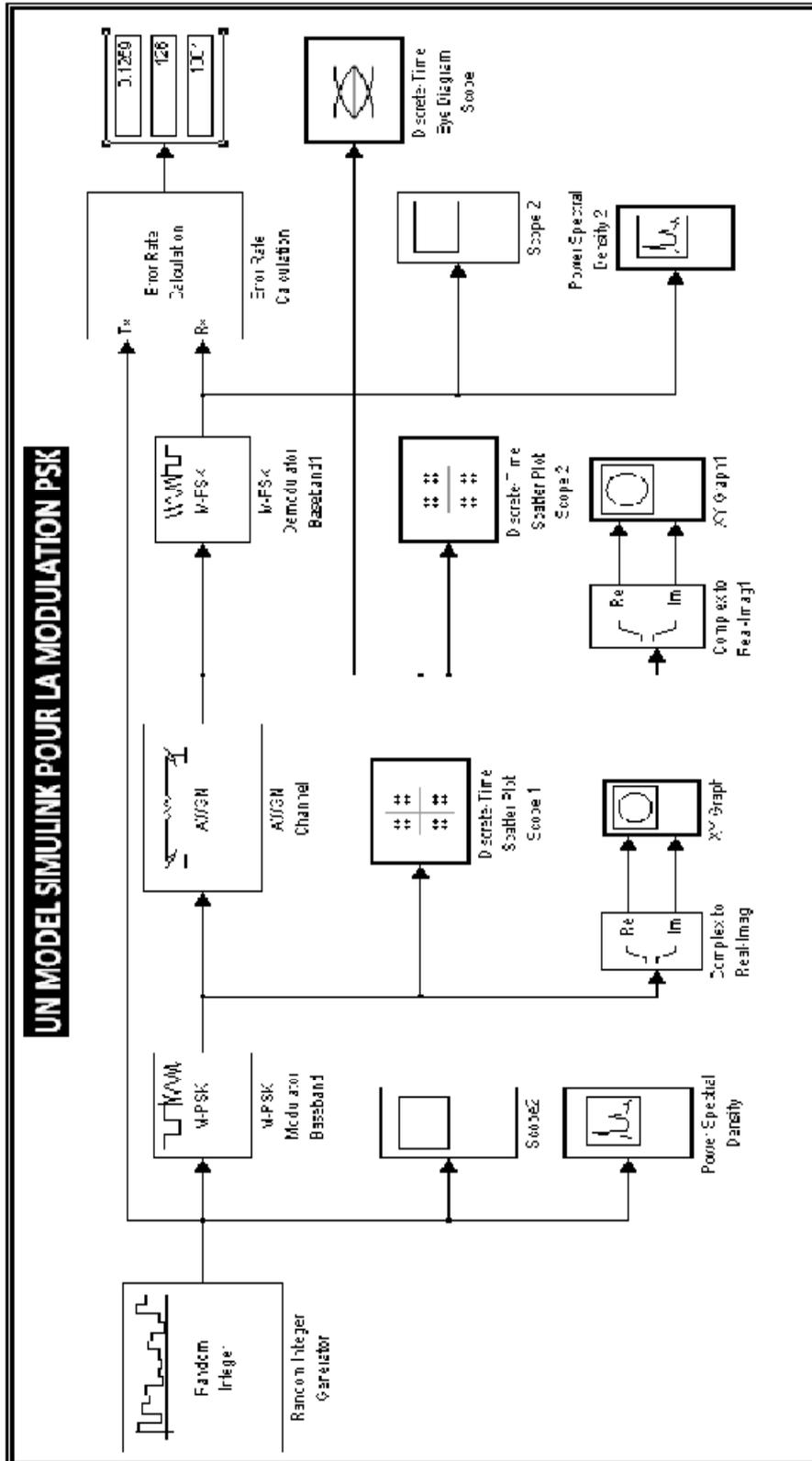


Figure III.31 : le model simulink pour la modulation M-PSK

Les blocs utilisés dans ce model sont les mêmes que le model sauf les blocs de modulation et de démodulation.

#### III.4.2.1 Le bloc « M-PSK Modulator Baseband » :

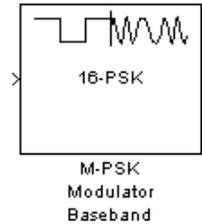


Figure III.32 : le démodulateur rectangulaire QAM en bande de base

Le bloc de modulateur M-PSK (Figure III.32) est un module qui suit la méthode de saisie de déphasage de M-aire. Le rendement est une représentation de bande de base du signal modulé. Le paramètre de nombre de M-aire, est le nombre de points dans la constellation de signal.

La fenêtre de Paramètres et boîte de dialogue d'un modulateur M-PSK est montrée sur (la figure III.33).

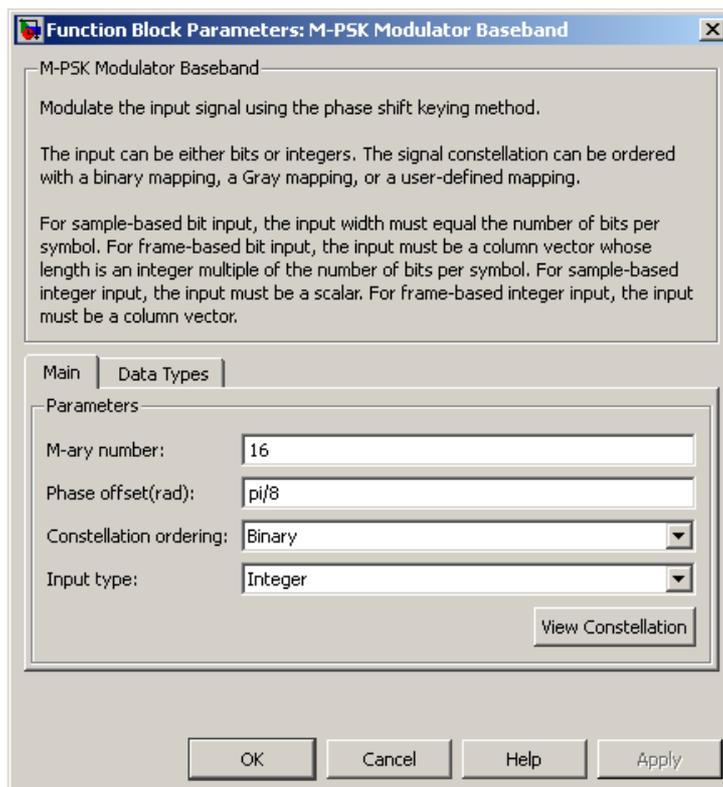


Figure III.33 : fenêtre de paramètre et boîte de dialogue

### III.4.2.2 Le bloc « M-PSK Demodulator Baseband »:

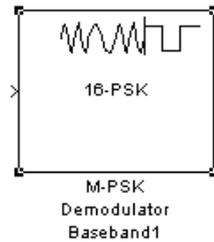


Figure III.34: le bloc « Demodulator Baseband »

Le bloc de démodulateur de M-PSK (figure III.34) démodule un signal qui a été modulé suivant la méthode de saisie de déphasage de M-aire. L'entrée est une représentation de bande de base du signal modulé. L'entrée et le rendement pour ce bloc sont des signaux de temps discret. Le paramètre de nombre de M-aire, est le nombre de points dans la constellation de signal.

La fenêtre de Paramètres et boîte de dialogue d'un démodulateur M-PSK est montrée sur (la figure III.35).

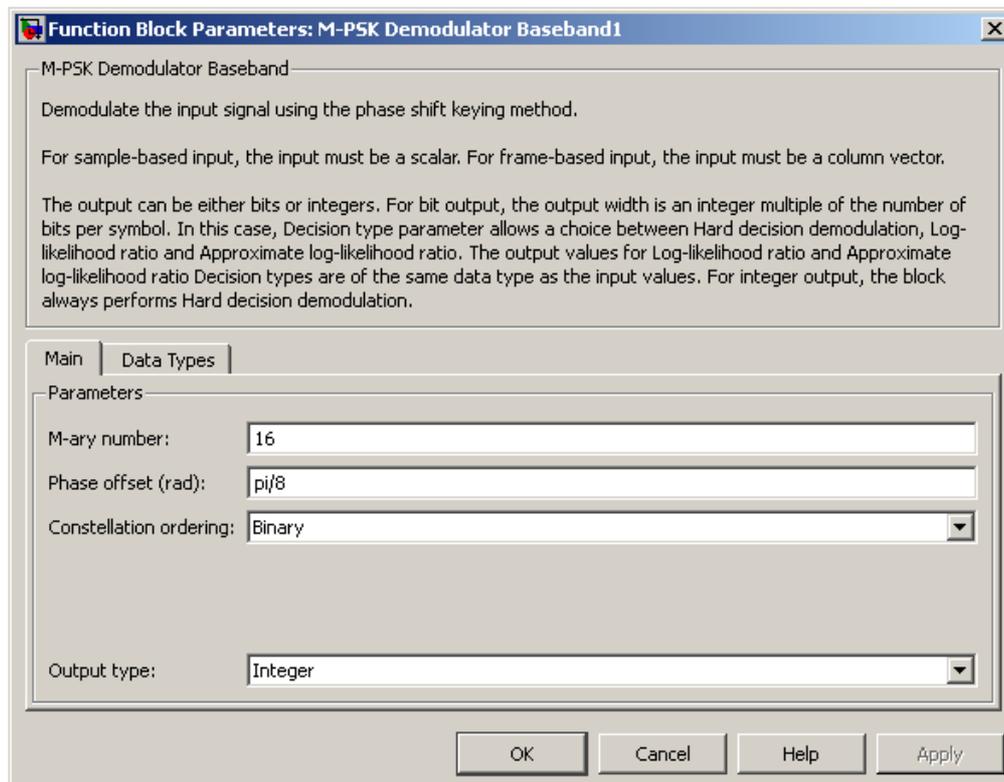


Figure III.35 : fenêtre de paramètre et boîte de dialogue

**III.5 CONCLUSION :**

Nous avons trouvé que Simulink est un outil de modélisation et de simulation facile avec une grande efficacité, où un bloc peut remplacer l'écriture d'un programme qui peut être compliqué, avec la possibilité de visualisation à n'importe quelle point du modèle.

La simulation est la partie la plus délicate dans ce projet, grâce à la complexité et parfois l'impossibilité d'optimiser simultanément tous les paramètres, facteur de bruit, sensibilité, le taux d'erreur.

Pour avoir des résultats de simulation plus réels et avec un minimum d'erreur, il faut d'abord bien définir l'intervalle de temps de simulation, cela permet d'interpréter le problème à résoudre avec une manière très proche de la réalité.

### IV.1 INTRODUCTION :

Avant, la simulation jouait un rôle important dans la conception, l'analyse et l'implémentation des systèmes de communication.

Maintenant, elle est principalement utilisée pour vérifier le bon fonctionnement des systèmes, évaluer les performances et obtenir des spécifications pour guider la conception, les premières simulations étaient pour orienter vers le système à cout et risque élevé.

Actuellement, les simulations réalisées par des logiciels d'analyse de données est une technologie d'affichage puissante comme le logiciel Simulink, donnent la possibilité de voir les résultats de la conception selon la manière choisie, ce qui permet la manipulation des données en utilisant des expression faites sur commande, de voir les résultats dans différents types de graphes et de modifier les caractéristiques, et ce sans avoir a refaire la simulation.

Il est même possible de voir la mise à jour des graphes en temps réel. Tout cela induit a une bonne analyse des performances du système d'une façon partielle ou bien complète.

Pour ce qui concerne cette simulation, la collecte des données est effectuée par des composantes qui sont disponibles dans les bibliothèques simulink.

Pour l'analyse spectrale, temporelle, numérique, et le calcul de BER, nous utilisons respectivement les composantes (power spectral density), (scope) et le (Bit Error Rate Analysis Tool), de la bibliothèque Sinks. Et pour le tracé de diagramme de l'œil, et la constellation, nous utilisons respectivement les composantes (Discrete-Time Eye Diagram Scope), (Discrete-Time Scatter Plot Scope), de la bibliothèque (Communication Sinks).

### IV.2 CAHIER DE CHARGES :

Les types de modulations étudiées dans ce projet sont généralement utilisés dans les modems ADSL. Pour cela, on va prendre en considération les caractéristiques d'une transmission ADSL, pour voir l'influence de changement des paramètres d'entrée (rapport signal sur bruit, M-aire, distance minimale en les points de constellation,...) sur les performances d'une transmission numérique M-QAM.

La (figure IV.1) affiche les différentes modulations QAM qui sont utilisées par les modems ADSL. (4-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM).

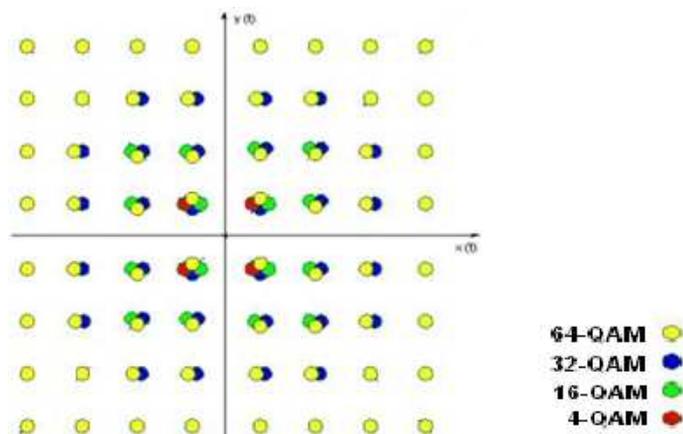


Figure IV.1 : les modulations QAM utilisés par les modems ADSL

- Exemple d'un type de modem ADSL utilisé :
  - La largeur d'un canal destiné aux données large bande est comprise entre 25 KHz et 1.1 MHz. Chacune des porteuses peut être modulée de 0 à 15 bits/s par Hz, ce qui permet un débit de 64 Kbps pour chacun de ces canaux de transmission.

Aujourd'hui, l'ADSL offre des débits allant jusqu'à 20 Mbps, soit près de 40 fois plus que l'ADSL première génération.

Toute dégradation du rapport signal sur bruit SNR dans une bande de fréquence donnée, perturbe la qualité de l'ensemble du canal donc réduit la capacité globale de l'accès. Cette diminution de la capacité revient à diminuer d'un bit la taille du symbole de la constellation, c'est à dire à réduire par deux les performances. Pour cette raison, on va changer ce rapport et voir le comportement de notre modèle dans différents cas.

### IV.3 CONFIGURATION DES BLOCS :

*Remarque : les paramètres que nous venons de citer ne changent pas pour les trois cas de figure (16-QAM, 32-QAM et 64-QAM)*

#### IV.4.1 Paramètres de générateur :

- Initial seed : 50000
- Sample Time (temps échantillonnage) :  $1/64 \cdot 10^3$

#### IV.4.2 Paramètres de modulateur :

- Input type : « Integer »
- Constellation Ordering : « Binary »
- Normalization method : "Min, distance between symbols"
- Minimum distance: 0.1- 0.3
- Phase offset: 0

#### IV.4.3 Parameters du canal "AWGN":

- Rapport Signal sur Bruits (SNR): de 10 dB à 30 dB.
- Mode : Signal to Noise Ratio (SNR)
- Input signal power, referenced to 1 ohm (watts): 1

#### IV.4.4 Le temps de simulation est choisi pour 0.05 sec.

**Remarque :** il faut que le temps de simulation soit supérieur au temps d'échantillonnage (*sample time*) pour qu'elle nous donne des résultats plus proches de la réalité.

### IV.4 FIGURES ET RESULTATS DE SIMULATION :

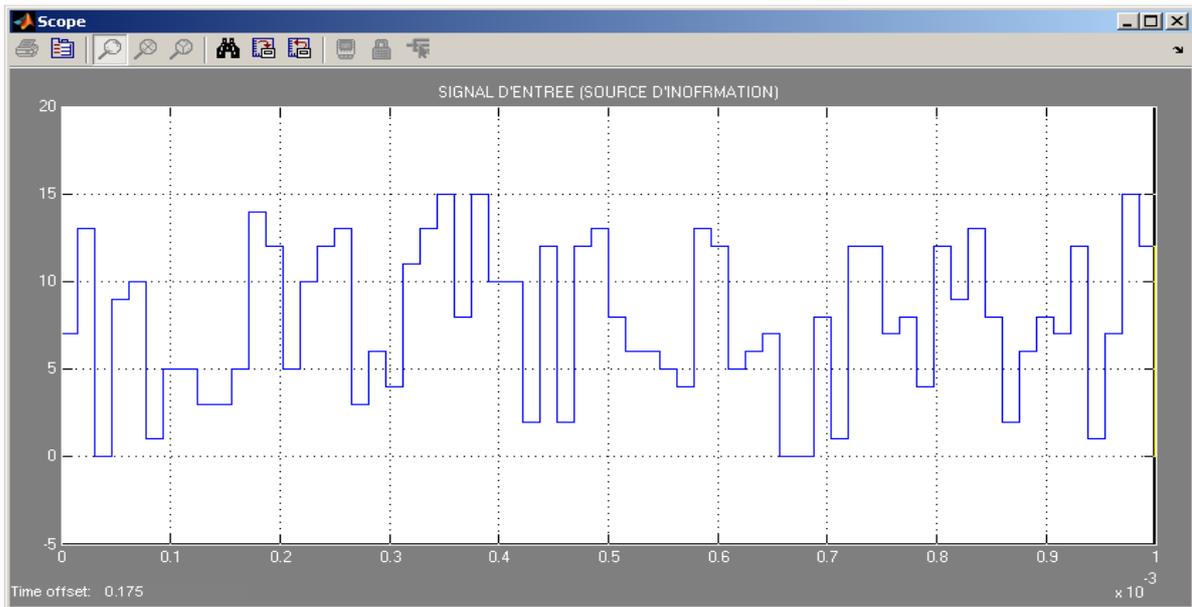
Les résultats de la simulation sont donnés pour les trois cas choisis de M-aire, 16,32 et 64.

#### IV.4.1 Simulation M-QAM :

##### IV.4.1.1 La 16-QAM :

La figure IV.2 affiche le signal d'entrée (l'information à moduler).

Ce signal est généré par le générateur aléatoire.



La figure IV.2: forme du signal à moduler

La (figure IV.3) nous montre la densité spectrale de puissance avant et après la modulation.

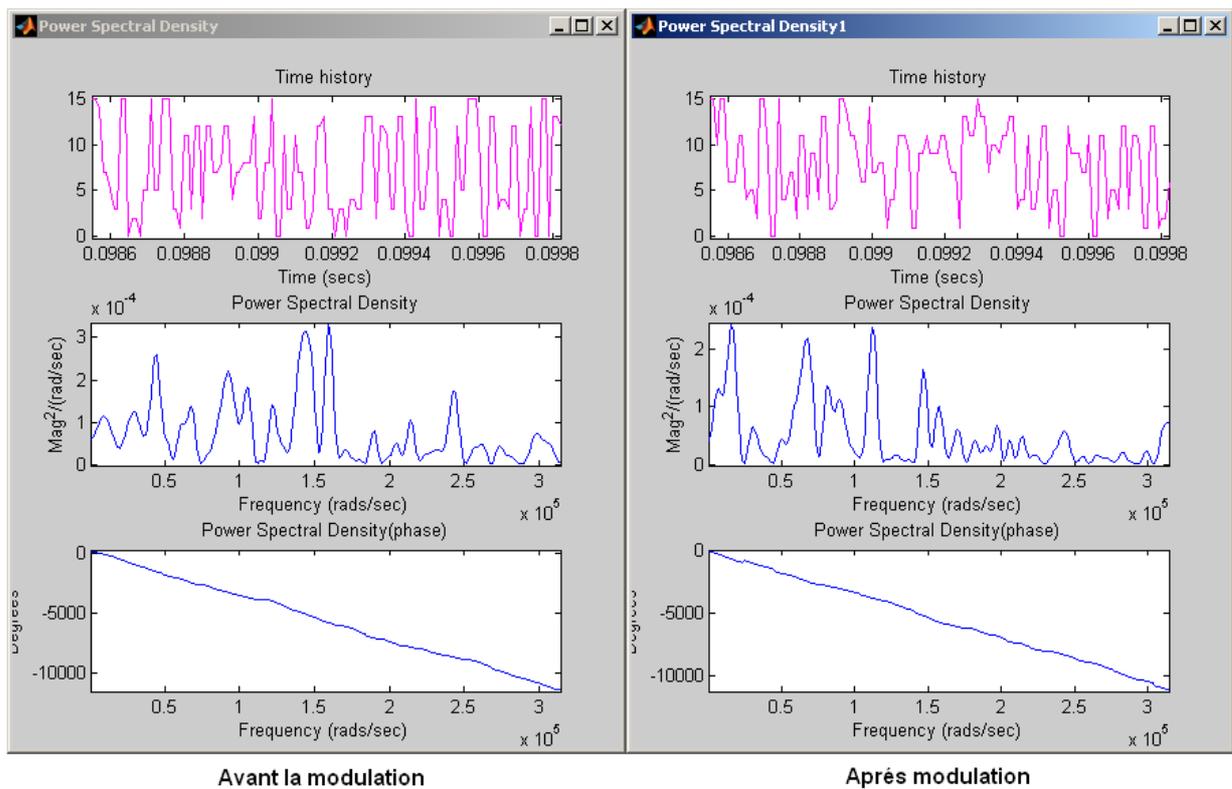


Figure IV.3 : La densité spectrale de puissance avant et après la modulation

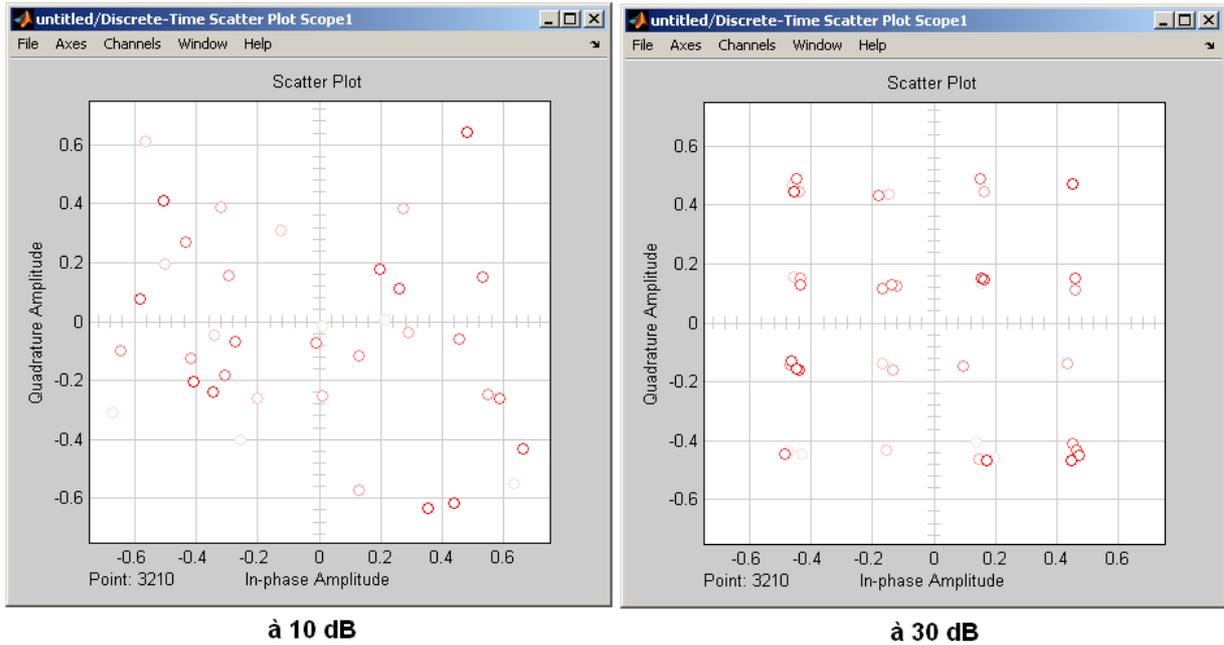
On a augmenté le SNR de 10 à 30 dB, et on a remarqué qu'il n'y a pas d'influence sur la densité spectrale dans ce cas ( $M = 16$ ).

La figure IV.4 affiche les points de constellation pour la 16-QAM dans les deux cas suivants :

- Pour SNR = 10 dB.
- Pour SNR = 30 dB.

On remarque que :

le bruit influe sur les points de constellation. Plus le bruit augmente, plus le signal devient difficile à décoder.



La figure IV.4 constellations des points du signal modulé

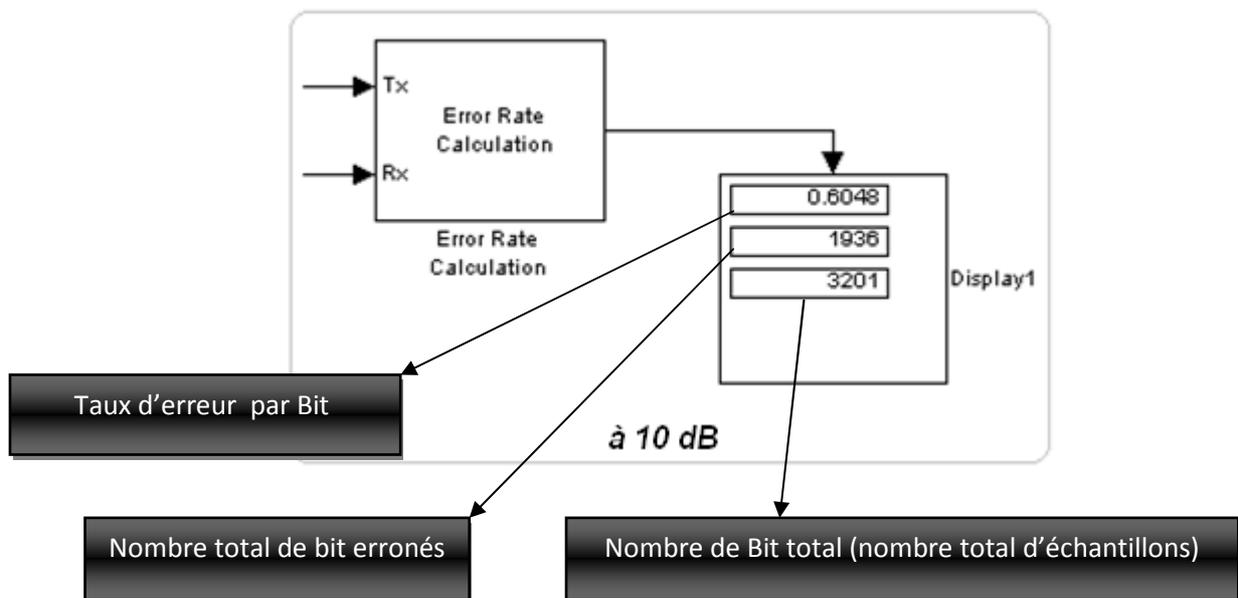
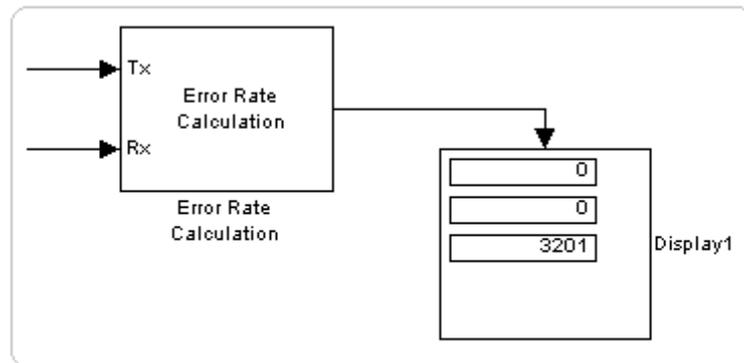


Figure IV.5 : Affichage de TEB pour la 16-QAM à 10 dB



**TEB à 30 dB**

Figure IV.6 : Affichage de TEB pour la 16-QAM à 10 dB

On remarque qu'avec un SNR égal à 10 dB, l'affichage du TEB (figure IV.5) nous indique qu'il y'a des bits erronés. Alors que, si on augmente le SNR à 30 dB, on remarque qu'il n'y a pas d'erreur à la réception, ce qui est normal car le bruit est négligeable et n'influe pas sur le canal.

#### IV.4.1.2 La 32-QAM :

La représentation de l'information sur la figure IV.7 pour la 32-QAM.

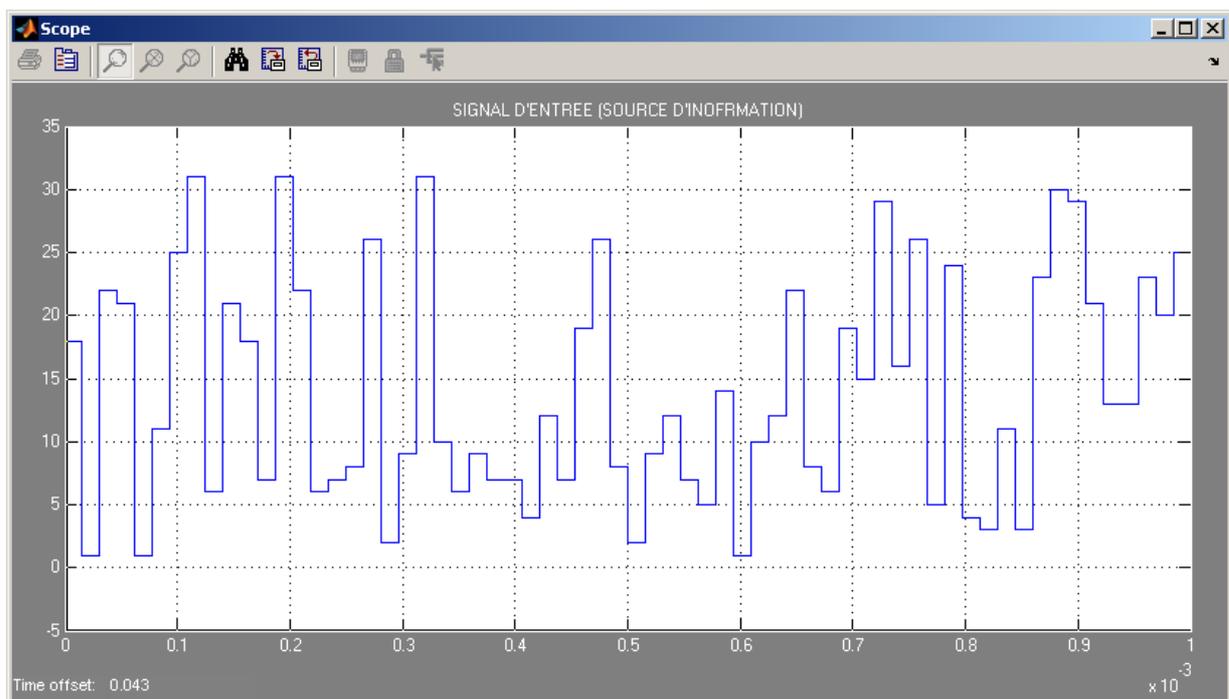


Figure IV.7: forme du signal à moduler (l'information)

La figure IV.8 représente la densité spectrale de puissance avant et après la modulation.

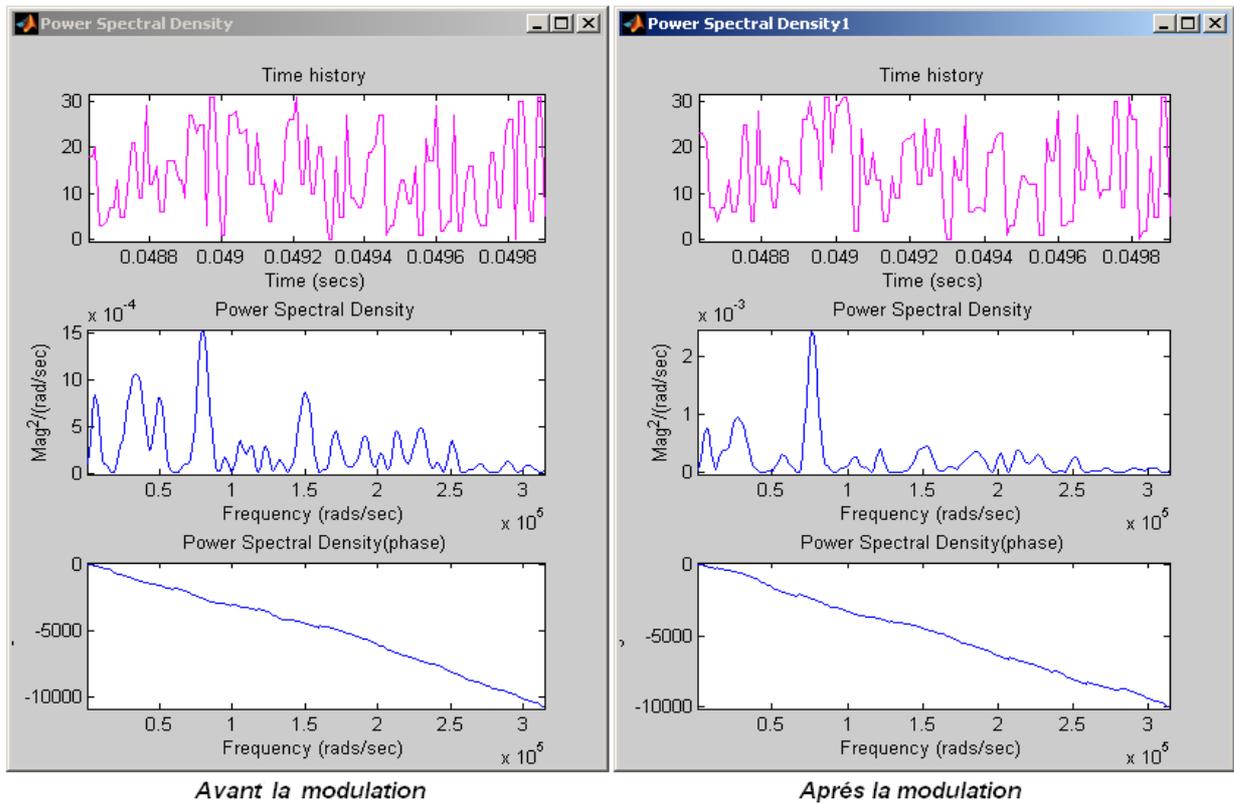


Figure IV.8 : La densité spectrale de puissance avant et après la modulation

Les points de la constellation dans les deux cas (figure IV.9) nous indique qu’il y’a un petit changement de la distance minimale, dû à l’augmentation du nombre des points (M-aire). Mais, il est plus facile de récupérer l’information, car le bruit est diminué et il n’a pas influé beaucoup sur le canal.

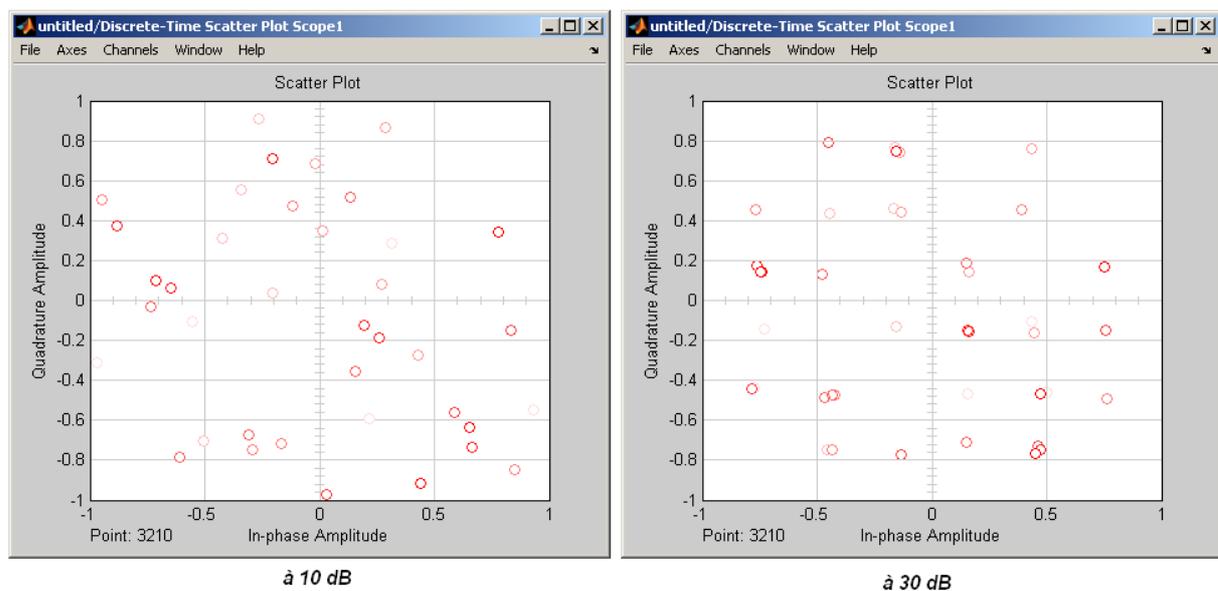


Figure IV. 9 : les constellations des points du signal modulé pour la 32-QAM

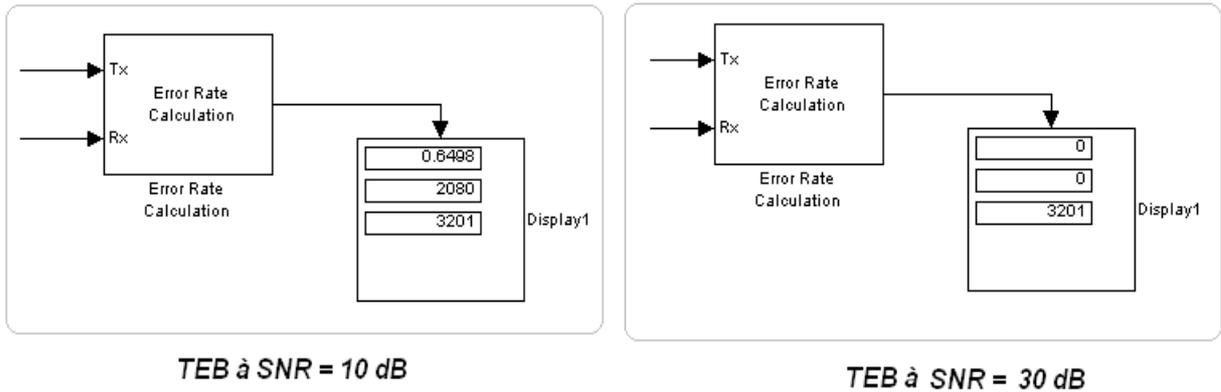


Figure IV.10 : Affichage de taux d'erreur binaire à 10 dB et à 30 dB pour la 32-QAM

On remarque toujours que le taux d'erreur binaire est nul si on diminue le bruit (figure IV.10).

**IV.4.1.3 La 64-QAM :**

Le signal d'entrée est représenté par la figure IV.11.

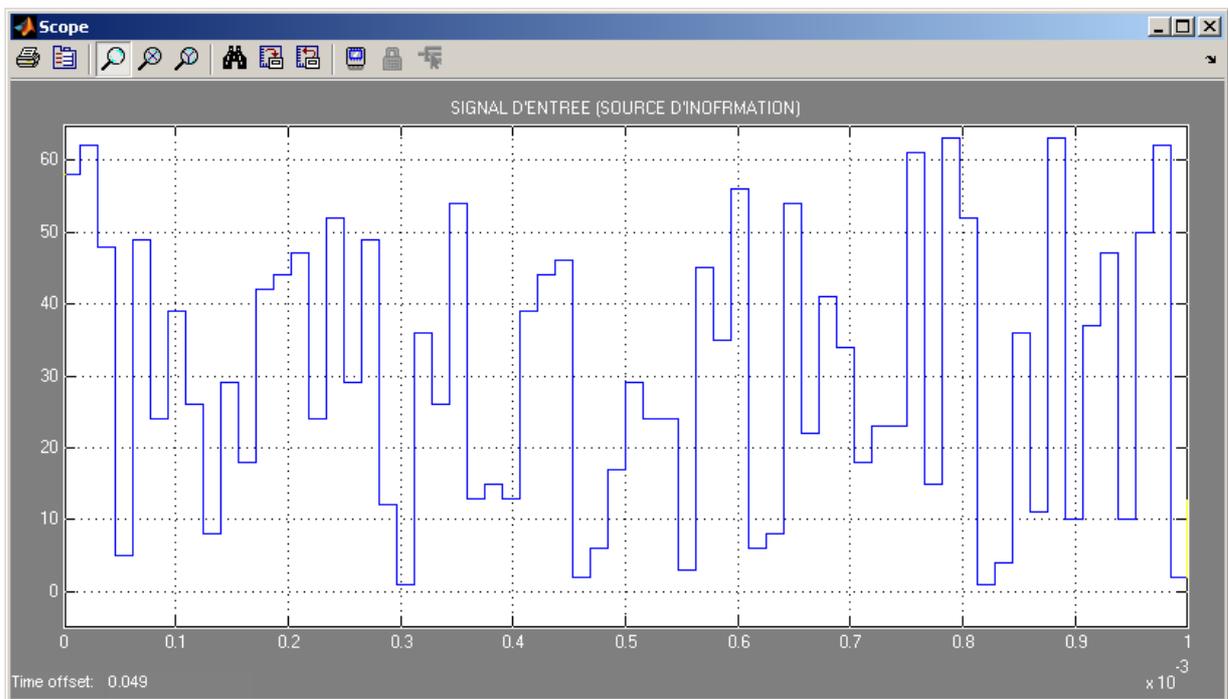


Figure IV.11 : Forme du signal d'entrée pour la 64-QAM

Il apparaît bien à la figure IV.12 que la constellation des points pour un SNR de 10 dB est bruitée et il est difficile d'extraire l'information.

Mais avec un SNR égal à 30 dB, la constellation des points n'est pas beaucoup bruitée mais il est moins facile de décoder le signal qu'une 16-QAM ou 32-QAM car la distance entre les points est minimale.

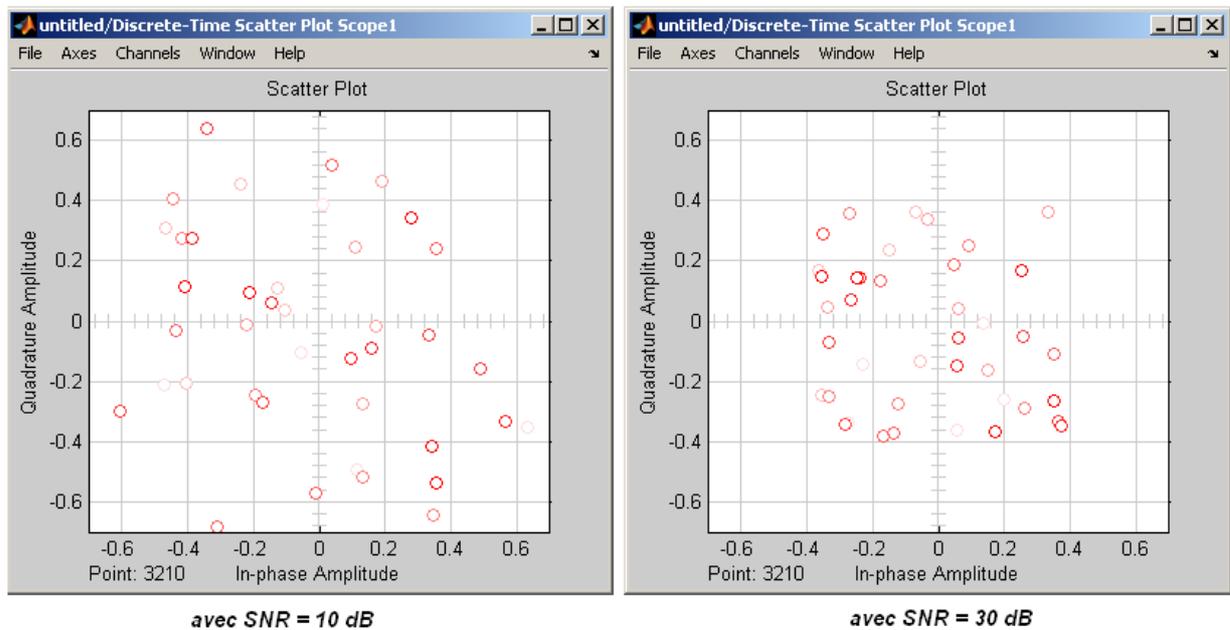


Figure IV.12 : Les constellations des points du signal modulé pour la 64-QAM

En comparant la figure IV.13 avec la figure IV.14 on remarque que les erreurs dans les bits diminuent avec diminution de bruit.

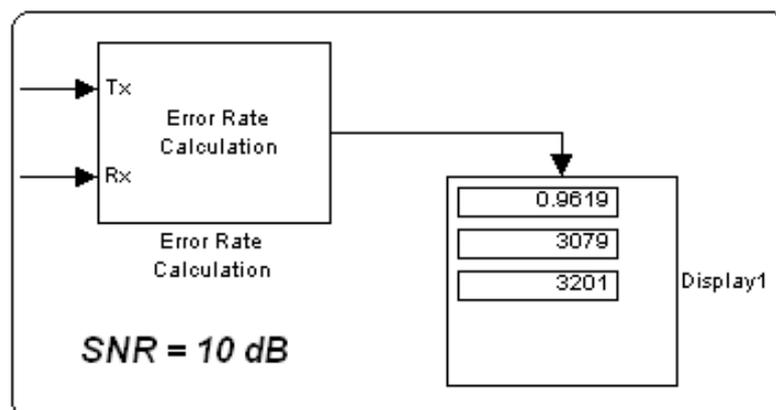


Figure IV.13 : Affichage du TEB pour un SNR de 10 dB

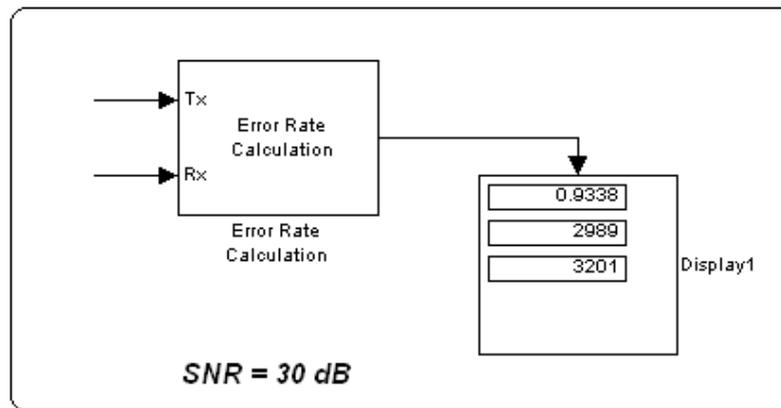


Figure IV.14 : Affichage du TEB pour un SNR de 30 dB

#### IV.4.2 Simulation M-PSK :

##### IV.4.2.1 16-PSK :

A propos du signal d'entrée (source d'information) est le même que le modèle QAM-M précédent, ceci est valable pour les trois cas de figures étudiés.

La *figure IV.15* nous donne une vue comparative entre les deux cas de SNR pour la constellation des points de la 16-PSK.

On voit clairement la différence entre les deux cas, pour une valeur du SNR égal à 30 dB ; le signal est presque non bruité plus les points sont distants entre eux, ce qui facilite la récupération de l'information.

Alors que le signal à 10 dB du SNR est beaucoup bruité et déformé.

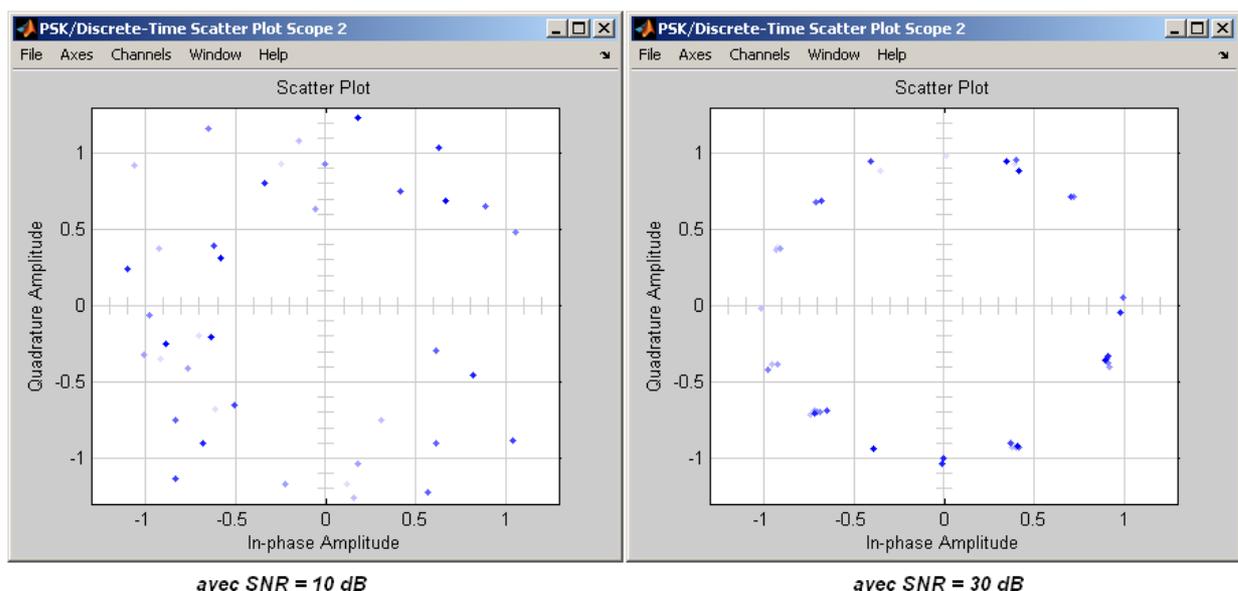


Figure IV.15 : La constellation des points pour la 16-PSK

La *figure IV.16* indique la fenêtre d'affichage de la densité spectrale de puissance, d'après cette figure, on remarque qu'il y'a un décalage du lobe principale due à la présence du bruit.

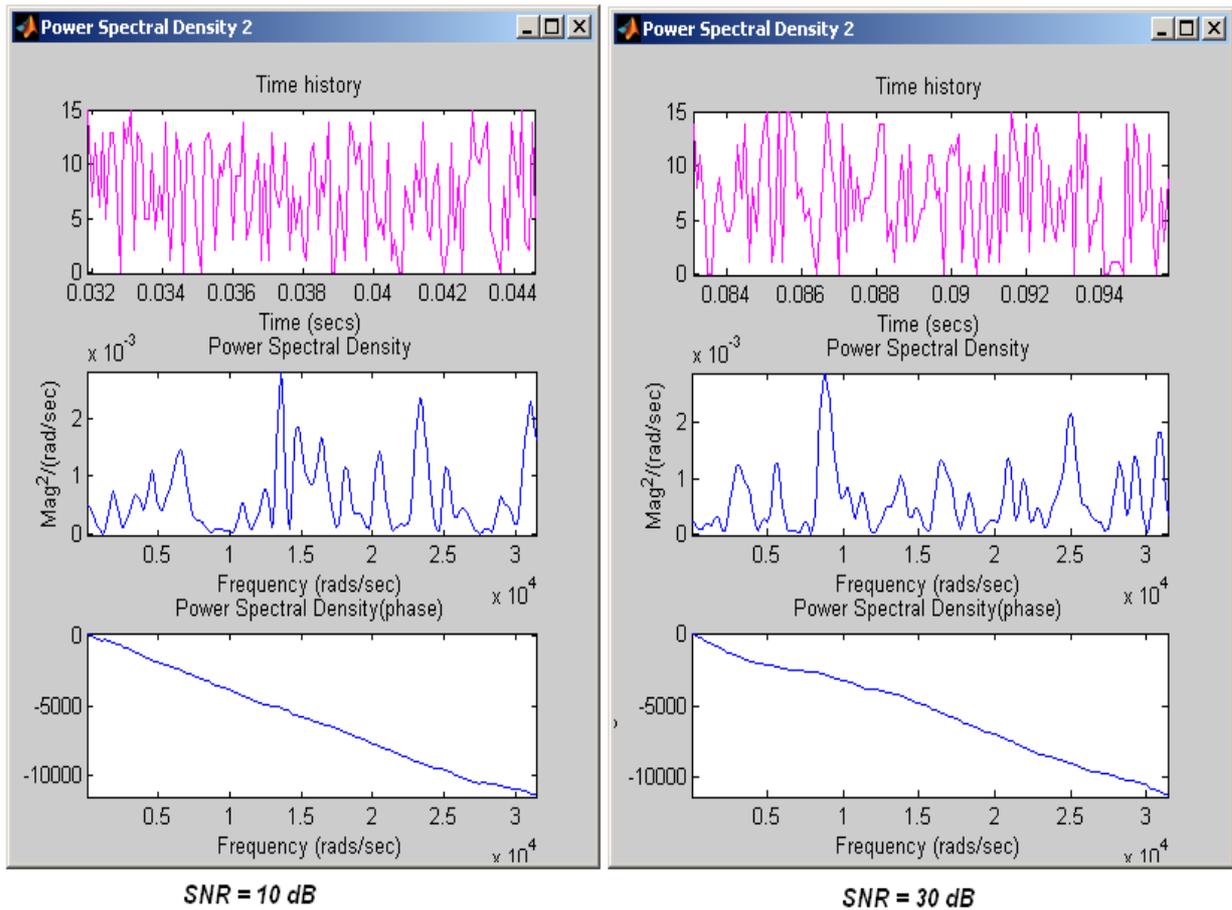


Figure IV.16 : La densité spectrale de puissance de la 16-PSK pour un SNR de 10dB et 30dB

Pour l'affichage de taux d'erreur binaire (*figure IV.17*), on n'a pas d'erreur sur la réception avec un SNR de 30 dB par contre avec un SNR de 10 dB, on trouve pas mal de bit erronés.

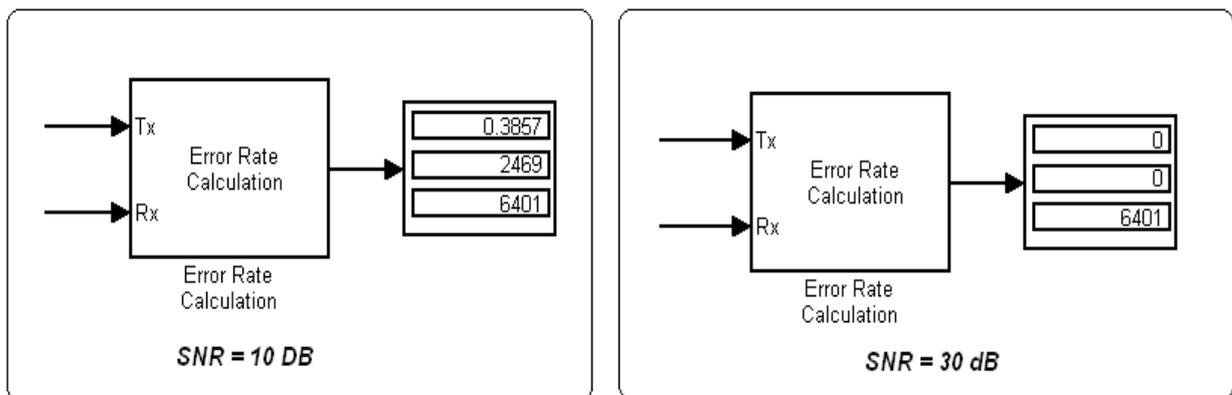


Figure IV.17 : Affichage de  $TEB_{10dB}$  et  $TEB_{30dB}$

IV.4.2.2 32-PSK

La figure IV.18 nous montre la différence entre les deux cas de SNR pour la constellation des points de la 32-PSK.

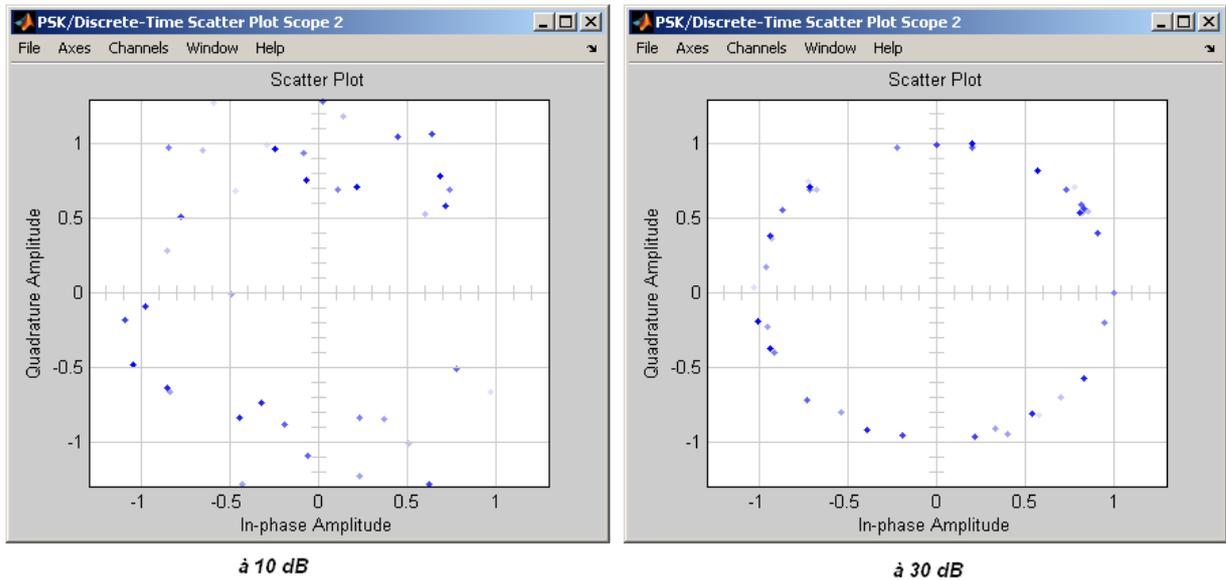


Figure IV.18 : La constellation des points pour la 32-PSK dans les deux cas du SNR

La figure IV.19 affiche la densité spectrale de puissance pour la 32-PSK dans les deux cas, à 10 dB et à 30 dB.

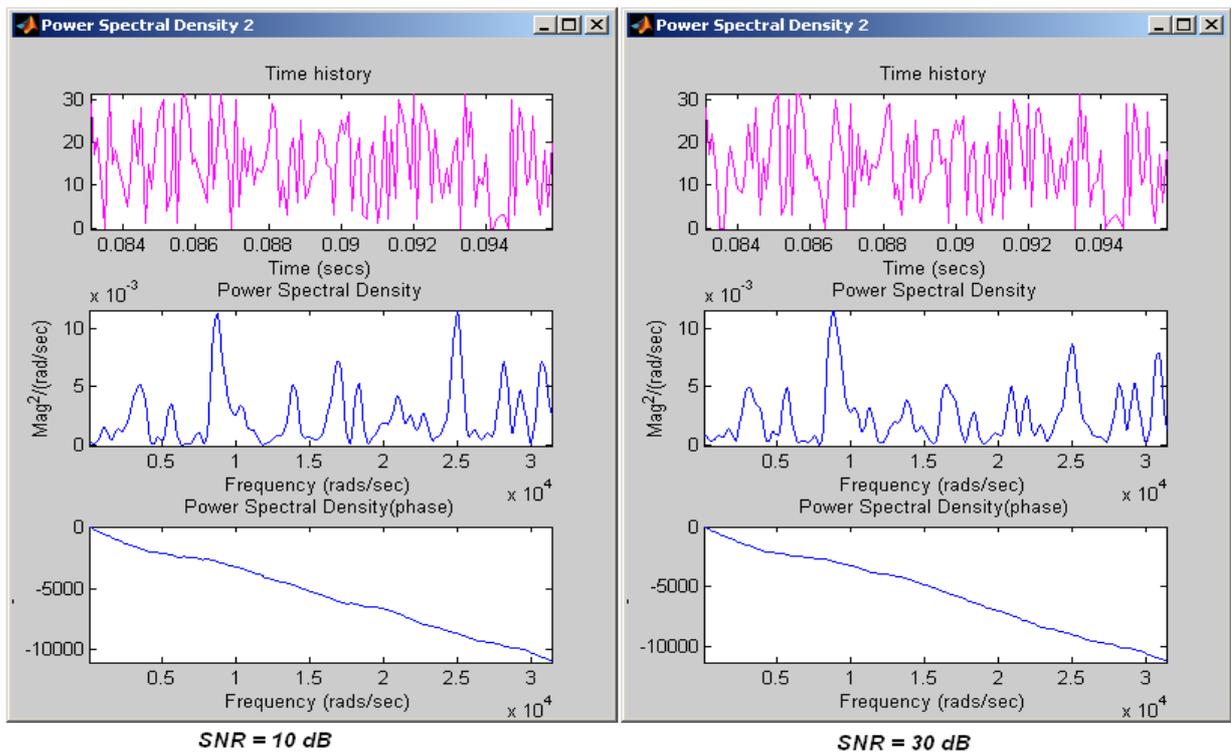


Figure IV.19 : La densité spectrale de puissance de la 32-PSK pour un SNR de 10dB et 30dB

On remarque qu'il n'y a pas d'erreurs dans les bits en diminuant le bruit.

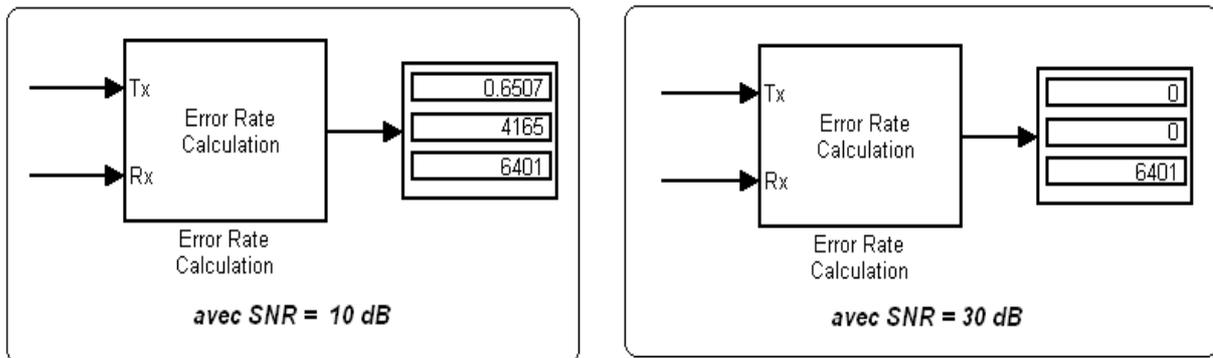


Figure IV.20 : Affichage de TEB pour la 32-PSK

#### IV.4.2.3 64-PSK

La *figure IV.21* nous indique la différence entre les deux cas de SNR pour la constellation des points de la 64-PSK.

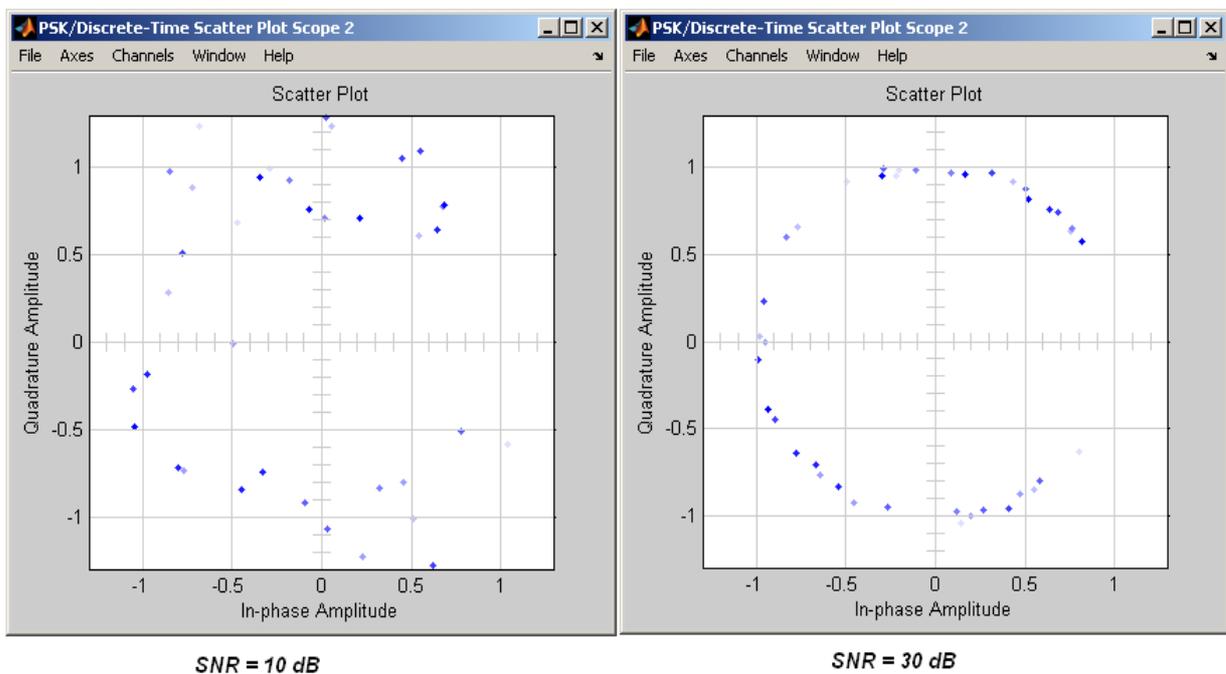


Figure IV.21 : Les constellations des points à l'émission et à la réception pour la 64-PSK

La *figure IV.22* affiche la densité spectrale de puissance pour la 64-PSK dans les deux cas, à 10 dB et à 30 dB.

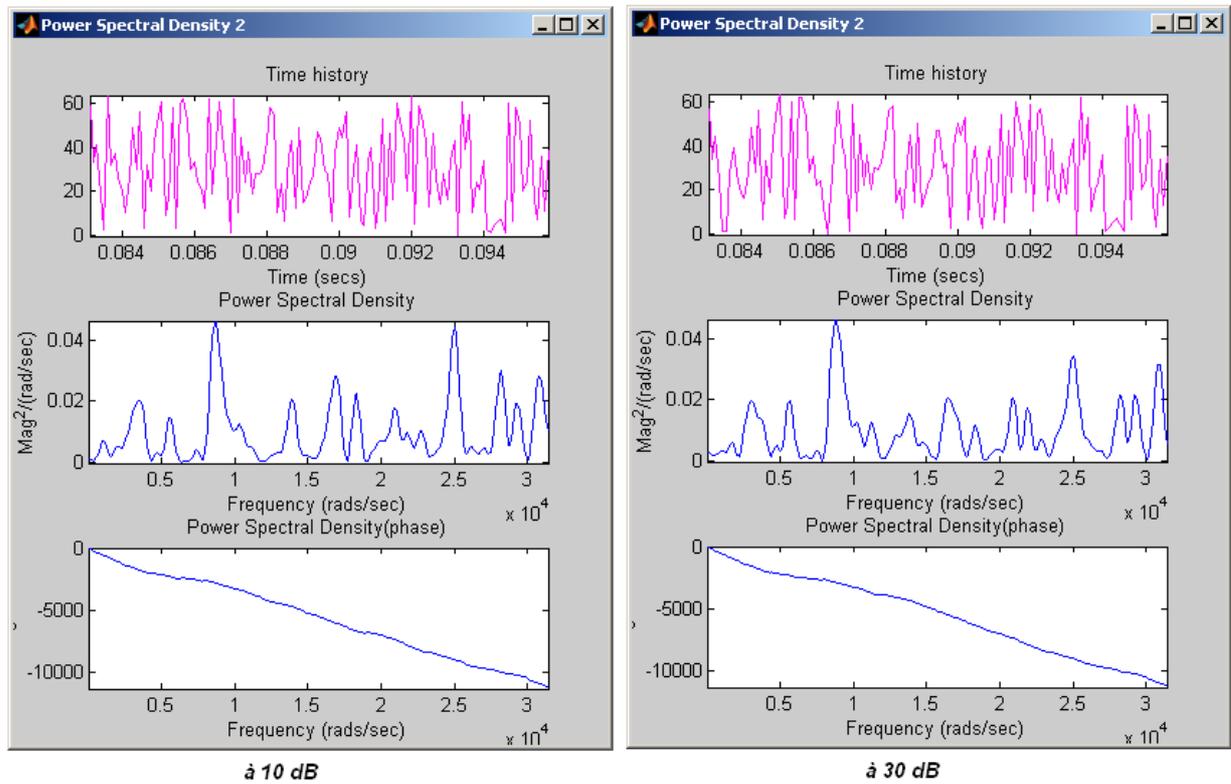


Figure IV.22 : La densité spectrale de puissance

On remarque que les erreurs (*figure IV.23*) dans les bits diminuent avec diminution de bruit.

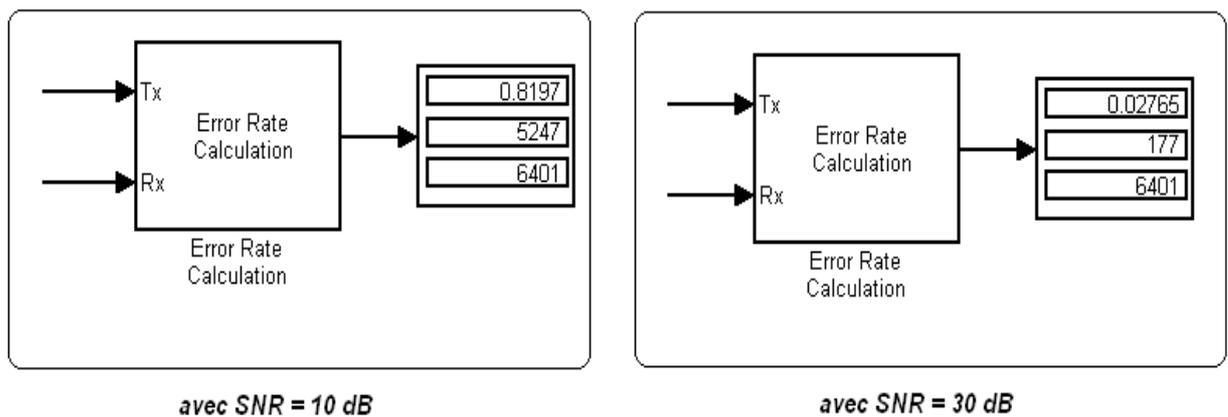


Figure IV.23 : Affichage de taux d'erreur par Bit pour la 64-PSK

#### IV.4.3 Diagramme de l'œil :

Pour le type de la 64-QAM avec un SNR de 30 dB :

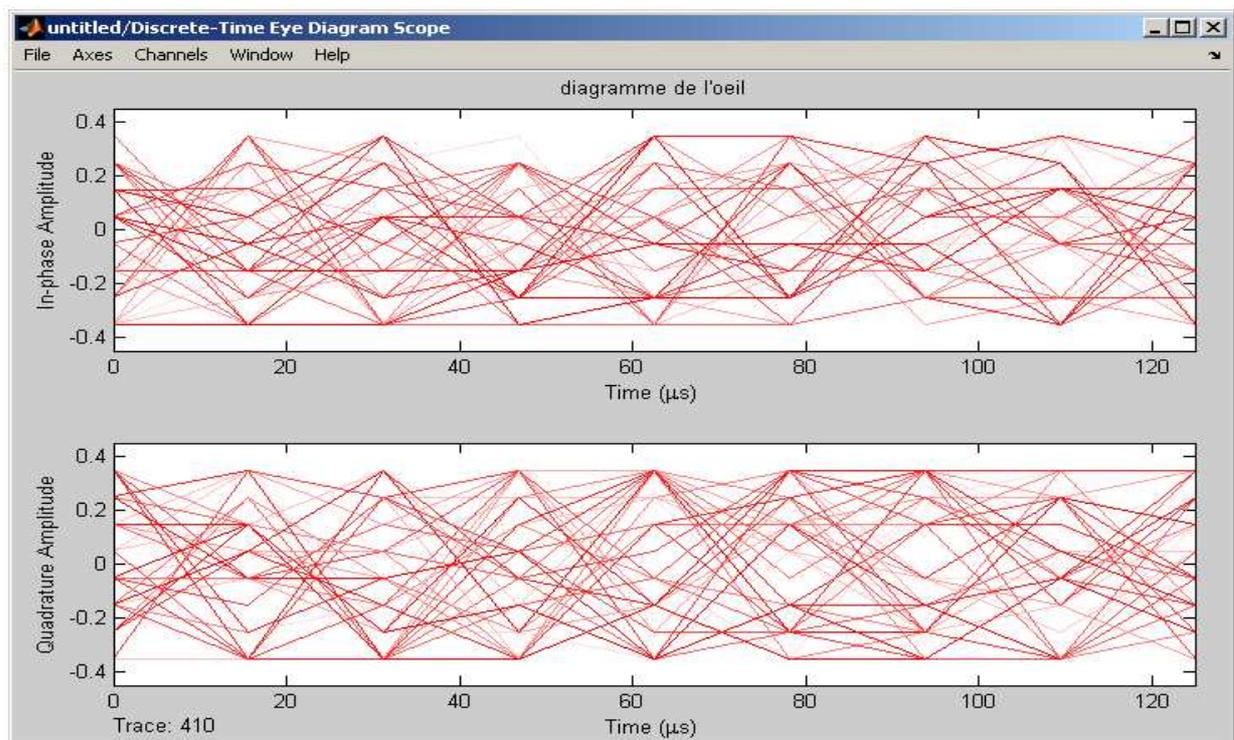


Figure IV.24 : Diagramme de l'œil.

Le diagramme de l'œil qui est très utile pour choisir précisément l'instant de décision pour la démodulation, est réalisé à l'aide de la fonction (Eye).

L'observation du diagramme de l'œil commence des débuts d'un symbole. Le signal doit être en régime établi, ce qui implique la collecte des données ne s'effectue qu'après un certain délai aux différents retards de la chaîne d'émission.

Le diagramme de l'œil est tracé sur deux temps symboles, ce qui permet de bien observer la modulation et ces propriétés. Il permet de définir le point de décision pour tracer la constellation.

#### IV.4.4 Les visualisations XY :

Le « XY Graph » affiche un diagramme vectoriel de la QAM et la PSK, il prouve que la QAM est réellement plus tolérante de l'effet Doppler que la PSK. Ceci semble raisonnable ; puisque les points de constellation sont éloignés.

La figure IV.25 compare les diagrammes vectoriels de la 16-QAM et 16-PSK pour le signal en entrée de modulateur.

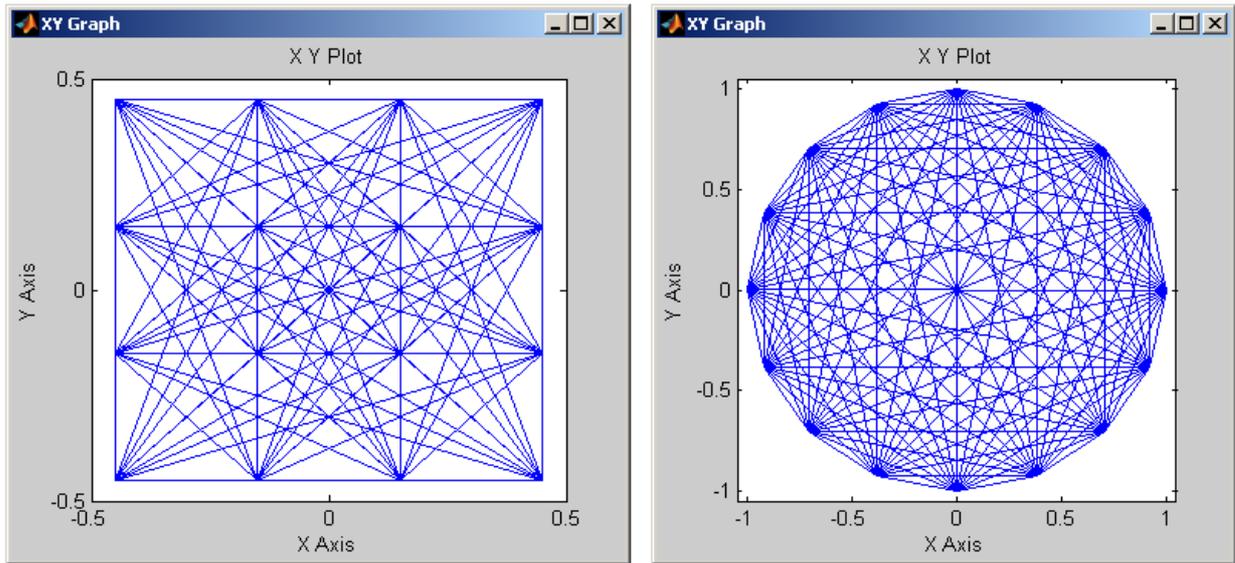


Figure IV.25 : le diagramme vectoriel pour le signal d'entrée de la 16-QAM et de la 16-PSK.

La figure IV.26 affiche le diagramme vectoriel pour le signal de sortie de la 16-QAM et de la 16-PSK, on voit clairement la présence du bruit de canal.

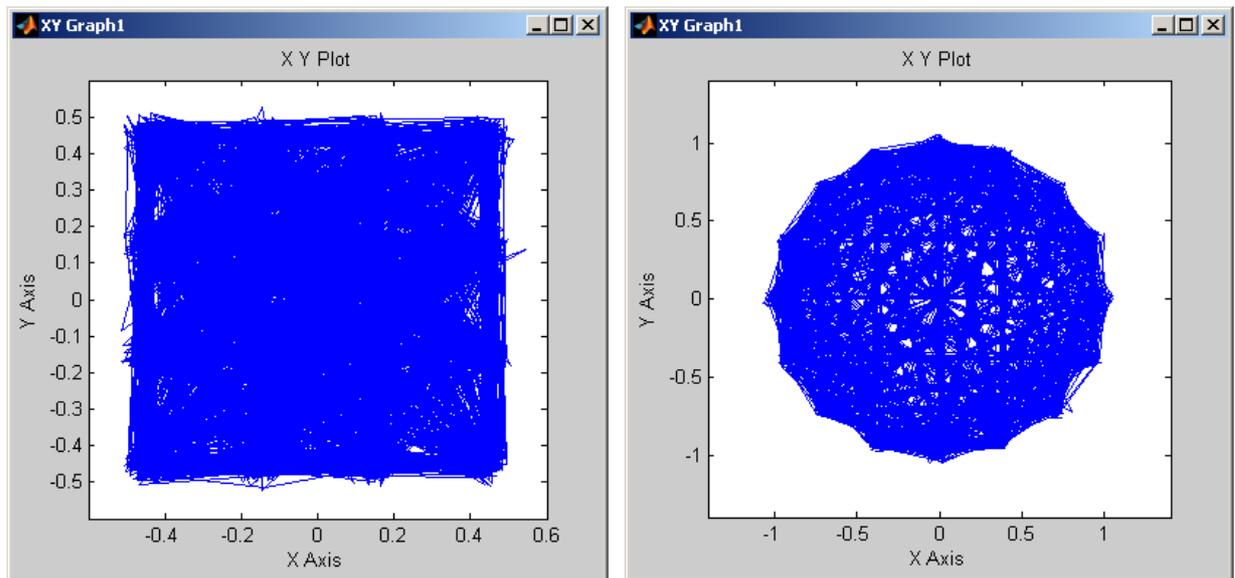


Figure IV.26 : le diagramme vectoriel pour le signal d'entrée de la 16-QAM et de la 16-PSK.

#### IV.4.5 Signal de sortie :

La figure IV.27 affiche le signal d'entrée et le signal de sortie en prenant le cas de la 64-QAM pour un SNR de 10 dB.

On remarque qu'il y'a des bits erronés dans l'information récupérée à la sortie de démodulateur, ces erreurs sont dû au bruit de canal.

Les bits indiqués en rouge sur la *figure IV.27* représentent les bits non erronés, ce qui implique que le message est noyé dans le bruit.

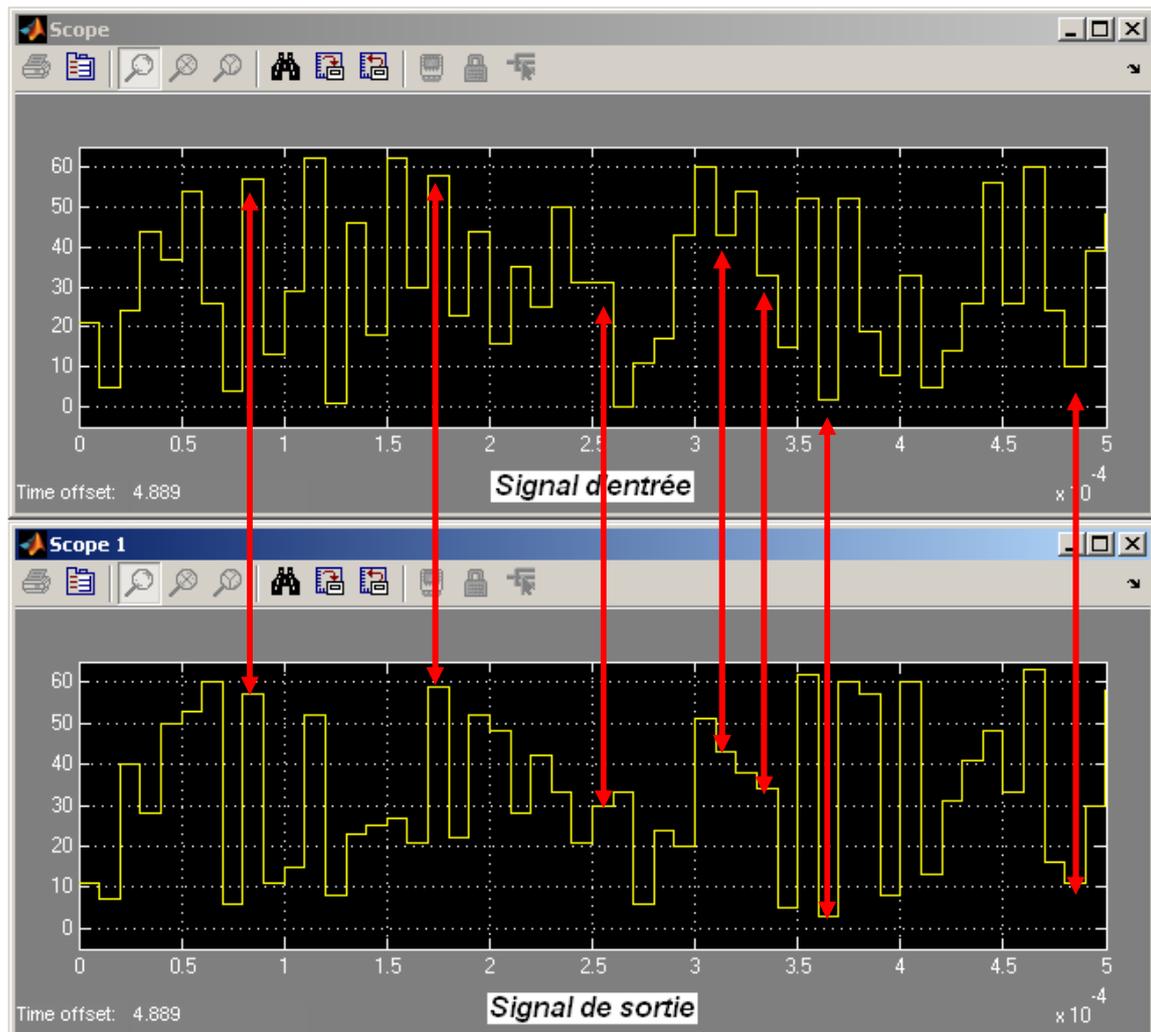


Figure IV.27: le signal d'entrée et de sortie

#### IV.5 COMPARAISON DES RESULTATS :

Pour citer les avantages et les inconvénients de chaque mode de modulation étudié dans ce projet (M-QAM et M-PSK), et voir quelle est la plus avantageuse et la plus performante, il va falloir d'abord qu'on compare les résultats donnés par la simulation pour chaque paramètre.

##### IV.5.1 L'efficacité spectrale :

- Dans les deux modes de modulation, on remarque qu'on gagne dans le débit spécifique en augmentant le nombre de points de constellation (M-aire).
- On peut augmenter l'efficacité spectrale par exploitation de l'espace des amplitudes.

Puisqu'il nous faut augmenter le débit sans modifier la largeur du canal, nous conservons le nombre de symboles par seconde ( $1/T_s$ ) et par conséquent leur durée reste inchangée.

Pour augmenter le débit binaire dans ces conditions nous devons grouper plus de un bit pour former un symbole. Donc la valence du symbole sera définie maintenant par un groupement de  $p$  bits.

On a vu dans le deuxième chapitre que L'efficacité spectrale ou le débit spécifique est donné par :

$$D_{spé} = \frac{D_b}{OS} [\text{Bit/sec/Hz}] \quad \text{Où } D_b \text{ est le débit binaire, } OS \text{ est l'occupation spectrale.}$$

Avec :

$$OS = 1/T_s \quad \text{ou} \quad T_s = p.T_b \quad M = 2^p \quad p = \log_2 M$$

#### IV.5.2 Le Taux d'Erreur Par Bit (TEB):

La qualité d'une transmission numérique est caractérisée par un paramètre nommé le taux d'erreur binaire (**TEB**). La mesure du **TEB** est réalisée en émettant une séquence de  $n$  bits connus du destinataire puis en comptant le nombre  $N_E$  de bits erronés au niveau du récepteur :

$$TEB = N_E/n \quad (...)$$

Les résultats des erreurs trouvés sont donnés dans ce tableau :

➡ Pour SNR = 10 dB :

M	Désignation	MAQ-M	M-PSK
16	<i>Nombre de bits :</i>	<b>3201</b>	<b>6401</b>
	<i>Nombre de bits erronés :</i>	1936	2457
	<i>Le taux d'erreur par bit :</i>	0.6048	0.3857
32	<i>Nombre de bits :</i>	<b>3201</b>	<b>6401</b>
	<i>Nombre de bits erronés :</i>	2080	4165
	<i>Le taux d'erreur par bit :</i>	0.6408	0.6507
64	<i>Nombre de bits :</i>	<b>3201</b>	<b>6401</b>
	<i>Nombre de bits erronés :</i>	3079	5247
	<i>Le taux d'erreur par bit :</i>	0.9619	0.8197

Tableau IV.1 : résultats des taux d'erreurs binaires pour un SNR de 10 dB

➔ Pour SNR = 30 dB :

M	Désignation	MAQ-M	M-PSK
16	<i>Nombre de bits :</i>	<b>3201</b>	<b>6401</b>
	<i>Nombre de bits erronés :</i>	0	0
	<i>Le taux d'erreur par bit :</i>	0	0
32	<i>Nombre de bits :</i>	<b>3201</b>	<b>6401</b>
	<i>Nombre de bits erronés :</i>	0	0
	<i>Le taux d'erreur par bit :</i>	0	0
64	<i>Nombre de bits :</i>	<b>3201</b>	<b>6401</b>
	<i>Nombre de bits erronés :</i>	2989	177
	<i>Le taux d'erreur par bit :</i>	3201	0.02765

Tableau IV.2: résultats des taux d'erreurs binaires pour un SNR de 30 dB

D'après les résultats des erreurs trouvés, on peut déduire que le rapport signal sur bruit a une influence importante sur le taux d'erreur binaire, c'est-à-dire ; sur la qualité de l'information récupérée, plus le bruit est grand, plus on perd des bits dans l'information.

On peut raisonnablement estimer que le taux d'erreur de bits (Bit Error Rate-BER) sera faible, les nuages étant bien placés au centre des régions de décision.

#### ➔ La fenêtre (BERTool) d'affichage de TEB :

Pour comparer entre les deux modulations M-QAM et M-PSK sur un canal AWGN en utilise la commande « bertool » disponible dans MATLAB.

Dans cette fenêtre (*figure IV.28*) on trouve les paramètres principaux suivants :

- ✓  $E_b/E_0$  range (la gamme de  $E_b/E_0$ ).
- ✓ Type de canal.
- ✓ Type de modulation.
- ✓ Ordre de modulation.

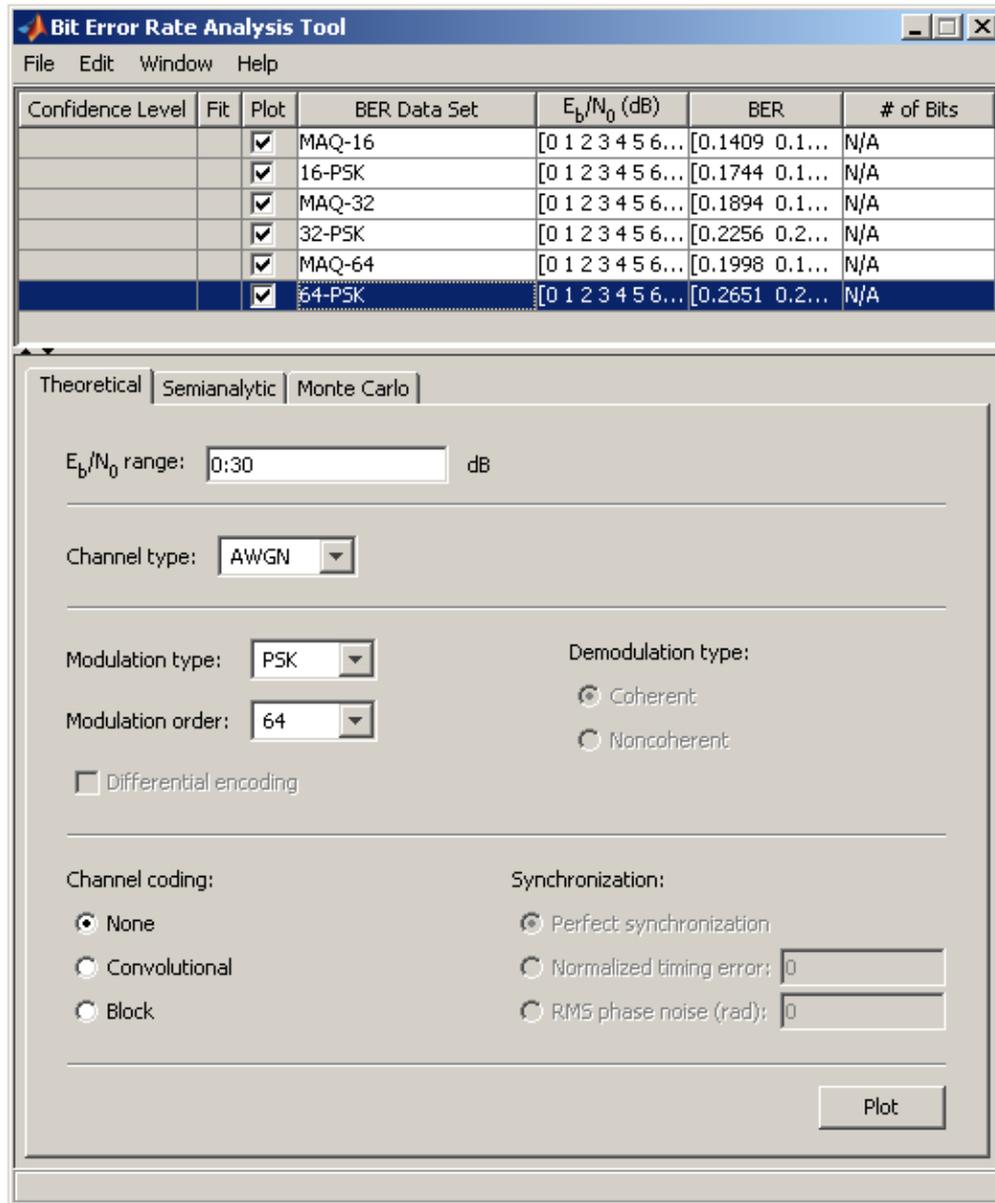


Figure IV.28 : Fenêtre de configuration du TEB

« *BERTool* » (figure IV.28) est conçue pour analyser le taux d'erreurs par bits seulement, pas le taux d'erreur par symbole, le taux d'erreur par mot, ou d'autres types de taux d'erreur. Si, par exemple, votre simulation calcule un taux d'erreur de symbole, convertir le SER en BER avant d'employer la simulation avec « *BERTool* »

Avec l'augmentation de  $M$ , les systèmes QAM sont plus avantageux que les systèmes PSK. D'après la figure IV.29, 16-QAM nécessite une puissance d'environ 4 dB de moins que les systèmes 16-PSK, et avec un taux d'erreur binaire moins que celui de la PSK.

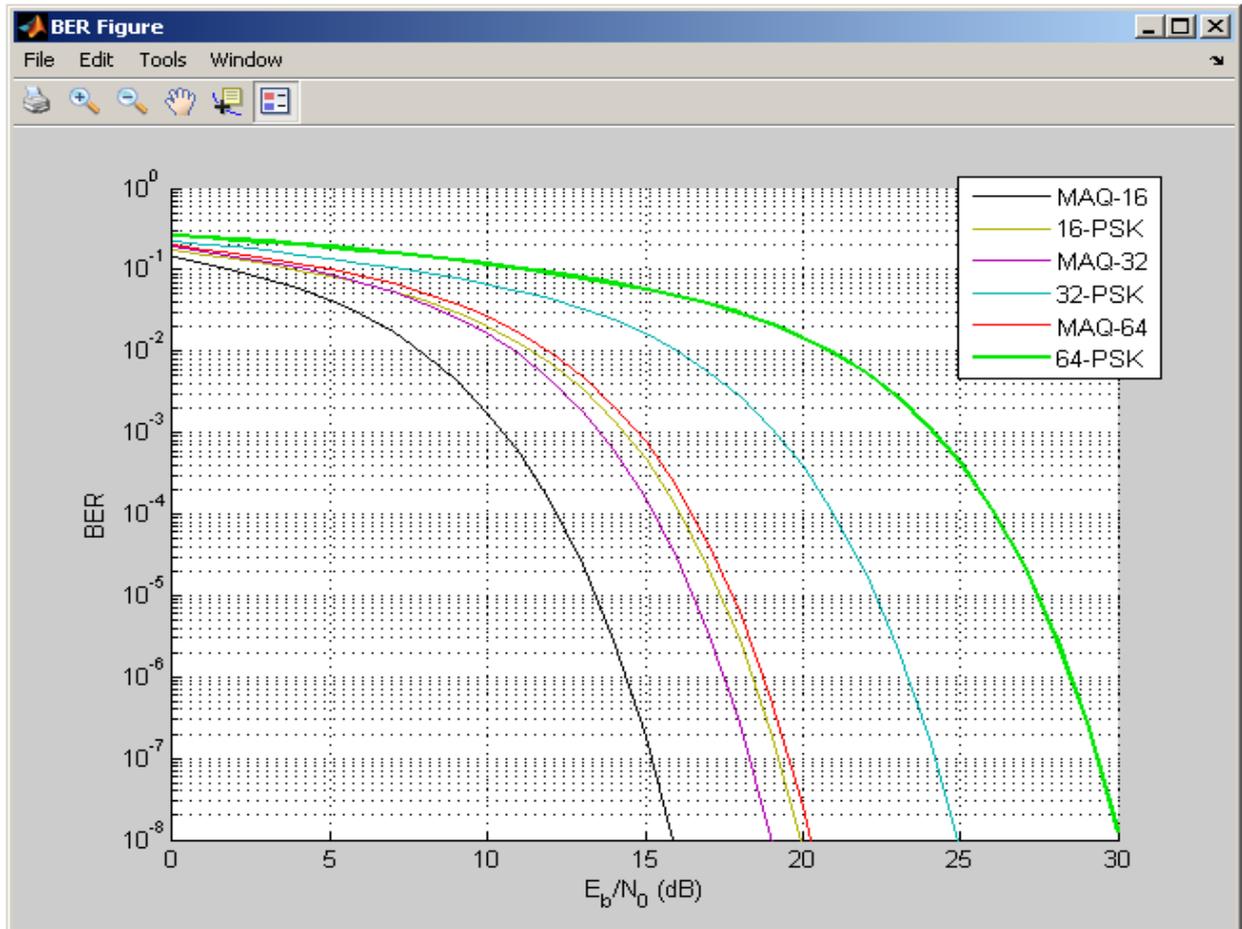


Figure IV.29 : Trace de la courbe TEB pour les différents types de modulation utilisés

### IV.5.3 Interprétation des figures de constellations :

Le diagramme de constellation évolue en fonction du signal. Si le signal est perturbé, le diagramme de constellation est alors déformé. Suivant la déformation, il est possible d'identifier le type d'interférences qui pollue l'information.

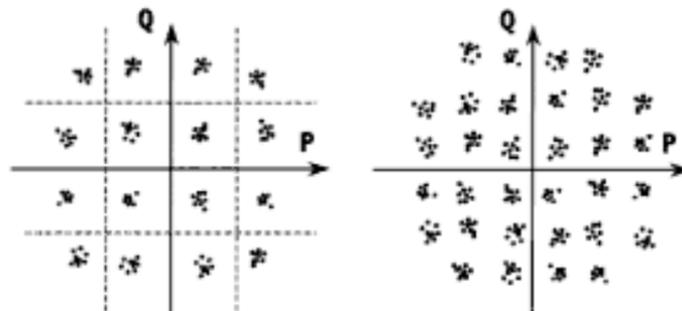
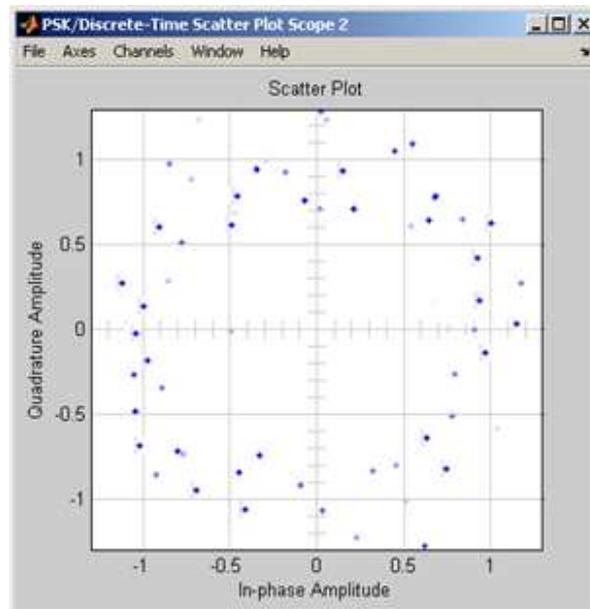


Figure IV.30 : Présence de bruit

Les points de la constellation étant plus rapprochés, ils seront plus difficiles à décoder en cas de bruitage de la ligne (figure IV.30).

Le nombre de points de la constellation ne peut donc pas être trop augmenté pour que la discrimination des différents états par le démodulateur reste possible (dans le cas de la 64-PSK) comme le montre la *figure IV.31*.



*Figure IV.31 : constellation 64-PSK bruité*

Plus précisément, ce sont les effets de distorsion (déplacement permanent des Points à la réception Par rapport aux positions théoriques) et de bruit (déplacements aléatoires) qui risquent de faire franchir un seuil de décision bidimensionnel (l'écart de position est caractérisé par un vecteur d'erreur). La distance minimum entre deux positions théoriques doit donc être supérieure à l'amplitude instantanée du bruit.

On constate par ailleurs une dispersion dans la position des points expérimentaux formant des nuages de points cela est dû par exemple au bruit Présent dans le canal de transmission et les équipements actifs. Enfin, on observe que les nuages les plus distants de l'origine (correspondant à la puissance des signaux la plus élevée) ne sont pas dans la position théorique, mais qu'ils ont migré vers l'origine du repère. Ceci Peut être dû à la saturation en amplitude des amplificateurs de puissance de l'émetteur, c'est-à-dire à un effet non linéaire.

Sur la *figure IV.32*. Il s'agit d'une modulation 32-QAM : chaque symbole porte ici cinq bits. Le nombre 32 étant certes une puissance entière de 2, mais pas un carré parfait, l'ensemble des nuages ne forme pas un carré géométrique (il aurait fallu 36 nuages pour cela). Les quatre positions non utilisées sont celles les plus susceptibles de subir des distorsions, c'est-à-dire les plus éloignées du centre.

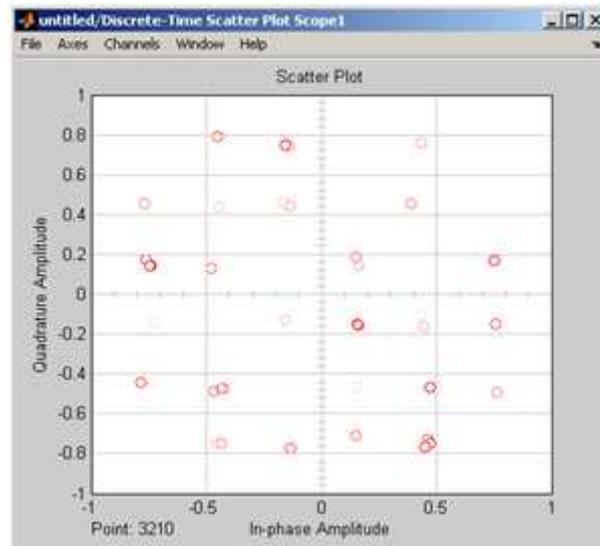


Figure IV.32 : la constellation 32-QAM

Il est intéressant de savoir que le vecteur d'erreur peut être employé pour créer un deuxième niveau de transmission à faible débit, utilisé comme canal de contrôle, comme canal « son » lors de la transmission d'images animées, ou comme voie confidentielle (stéganographie) ou d'identification (marquage des images). Pour cela est choisi un point du diagramme de constellation bénéficiant d'une zone de décision parmi les plus étendues. Ce point est alors volontairement déplacé par rapport à sa position normale, tout en restant bien à l'intérieur de la surface de décision : un déplacement à gauche correspondra par exemple à 1, et à droite à 0. Le débit est bien sûr fonction de la fréquence d'émission du symbole choisi.

Le débit de ce canal dépend de l'usage du symbole choisi et donc de l'entropie de la source : de ce point de vue, l'utilisation d'un embrouilleur constituera une garantie de débit.

#### IV.6 CONCLUSION :

MATLAB/Simulink est un outil très puissant qui peut être utilisé pour la simulation dans la communication, la commande, le DSP, etc. Ce document établit un modèle simple de simulation pour illustrer les techniques de QAM. Le modèle de simulation a vérifié la théorie de QAM et peut être employé non seulement pour les critères pour la modulation adaptative mais également pour qu'une plate-forme conçoive d'autres systèmes de modulation.

**\*\*\*\*\* CONCLUSION \*\*\*\*\***

Ce projet nous a permis d'acquérir une connaissance en communications numériques et radiocommunications pour mettre en œuvre de façon efficace et cohérente les différents blocs constituant la chaîne de transmission.

De part la nature du sujet et l'approche que nous proposons, nous avons observé un vif intérêt pour ce projet.

Nous avons construit deux modèles de simulation simple pour illustrer les techniques QAM et PSK et comment avec les blocs de communication de Simulink nous pouvons les mettre en œuvre.

Nous avons analysé et simulé les performances de ces deux modèles de transmission en termes de taux d'erreur binaire (TEB) et du rapport signal/bruit. La conception de la chaîne a été faite et testée bloc après bloc.

Nous avons réalisés que la modulation M-PSK a des effets indésirables si on veut augmenter le débit, car les points de la constellation seront très proches, donc le taux d'erreur va devenir considérable, ce qui résulte de la difficulté de récupérer notre message, alors elle est conseillée pour des débits inférieurs.

Ce n'est pas le cas pour la QAM, elle réalise une plus grande distance entre les points adjacents dans le plan d' I -Q en distribuant les points plus également. Et de cette façon les points sur la constellation sont plus distincts et des erreurs de données sont réduites. C'est-à-dire, nous pouvons aller jusqu'à un M-aire de 1024, alors avec ce débit, il est possible de transmettre plus de bits par symbole. Mais n'oublions pas qu'à un certain niveau de M-aire, le bruit va influencer beaucoup sur le signal. Donc, c'est là qu'on doit intervenir et augmenter le rapport signal sur bruit pour avoir de meilleures conditions de transmission des données.

Le modèle de simulation nous a permis de vérifier la théorie de la QAM et peut être utilisé pour une plate-forme de conception de modulation d'autres systèmes.

*Bibliographie :*

- [1] : **Quadrature Phase Error in Receivers** - Daniel Easton, James Snowdon and Daniel Spencer December 11, 2008
- [2] : **Télécommunications** : objectif 2000 sous la direction de A.GLOWINSKI (Dunod).
- [3] : **Systèmes de télécommunication-bases de transmission** par P.GFONTOLLIET.
- [4] : **Traitement Numérique Du Signal Théorie Et Pratique** - *Maurice Bellanger (8 ème édition) 2006.*
- [5] : FERREL.G.STREMER. » Introduction to communication systems ».Second Edition.
- [6] : **transmission des signaux numériques** par Hikmet SARI.
- [7] : MEYR (H.) et ASCHEID (G) *Synchronization in digital communications. Vol. 1*, John Wiley & Sons, New York (1990).