



Chapitre 4 : Modulation et Standards

Dr Ibrahima GUEYE

gueye.ibrahimal@esp.sn

ESP 2024-2025



Contenu

Contenu

- *Introduction*
- *CONCEPT DE BASE*
- *MODULATION PAR DEPLACEMENT D'AMPLITUDE (ASK)*
- *MODULATION PAR DEPLACEMENT DE FREQUENCE (FSK)*
- *MODULATION PAR DEPLACEMENT DE PHASE (PSK)*
- *MODULATION M-AIRE (QPSK, MPSK, QAM)*
- *MODULATIONS ET APPLICATIONS*



- Tout comme la modulation analogique, la **modulation numérique** permet d'adopter un signal au canal de propagation. Toute fois, pour cette modulation, le signal est **numérique**. Il est inscrit sur une porteuse **$p(t)$** . L'information modulante est constituée d'un **signal binaire**, de débit **D (bit/s)**. La valeur de **D** reste très inférieure à la valeur de la fréquence porteuse **F_0** .
- Dans les procédés de modulation **M-aire**, l'information est transmise à l'aide d'un paramètre qui prends **M valeurs**. Ceci permet d'associer à un état de modulation un mot de **n bits**. Le nombre d'états est donc **$M = 2^n$** . Ces **n bits** (digits) proviennent du découpage en paquets de **n bits** du train binaire issu du codeur. La modulation numérique offre **plus de capacité** que la modulation analogique dans le transport de volumes accrus d'informations. Elle offre également plus de sécurité et une meilleure qualité de transmission.
- Les modulations numériques les plus fréquentes sont:
 - Modulation par Déplacement d'Amplitude (MDA) ou Amplitude Shift Keying (ASK)
 - Modulation par Déplacement de Fréquence (MDF) ou Frequency Shift Keying (FSK)
 - Modulation par Déplacement de Phase (MDP) ou Phase Shift Keying (PSK)
 - Modulation **M-aires**
 - Modulation **QAM**



- La taille d'un **alphabet**, noté ici **M**, est le nombre de représentations différentes qui le compose.
- Un **symbole** est un élément d'un alphabet. Il est dit **M-aire** en correspondance à la taille de l'alphabet. Pour $M=2$ par exemple, le symbole est dit binaire. Un symbole M-aire véhicule l'équivalent de $n = \log_2 M \text{ bits}$
- 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. Il correspond au débit en **bauds** (nombre de changements d'états par seconde). Un changement d'état peut correspondre à un changement de phase du signal porteur, une excursion de fréquence ou une variation d'amplitude. La rapidité de modulation R s'exprime en "bauds » et est donnée par:

$$R = \frac{1}{T_s}$$

- On appelle **débit binaire D** 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 s'exprime en "bits par seconde » et est donné par:

$$D = \frac{1}{T_b}$$



- L'**encombrement spectral** BW du signal modulé est défini comme étant le double de la fréquence modulante. Elle s'exprime en Hertz (Hz) est donnée par la relation suivante $BW = 2f_m$.

Paramètres d'évaluation d'une modulation numérique

On évalue une technique de modulation numérique en tenant compte principalement de deux paramètres que sont l'**efficacité spectrale** η et le **taux d'erreurs binaires** TEB (BER en anglais).

- Fonction du débit D et de BW du signal modulé, l'efficacité spectrale d'une modulation est donné par:

$$\eta = \frac{D}{BW}$$

- Le taux d'erreur binaire mesure de l'intégrité des données transmis. Il est donné par :

$$TEB = BER = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre de bits transmis}}$$

- **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

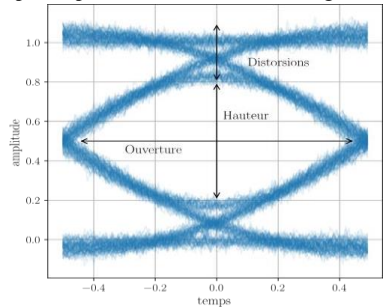
La **simplicité de réalisation** (avec éventuellement une symétrie entre les points de la constellation)

Diagramme de l'œil :

- Le diagramme de l'œil est un graphe sur $\left[-\frac{T_s}{2}, \frac{T_s}{2}\right]$ qui représente la superposition de plusieurs traces du signal reçu $y(t)$.
- Le diagramme de l'œil permet de visualiser et de mesurer :

- L'ouverture de l'œil** représente l'intervalle de temps où peut se faire l'échantillonnage du signal lors de la démodulation.

- La hauteur de l'œil indique** la quantité de bruit qui est tolérée pour que la distinction entre les niveaux soit possible. Si le rapport signal sur bruit diminue (ce qui signifie que le bruit augmente), alors l'œil aura tendance à se fermer et alors on ne pourra plus distinguer les niveaux représentant les symboles. Les distorsions sont dues au bruit mais aussi au filtrage du signal par le canal.



Exemple de diagramme de l'œil, ici dans le cas d'un canal non idéal et bruité



Diagramme de l'oeil :

- La **taille de la modulation** est donnée par le nombre de niveau (nombre de tracés horizontales)
- Le **meilleur instant d'échantillonnage** correspond à l'instant où l'ouverture verticale est maximale
- La **meilleure valeur de seuil de décision** représente la moyenne des probabilités entre 2 niveaux. Si $M > 2$, on a $M-1$ seuils.
- La **présence ou l'absence d'interférence inter symbole** IES est indiquée par un **encombrement** au point de contact des différentes courbes

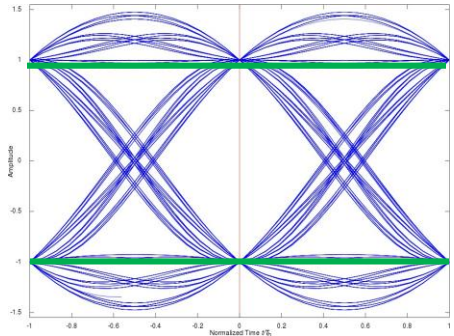
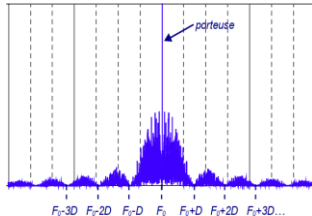
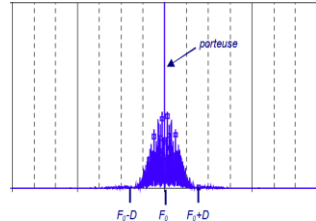


Diagramme de l'oeil d'un signal codé en phase
(binary PSK)

- Le **spectre** d'une modulation ASK correspond au spectre d'une modulation d'amplitude classique. La porteuse est entourée de 2 bandes latérales qui correspondent au spectre des données. Le lobe central est ainsi de largeur $2D$, alors que les lobes secondaires sont de largeur moitié. Avec des données brutes (non filtrées), l'encombrement spectral est en théorie **infini**, ce qui est inacceptable.



Spectre d'un signal modulé ASK **non filtré**



Spectre d'un signal modulé ASK **filtré**

- Avec un filtrage optimal des données, le spectre des données se limite à son 1^{er} lobe.

l'encombrement spectral du signal modulé ASK est de l'ordre de 2 fois le débit binaire.

L'efficacité spectrale de la modulation ASK n'atteint ainsi que $1/2$

Diagramme polaire d'une porteuse :

■ Le **diagramme polaire** permet de visualiser l'amplitude et la phase d'un signal dans un même graphique.

- L'amplitude correspond à la *distance à l'origine*
- L'origine des phases commence à 0.
- Dans les systèmes de transmission, la porteuse constitue le signal de référence. La phase du signal modulé est par conséquent relative à la porteuse.

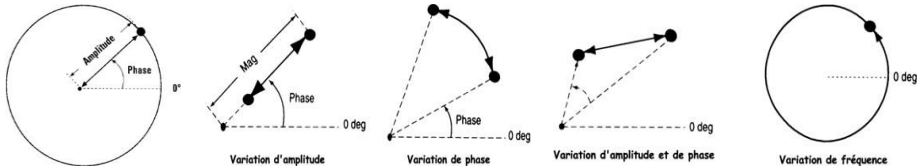
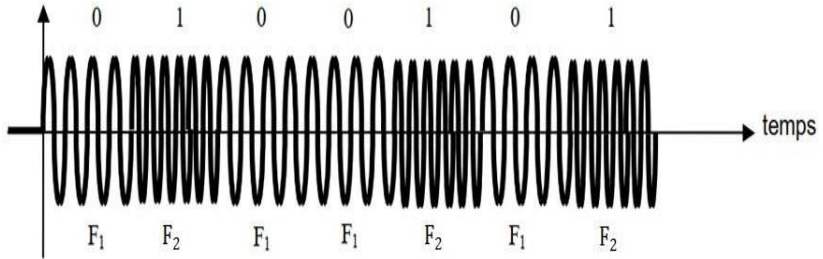


Diagramme polaire des différentes modulations



- La porteuse $p(t) = E \cos(2\pi F_0 t)$ est maintenant modulée en fréquence par le signal numérique. Sa fréquence "saute" d'une valeur F_1 (pour un « 0 ») à une valeur F_2 (pour un « 1 »). Les 2 valeurs F_1 et F_2 sont symétriques par rapport à F_0 .

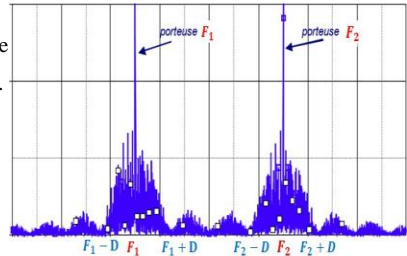


Aspect temporel d'un signal modulé FSK

- Le **spectre** d'un signal FSK est très complexe et présente une évolution en $\frac{\sin(x)}{x}$. Ainsi, on a deux lobes autour des fréquences F_1 et F_2 . En effet, tout se passe comme si on avait l'addition de 2 spectres OOK, l'un de porteuse F_1 et l'autre de porteuse F_2 .

- Il est possible de définir un indice de modulation m comme en analogique. La porteuse subit une excursion de fréquence ΔF telle que $F_1 = F_0 - \Delta F$ et $F_2 = F_0 + \Delta F$. Pour un débit binaire D donné, m est tel que :

$$m = \frac{F_2 - F_1}{D} = \frac{2\Delta F}{D}$$



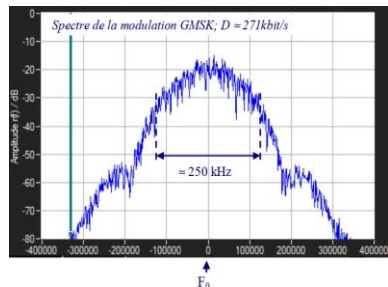
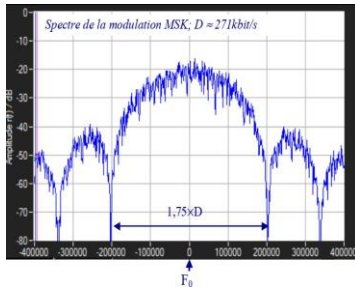
- Même avec un filtrage adaptée des données, l'encombrement s'étend de $F_1 - D$ à $F_2 + D$. L'efficacité spectrale est ainsi inférieure à $\frac{1}{2}$.
- On note que la modulation FSK conduit à un encombrement spectral supérieur à celui de la ASK. Toutefois ces deux types de modulation **ne sont adaptées aux systèmes à haut débit**. Cependant la modulation FSK peut être améliorée pour aboutir à la modulation **Minimum Shift Keying (MSK)**.

La modulation **MSK** est caractérisée par :

un indice $m = 0.5$ et :

une excursion en fréquence $\Delta F = 0.25 \times D$:

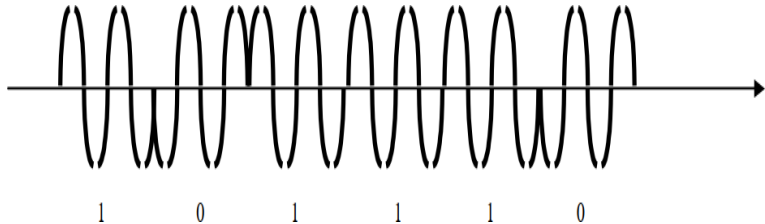
Les fréquences F_1 et F_2 sont données par $F_1 = F_0 - \frac{D}{4}$ et $F_2 = F_0 + \frac{D}{4}$



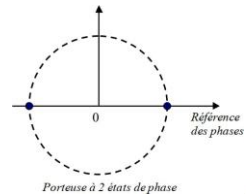
Lorsque les données sont traitées par un filtre passe bas de type Gaussien, la modulation MSK prend le nom de **GMSK** pour **Gaussian Minimum Shift Keying**.

■ Dans ce procédé, c'est la phase ϕ de la porteuse qui est modulée par les données binaires :

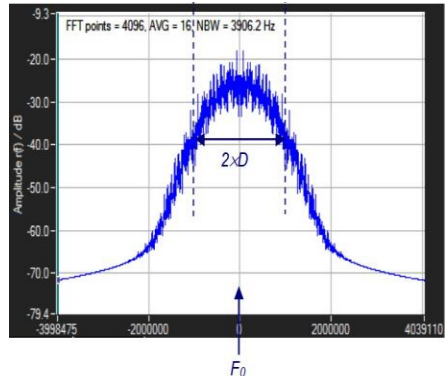
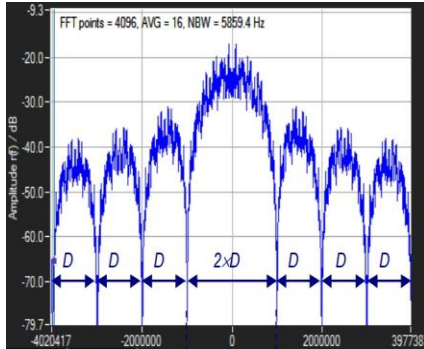
■ Si à "0" on associe $E \cos(2\pi F_0 t)$ alors à "1" on associe $E \cos(2\pi F_0 t + \pi)$



■ La porteuse ayant une amplitude constante et une phase à l'origine qui peut prendre les 2 valeurs 0 et π , on peut représenter un diagramme polaire de ce type de modulation .



- Le spectre d'une modulation BPSK est classique. Il est composé d'un lobe central de largeur $2D$, entouré de lobes secondaires de largeur moitié (D).



- Avec un filtrage des données convenable, il est possible de ne conserver que le lobe central. L'efficacité spectrale de ce type de modulation reste faible (≈ 0.5).



- Les systèmes de communication actuels nécessitent des modulations offrant des **efficacités élevées** pour répondre aux exigences des utilisateurs en termes de débit. En effet, il a été constaté que les procédés de modulation numérique comportant un petit nombre d'états caractéristiques, fondés sur le **codage binaire** ou ternaire (bipolaire) utilisé dans les systèmes en câble, conduisaient à un gaspillage de spectre beaucoup trop grand par comparaison avec les systèmes analogiques à grande distance qui fonctionnaient à l'époque dans les bandes de fréquences des 4 et des 6 GHz. C'est la raison pour laquelle on a mis en œuvre dans les premiers systèmes une modulation
 - à **4 états** caractéristiques : MDP-4, MDPQ avec décalage, MAQ-4, MDM, MFA et
 - à **8 états** caractéristiques (MDP-8)
- Ces systèmes ont évolué vers des formats comportant un **plus grand nombre d'états** : MAQ-16 et MAQ-64 Les versions les plus récentes étant MAQ-128, MAQ-256 ou même MAQ-512.



- La MDA et la MDP ne constituent pas une solution satisfaisante pour utiliser efficacement l'énergie émise lorsque le nombre de points M est grand. 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. Un choix plus rationnel est alors une modulation qui répartit les points uniformément dans le plan.

Les modulations M – aires repose sur **deux principes** :

- Regroupement symbolique** : le flux de données binaires de débit D est regroupé en des symboles de n bits. Chaque bit a une durée T_B et chaque symbole a une durée T_S telle que $T_S = n \times T_B$. Le débit binaire D est remplacé par le débit symbolique R tel que $R = D/n$ (bauds).
- Modulation en quadrature** : deux porteuses sont modulées en **déphasage de 90°** . En effet, une porteuse sinusoïdale d'amplitude E et de phase φ peut être donnée par l'expression suivante :

$$p(t) = E \cos(\omega t + \varphi)$$



- Le développement de $p(t)$ donne :

$$p(t) = E \cos(\varphi) \cos(\omega t) + E \sin(\varphi) \sin(\omega t)$$

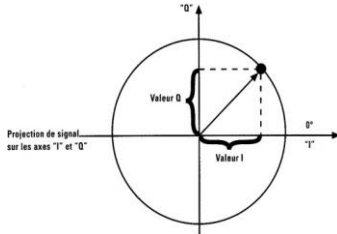
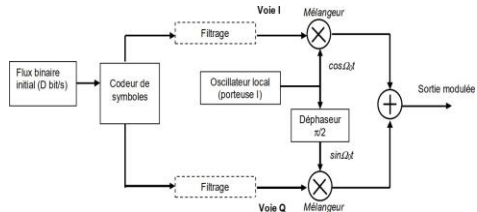
Ce signal peut donc être vu comme une combinaison de deux porteuses en quadratures $\cos(\omega t)$ et $\sin(\omega t)$ d'amplitudes respectives $E \cos(\varphi)$ et $E \sin(\varphi)$. Si on note $I = E \cos(\varphi)$ et $Q = E \sin(\varphi)$, on aura finalement :

$$p(t) = I \cos(\omega t) + Q \sin(\omega t)$$

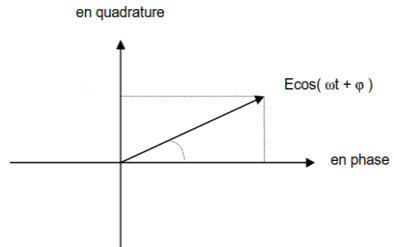
- Une porteuse d'amplitude et de phase peut être synthétisée de la façon suivante :

- L'oscillateur fournit deux signaux : le signal de référence $\cos(\omega t)$ et le même signal en déphasage de $\pi/2$, $\sin(\omega t)$
- La composante $\cos(\omega t)$ est multiplié ((modulé) par le signal $I(t)$ (En phase)
- La composante $\sin(\omega t)$ est multiplié (modulé) par le signal $Q(t)$ (Quadrature)
- Ces deux signaux sont additionnés pour donner $p(t) = E \cos(\omega t + \varphi)$

- Un bon choix de I et Q permet de réaliser un modulateur de phase ou d'amplitude et de phase à M états. On appelle modulateur IQ le modulateur qui réalise ces opérations



Conversion polaire / rectangulaire



Représentation de la porteuse dans le plan de Fresnel

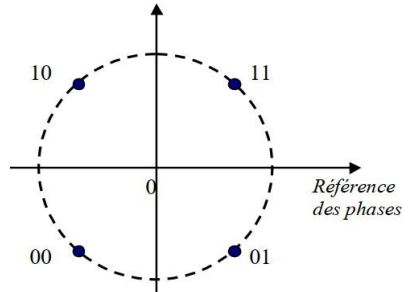
Modulation QPSK :

- Le La modulation QPSK est une modulation de phase à 4 états (00, 01, 11, 10) chacun correspondant à un état de phase de la porteuse modulée. Pour

$$p(t) = I \cos(\omega t) + Q \sin(\omega t)$$

on a :

| <i>Symbole</i> | <i>I</i> | <i>Q</i> | <i>φ</i> |
|----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 11 | $\frac{\sqrt{2}}{2} E$ | $-\frac{\sqrt{2}}{2} E$ | $\frac{\pi}{4}$ |
| 10 | $-\frac{\sqrt{2}}{2} E$ | $-\frac{\sqrt{2}}{2} E$ | $\frac{3\pi}{4}$ |
| 00 | $-\frac{\sqrt{2}}{2} E$ | $\frac{\sqrt{2}}{2} E$ | $\frac{5\pi}{4}$ |
| 01 | $\frac{\sqrt{2}}{2} E$ | $\frac{\sqrt{2}}{2} E$ | $\frac{7\pi}{4}$ |

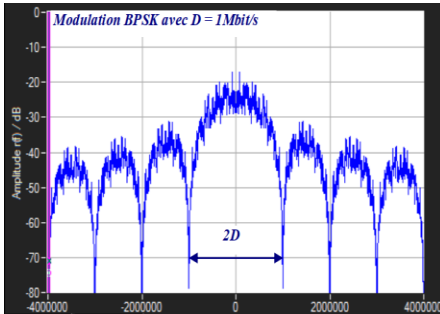


Constellation pour la modulation QPSK

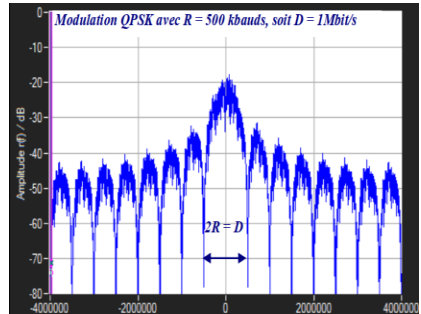
- On parle de **diagramme de constellation** pour la représentation polaire des états de la porteuse modulée.

Modulation QPSK :

- La modulation QPSK a un spectre analogue à celui d'une modulation BPSK, à ceci près que la largeur du lobe central est moitié moindre.



Spectre modulation BPSK avec un débit binaire de 1Mbit/s

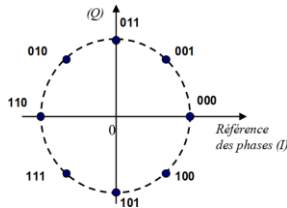


Spectre modulation QPSK correspondante

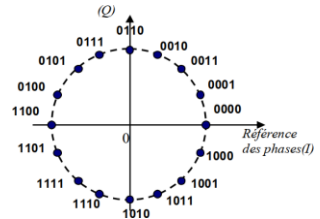
- NB :** À débit binaire identique, l'efficacité spectrale de la modulation QPSK est double de celle de la modulation BPSK.

Modulation M-PSK :

- On peut augmenter le nombre d'états d'une porteuse modulée en phase numériquement : de 4 pour la QPSK, on réalise des modulations à **8**, **16** et **32** états (exemple 32PSK pour la norme DVB-S2 de TV par satellite).



Constellation pour la modulation 8 PSK

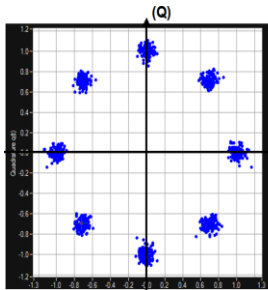


Constellation pour la modulation 16 PSK

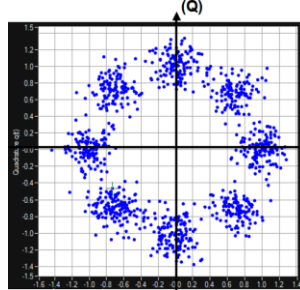
- L'augmentation du nombre d'états permet, à débit constant, d'occuper une bande BW de plus en plus faible, ce qui permet d'augmenter l'efficacité spectrale.
- Inversement, la robustesse de ces modulations diminue avec le nombre d'états, surtout en présence de bruit.

Modulation M-PSK : influence du bruit sur la constellation

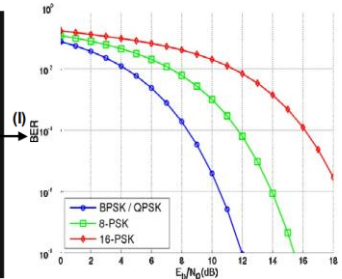
- La porteuse modulée voit son amplitude fluctuer, de même que sa phase. Il en résulte que les constellations réelles sont en fait formées de nuages de points.



Constellation 8PSK avec SNR de 25dB : les différents états sont bien séparés



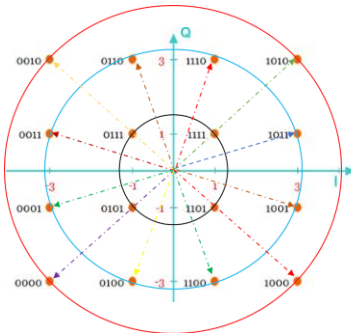
Constellation 8PSK avec SNR de 15dB : la différenciation des états est difficile



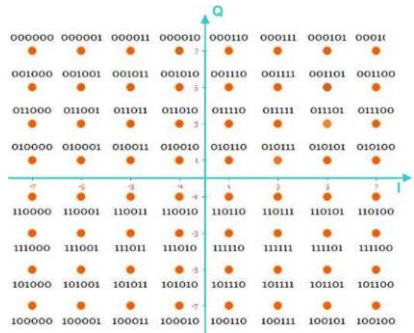
- Ci-dessus, un exemple de courbes représentant le BER en fonction du rapport signal sur bruit (par bit). Pour un même type de modulation PSK, le BER est d'autant plus faible que le SNR est grand. Par contre, pour un même rapport signal bruit, le BER augmente fortement avec le nombre d'états !! Une transmission de qualité est plus délicate avec une modulation à grand nombre d'états.

Modulation QAM

- Les modulations **QAM** (Quadrature - Amplitude - Modulation) sont une extension des modulations MPSK. La porteuse voit son amplitude et (ou) sa phase "sauter" à chaque changement de symbole. Ce type de modulation est utilisé dans la norme DVB-T de TV numérique (TNT). Très efficace en BW.

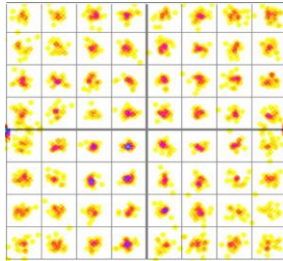
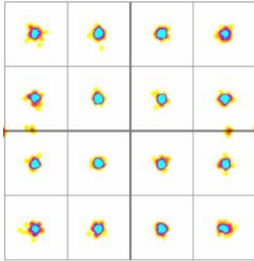


Constellation 16 QAM 3 niveaux
d'amplitude 12 valeurs de phase



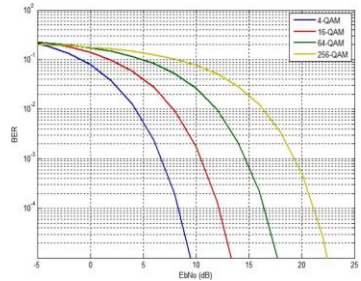
Modulation M-PSK : influence du bruit sur la constellation

- La porteuse modulée voit son amplitude fluctuer, de même que sa phase. Il en résulte que les constellations réelles sont en fait formées de nuages de points.



Canal 33 (570 MHz) TNT allemande 16 QAM rapport C/N ≈ 30 dB

Canal 22 (482 MHz) TNT française 64 QAM rapport C/N ≈ 25 dB



- De la même manière que la modulation M-PSK, pour le même SNR, le BER augmente fortement avec le nombre d'états.

Un BER identique nécessite un rapport signal bruit plus important quand le nombre d'états augmente.



Modulation M-PSK : influence du bruit sur la constellation

- Le tableau ci-dessous donne un résumé de différents formats de modulation et leurs applications dans le domaine de transmissions FH.

| Modulations | Applications |
|-------------|--|
| MSK, GMSK | GSM, CDPD |
| BPSK | Télémétrie astronomique, Modems câbles.. |
| QPSK | Satellite, CDMA, NADC, TETRA... |
| OQPSK | CDMA, Satellites |
| FSK, GFSK | DECT, Paging, AMPS, Données mobiles AM, Sécurité publique... |
| 8PSK | Satellites, Avions, Pilotes de télémétrie pour surveillance des systèmes vidéo large bande |
| 16QAM | Radio numérique hyperfréquences, modems, DVB-C, DVB-T |
| 32QAM | Hyperfréquences terrestres, DVB-T |
| 64QAM | DVB-C, modems, décodeurs larges bandes, MMDS |
| 256QAM | Modems, DVB-C (Europe), Vidéo numérique (US) |



■ Ce chapitre a porté sur les modulations numériques. Les points suivants y sont abordés :

- Concepts de base
- Modulation par déplacement d'amplitude (ASK)
- Modulation par déplacement de fréquence (FSK)
- Modulation par déplacement de phase (PSK)
- Les modulations M-aires (QPSK, MPSK, QAM)
- Modulations et applications



Merci de votre attention

Dr Ibrahima GUEYE

gueye.ibrahimal@esp.sn

ESP 2024-2025