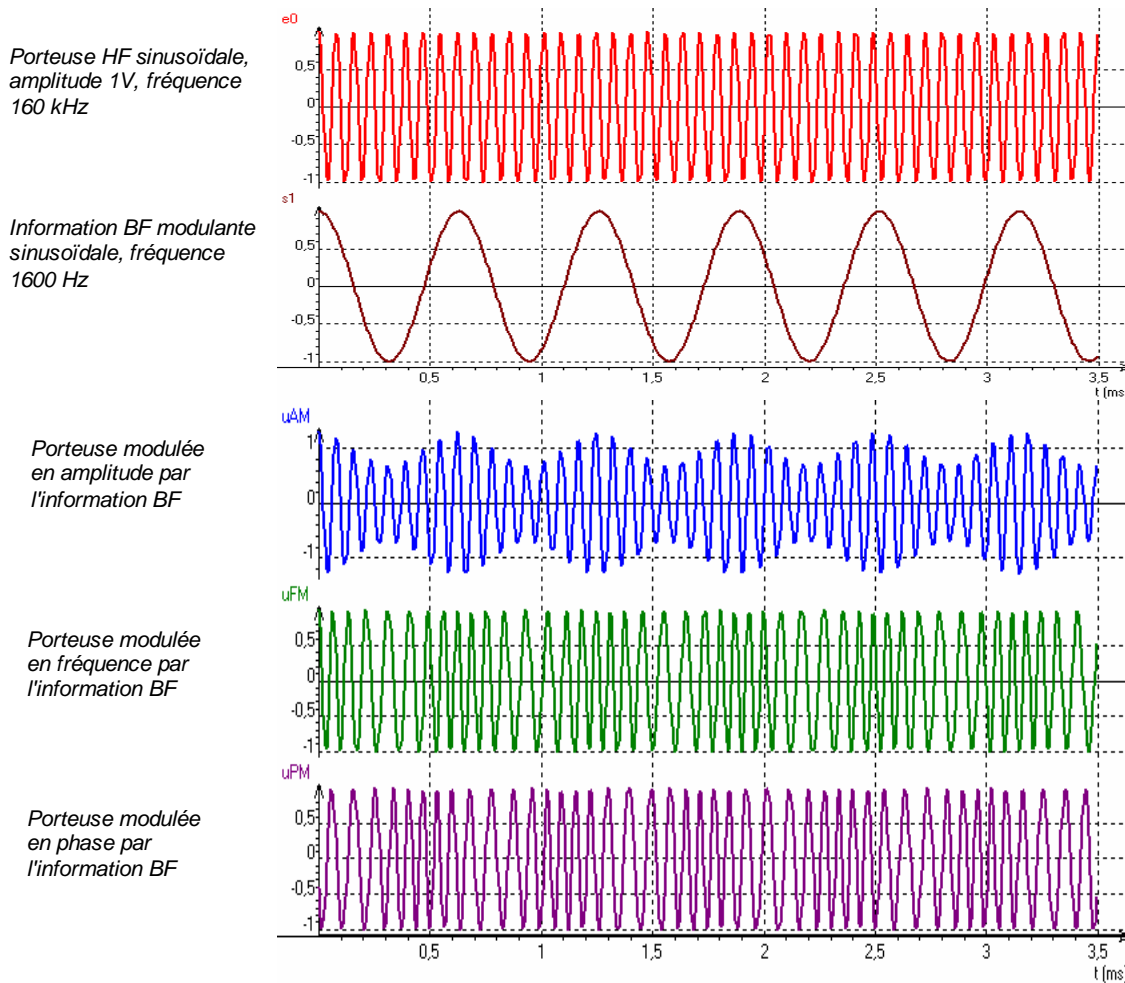


TRANSMISSIONS NUMÉRIQUES SUR FRÉQUENCE(S) PORTEUSE(S) MODULATIONS NUMÉRIQUES

Rappel sur les modulations analogiques.

Une porteuse "haute fréquence" sinusoïdale $e_0(t) = \hat{E} \cdot \cos(2\pi F_0 t)$ peut voir son amplitude, sa fréquence ou encore sa phase modulées par une information "basse fréquence" $s(t)$.

Il en résulte ainsi des signaux tels que représentés ci-dessous:



Modulations numériques fondamentales.

On retrouve les mêmes procédés de modulation d'une porteuse sinusoïdale HF, par une information numérique cette fois.

L'information modulante est constituée d'un signal binaire (par exemple), de débit D (bit/s). La valeur de D reste très inférieure à la valeur de la fréquence porteuse F_0 .

Les modulations les plus fréquentes sont ainsi:

- Modulation par déplacement d'amplitude ou ASK (amplitude shift keying)
- Modulation par déplacement de fréquence ou FSK (frequency shift keying)
- Modulation par déplacement de phase ou PSK (phase shift keying)

Les problèmes à résoudre.

→ L'espace des fréquences est limité et il nous faut transmettre de plus en plus d'informations.

→ Nous utilisons de plus en plus de dispositifs mobiles (smartphones et autres tablettes), pour lesquels l'autonomie est un facteur important.

Les systèmes de télécommunications numériques devront concilier ces exigences et assurer la transmission la plus fidèle possible des informations.

Une caractéristique essentielle d'une technique de modulation numérique est son efficacité spectrale η : Pour un débit binaire D (en bits/s) et un encombrement spectral BW du signal modulé, on définit l'efficacité

spectrale d'une modulation par : $\eta = \frac{D}{BW}$ (en bit/s.Hz)

Une bonne efficacité en bande passante entraîne inévitablement une certaine complexité des systèmes de communication ! On progresse ainsi des modulations fondamentales (ASK, FSK et PSK) à l'efficacité spectrale modeste (≤ 1) à des modulations mixtes phase - amplitude telles que les modulations QAM, puis à des techniques multiporteuses telles que COFDM.

A un niveau plus élevé, on peut envisager des techniques de partage du support de transmission (multiplexage) notamment TDMA et CDMA.

Le milieu de propagation est source de perturbations (atténuations, parasites, dispersions, échos...). Ceci va se traduire par une dégradation de la porteuse modulée, et par conséquent de l'apparition d'un certain taux d'erreurs binaires. Le taux d'erreur binaire est défini de la façon suivante :

$$BER \text{ (bit error rate)} = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre de bits transmis}}$$

(Pour la TV numérique, on exige $BER < 10^{-6}$ alors qu'on se satisfera d'un taux d'erreurs de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} en téléphonie GSM)

Densité spectrale de puissance d'une information numérique.

L'information modulante est un signal numérique *aléatoire* de débit binaire D; ce type d'information est caractérisé par un spectre de lobes, *d'encombrement spectral quasiment infini*.

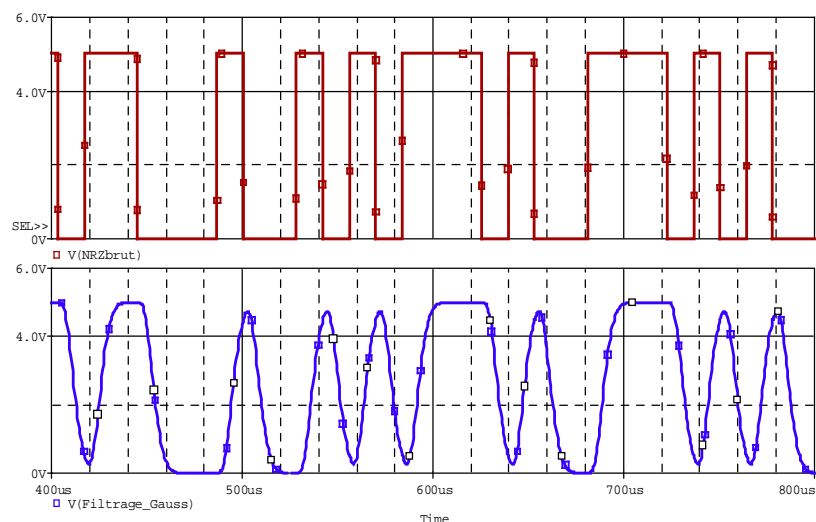
Avant modulation de la porteuse, cette information subit un *filtrage passe bas adapté*, de telle sorte que l'encombrement spectral du signal numérique filtré se *limite à son premier lobe*.

Les filtres les plus courants sont de type "gaussien" ou bien en "cosinus surélevé"

Chronogrammes d'un flux binaire encodé NRZ, de débit binaire D

Flux binaire brut

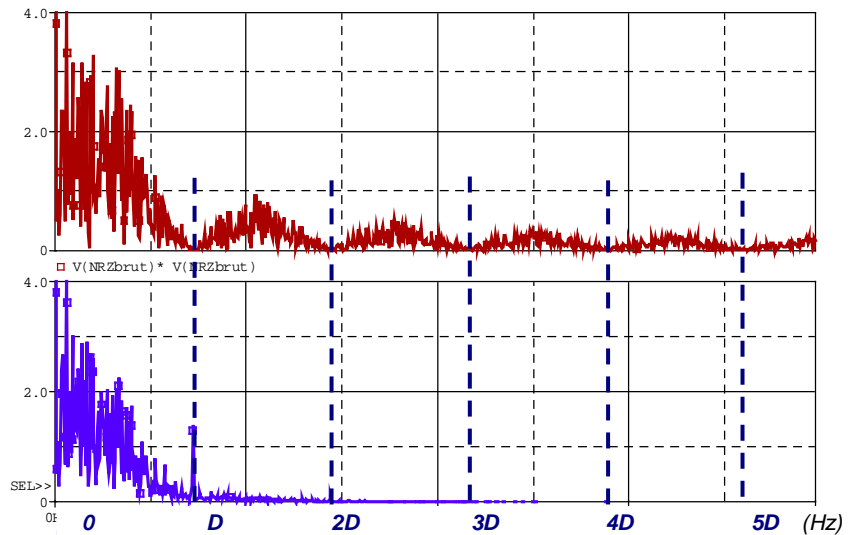
Flux binaire filtré



Spectres correspondants

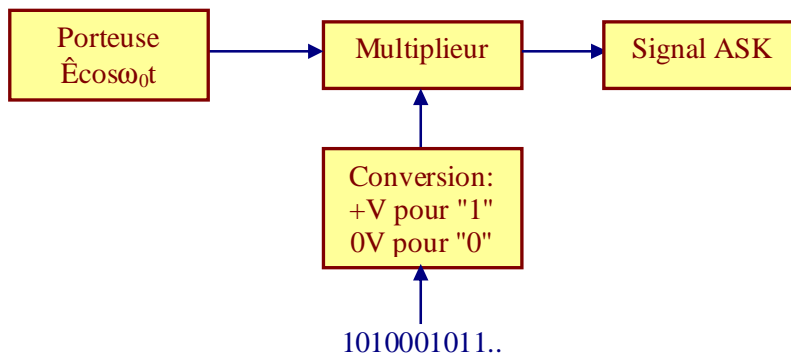
DSP du flux brut:
Encombrement spectral $\gg D$

DSP du flux filtré:
Encombrement spectral $\approx D$



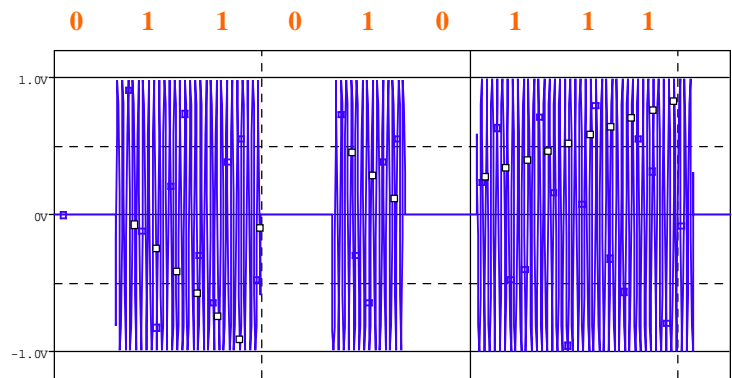
Modulation d'amplitude (ASK: Amplitude Shift Keying)

La technique est des plus simples : La porteuse est juste multipliée par le signal numérique de débit binaire D.



En général, l'indice de modulation m est de 100% ; on parle alors de modulation en tout ou rien ou OOK (on off keying).

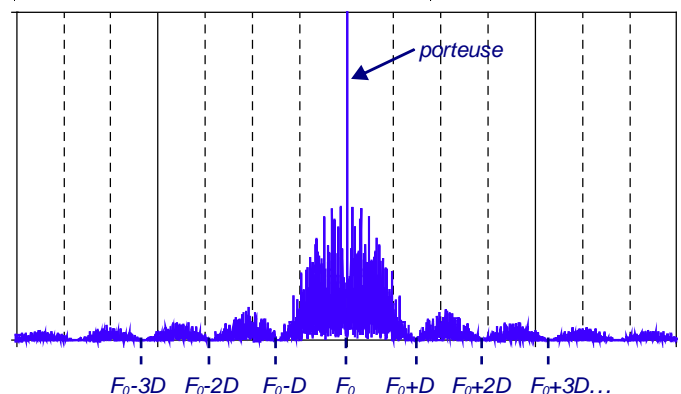
Aspect temporel d'un signal modulé ASK



Spectre d'un signal modulé ASK

C'est un spectre de 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



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 $\frac{1}{2}$!

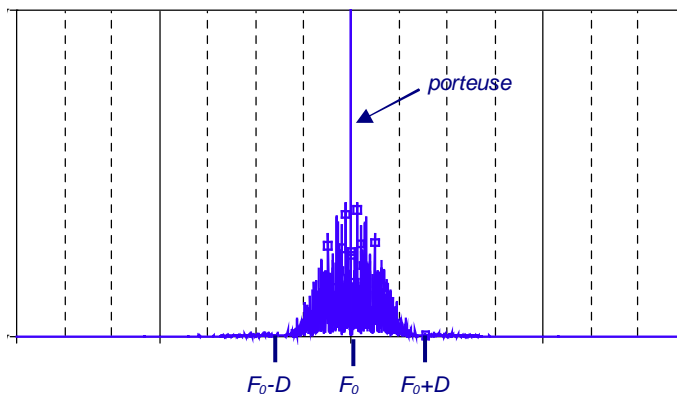
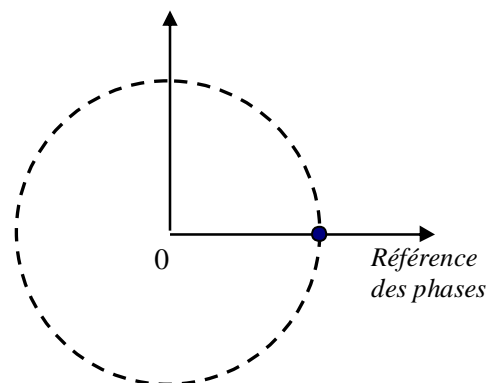


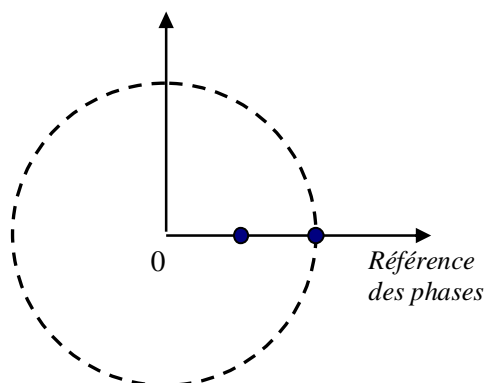
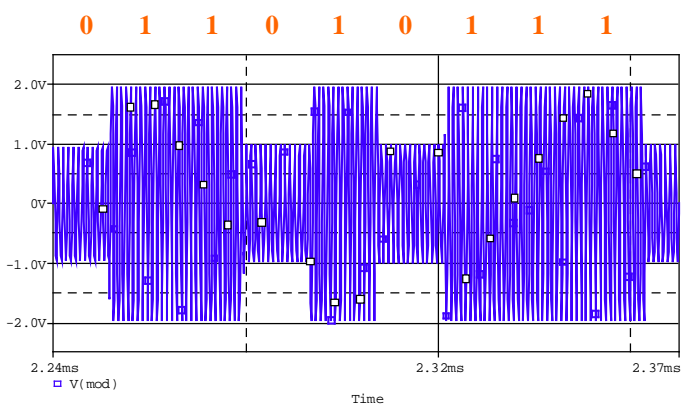
Diagramme polaire de la modulation ASK

Il est commode de représenter l'état de la porteuse sous forme polaire dans le plan : Sur la figure de droite, le point matérialise une porteuse d'amplitude \hat{E} (distance à l'origine) et de phase à l'origine nulle.



Représentation polaire d'une porteuse

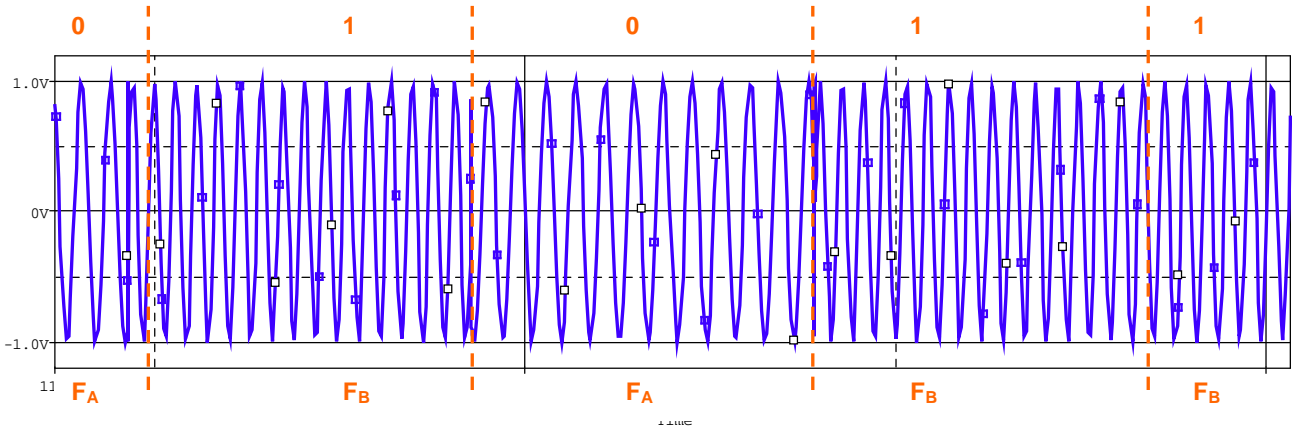
Sur le diagramme suivant on a représenté une porteuse à 2 états d'amplitude, \hat{E} et $\hat{E}/2$, correspondant au chronogramme ci dessous :



Porteuse à 2 états

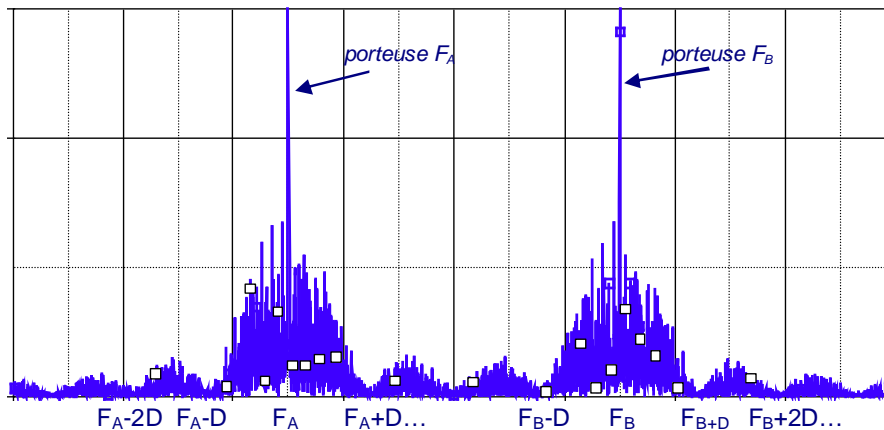
Modulation de fréquence (FSK : Frequency Shift Keying)

La porteuse $\hat{E}\cos(2\pi F_0 t)$ est maintenant modulée en fréquence par le signal numérique : Sa fréquence "saute" d'une valeur F_A (pour un "0") à une valeur F_B (pour un "1"). Les 2 valeurs F_A et F_B sont symétriques par rapport à F_0 .



(Remarque : Sur le chronogramme ci-dessus, on peut remarquer un saut de phase de la porteuse lors de chaque changement de fréquence; ceci est dû à un choix non optimal des 2 fréquences F_A et F_B)

Le spectre d'un signal FSK est très complexe : Autour des 2 fréquences F_A et F_B , on retrouve une évolution en $\left| \frac{\sin x}{x} \right|$, dessinant des lobes. Tout se passe comme si on avait l'addition de 2 spectres OOK, l'un de porteuse F_A et l'autre de porteuse F_B .



Comme en analogique, il est possible de définir un indice de modulation m : La porteuse subit une excursion de fréquence ΔF , telle que $F_A = F_0 - \Delta F$ et $F_B = F_0 + \Delta F$

Si D est le débit binaire d'informations, on définit m par :
$$m = \frac{|F_A - F_B|}{D} = \frac{2\Delta F}{D}$$

Même avec un filtrage adapté des données, l'encombrement spectral s'étend de $F_A - D$ à $F_B + D$, soit $BW = 2\Delta F + 2D$.

L'efficacité spectrale est ainsi inférieure à $\frac{1}{2}$!!

Pour l'anecdote historique, les (grands) parents des étudiants actuels ont connu le Minitel, ancêtre français de l'Internet. Ce système utilisait une modulation FSK dite V23 caractérisée par :

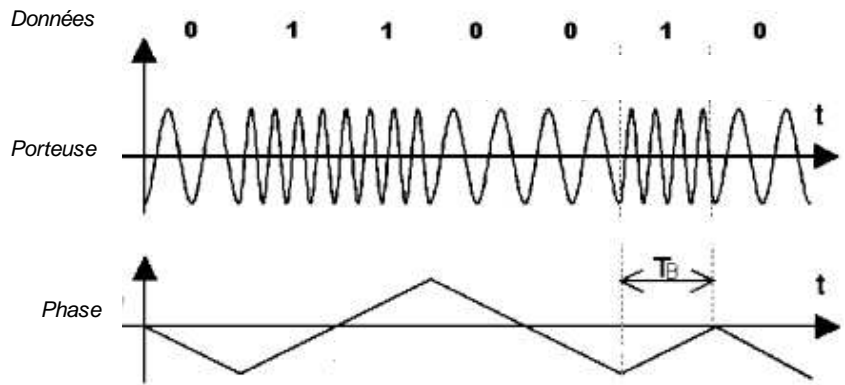
Canal descendant: Débit $D = 1200$ bit/s, $F_A = 1300$ Hz, $F_B = 2100$ Hz

Canal montant : Débit $D = 75$ bit/s, $F_A = 390$ Hz, $F_B = 450$ Hz

Cette technique correspondait à un encombrement spectral de moins de 3000Hz, bien adapté à la ligne téléphonique du réseau RTC.

Il est possible de faire un peu mieux avec de la modulation FSK à phase continue.

Dans ce procédé, les 2 fréquences de codage ainsi que le débit binaire D sont liés de telle sorte que la phase de la porteuse évolue sans discontinuité au cours du temps (Cf. chronogrammes ci-contre)



Dans le spectre du signal modulé, les raies aux fréquences F_A et F_B disparaissent.

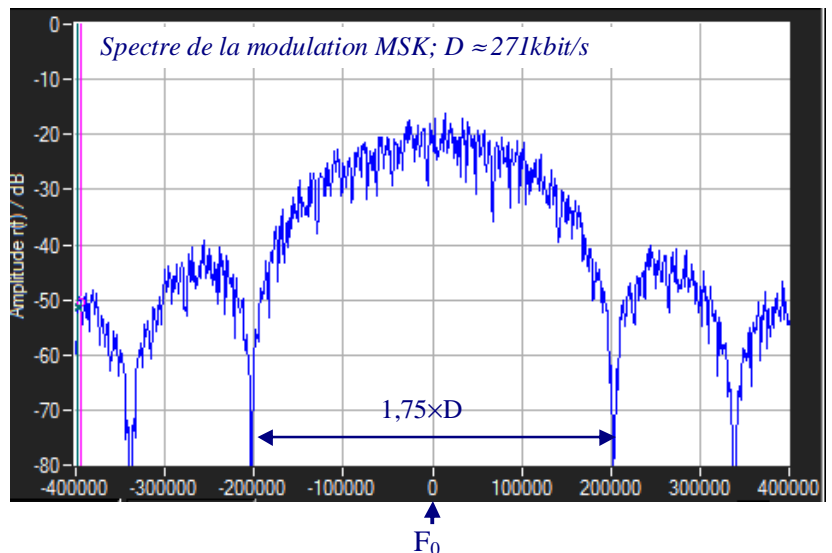
Un cas intéressant correspond à un indice de modulation de 0.5 : Il s'agit de la modulation MSK (Minimum Shift Keying).

L'excursion en fréquence est $\Delta F = 0.25 \times D$, et les fréquences F_A et F_B sont données par :

$$F_A = F_0 - D/4 \quad \text{et} \quad F_B = F_0 + D/4$$

Une propriété importante est que la phase évolue sur $\pm \pi/2$ pendant un temps bit.

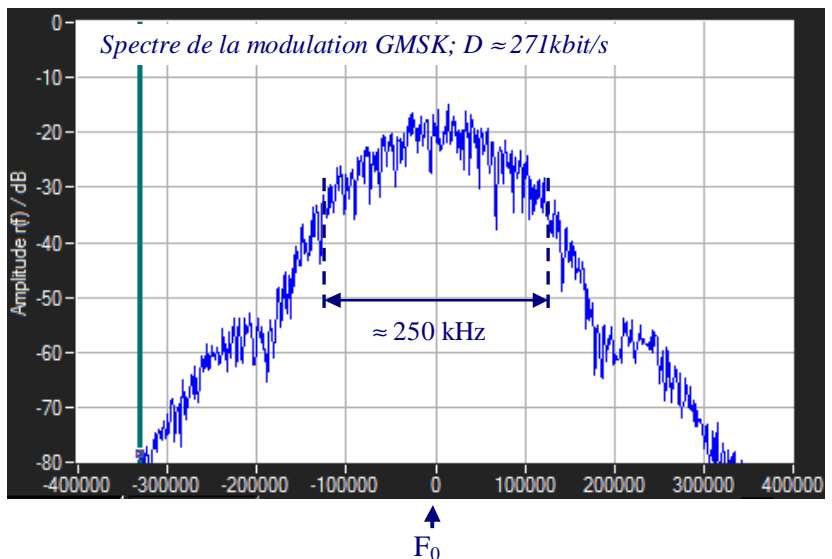
Le spectre de la modulation MSK ne présente plus de raie pour les fréquences F_A et F_B ; le lobe central est réduit à une largeur de $1,75 \times D$, et les 2 premiers lobes secondaires sont à plus de 20dB en dessous du lobe central.



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

Le spectre de la modulation GMSK est dessiné à droite. Si le lobe central est conservé, les lobes latéraux ont pratiquement disparu.

Ce type de modulation de fréquence fonctionne dans la téléphonie GSM (ou 2G) avec $D \approx 271 \text{ kbit/s}$; 99% de la puissance est concentrée dans une bande de 250kHz. L'efficacité spectrale est voisine de 1,3bit/s.Hz

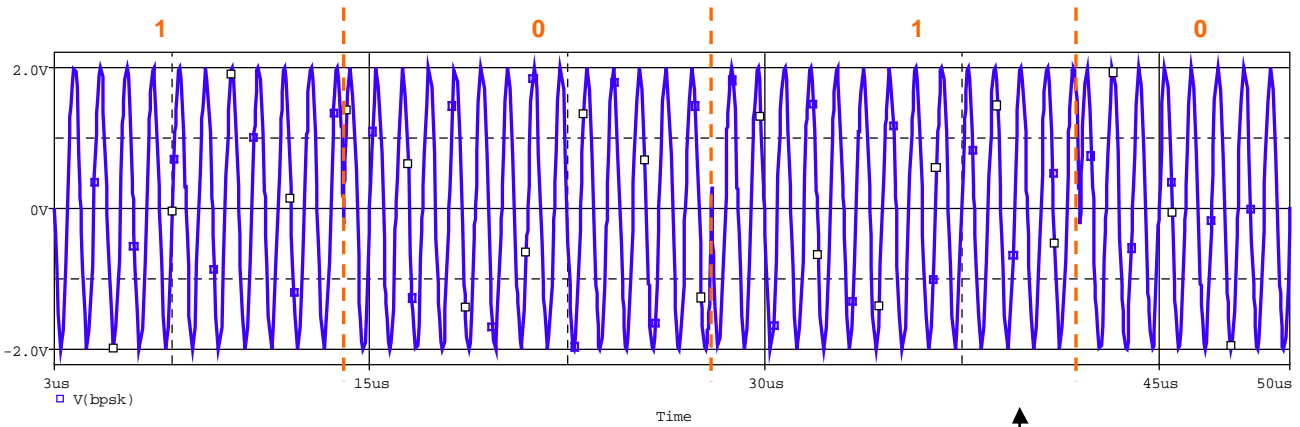


La modulation GMSK est aussi utilisée en téléphonie DECT (Digital European Cordless Telephone), avec un débit de 1,15Mbit/s et une largeur de canal de 1,728MHz. (efficacité de l'ordre de 0,66 bit/s.Hz)

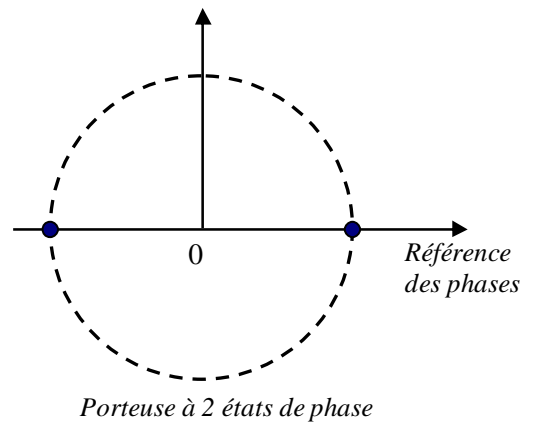
Modulation de phase BPSK (Binary Phase Shift Keying).

Dans ce procédé, c'est la phase ϕ de la porteuse qui est modulée par les données binaires :
 Si à "0" on associe $\hat{E}\cos(2\pi F_0 t)$ alors à "1" on associe $\hat{E}\cos(2\pi F_0 t + \pi)$

Exemple de chronogramme:

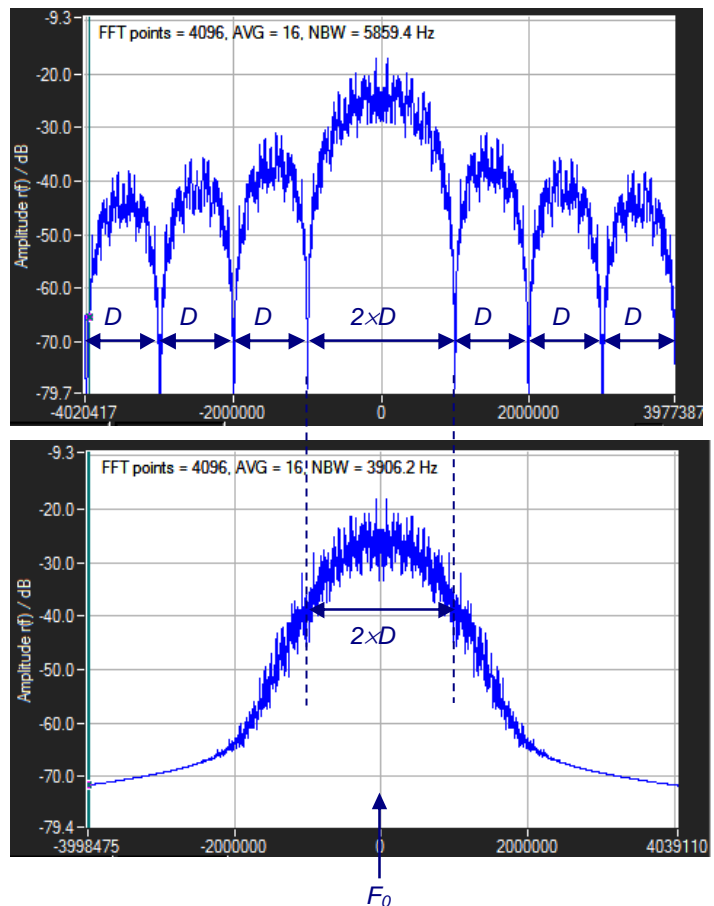


La porteuse ayant une amplitude constante et une phase à l'origine qui peut prendre les 2 valeurs 0 et π , on peut représenter un diagramme polaire de ce type de modulation:



Le spectre est classique :
 1 lobe central de largeur double du débit D, entouré de lobes secondaires de largeur moitié.

(Cf. exemple à droite, pour un débit de 1Mbit/s)



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)

Modulations M-aires.

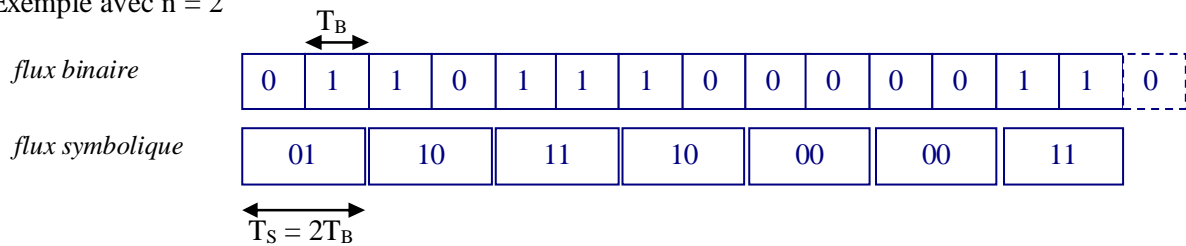
Les modulations numériques binaires vues plus haut sont caractérisées par une efficacité spectrale dépassant rarement l'unité, ce qui devient insuffisant à l'heure actuelle, au vu des débits à assurer dans un canal donné.

On a ainsi mis au point des modulations à M états (M = 4, 8, 16...) : Ce sont des modulations de phase (M-PSK) ou des modulations mixtes phase - amplitude telles les modulations M - QAM.

Ces modulations reposent sur 2 principes simples :

- On regroupe le flux de données binaires de débit D en symboles de n bits : Chaque symbole a une durée $T_S = n \times T_B$ et au débit binaire se substitue le débit symbolique $R = D / n$ (en bauds)

Exemple avec n = 2



Avec 2 bits par symbole, l'alphabet symbolique comprend 4 mots, 00, 01, 10 et 11 ; il faudra donc prévoir 4 états de la porteuse modulée pour représenter cet alphabet.

Généralisation : Si on définit des symboles de n bits, l'alphabet symbolique va comporter $M = 2^n$ "mots" et la porteuse devra avoir M états différents pour représenter la totalité de l'alphabet.

- On module 2 porteuses en quadrature :

Un signal sinusoïdal $v = \hat{E} \cdot \cos(\Omega_0 t + \varphi)$ peut également s'écrire
 $v = \hat{E} \cdot \cos\varphi \cdot \cos\Omega_0 t - \hat{E} \cdot \sin\varphi \cdot \sin(\Omega_0 t)$

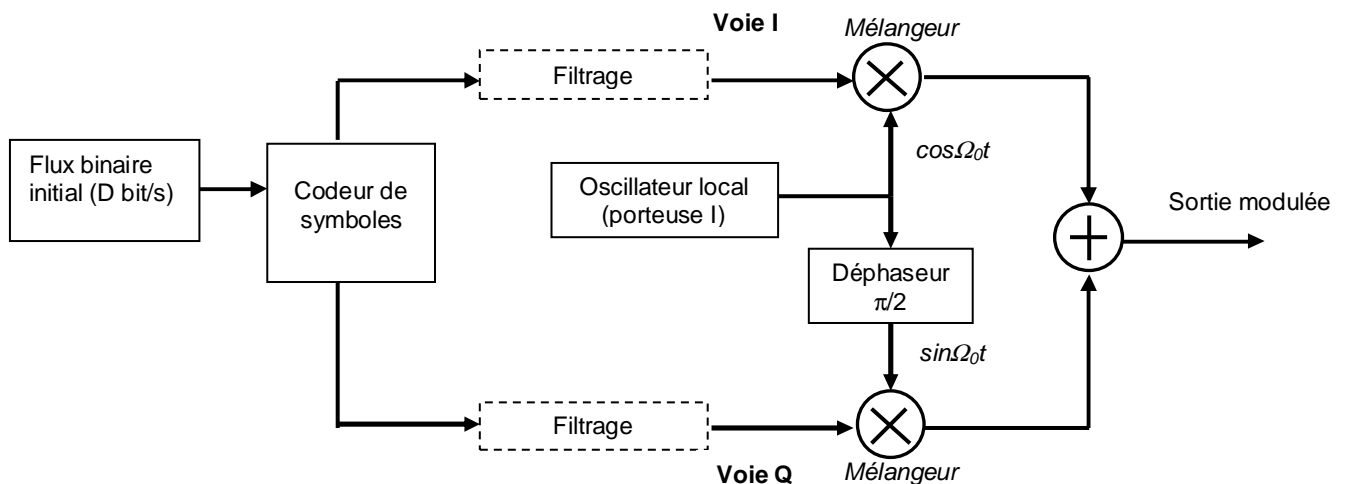
Autrement dit, une porteuse de pulsation Ω_0 et d'amplitude \hat{E} peut être vue comme combinaison de 2 porteuses en quadrature $\cos\Omega_0 t$ et $\sin\Omega_0 t$, d'amplitudes respectives $\hat{E} \cos\varphi$ et $\hat{E} \sin\varphi$.

On convient d'écrire $v = I \times \cos\Omega_0 t + Q \times \sin\Omega_0 t$

Les termes I et Q, nommés composantes en phase et en quadrature modulent les 2 porteuses.

En choisissant judicieusement I et Q, il est possible de réaliser un modulateur de phase ou d'amplitude et de phase à M états.

Le modulateur qui réalise ces opérations est nommé modulateur IQ. Son schéma général est le suivant:



Le séparateur "aiguille" les données pour élaborer les signaux I et Q.

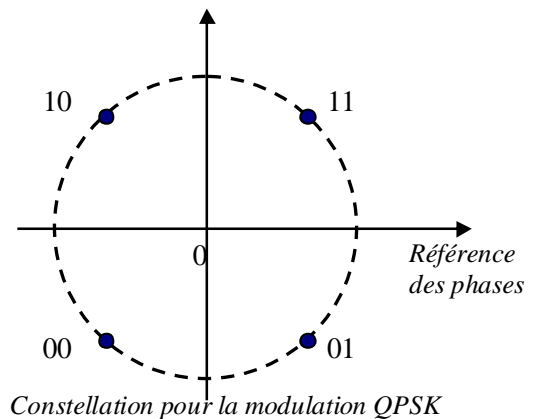
Exemple 1 : La modulation QPSK.

Il s'agit d'une modulation de phase à 4 états.
 Chaque symbole (00, 10, 01 et 11) correspond à un état de phase de la porteuse modulée.
 Avec $v = \hat{E} \cdot \cos(\Omega_0 t + \varphi) = I \times \cos \Omega_0 t - Q \times \sin \Omega_0 t$, on obtient le tableau suivant :

Symbole	I	Q	φ
11	$0.707\hat{E}$	$-0.707\hat{E}$	$\pi/4$
10	$-0.707\hat{E}$	$-0.707\hat{E}$	$3\pi/4$
00	$-0.707\hat{E}$	$0.707\hat{E}$	$5\pi/4$
01	$0.707\hat{E}$	$0.707\hat{E}$	$7\pi/4$

En conséquence, la représentation polaire de la porteuse modulée va comporter 4 points, correspondant à chacun de ces 4 états.
 L'amplitude de la porteuse restant la même, ces 4 points vont se situer sur un cercle de rayon \hat{E} .

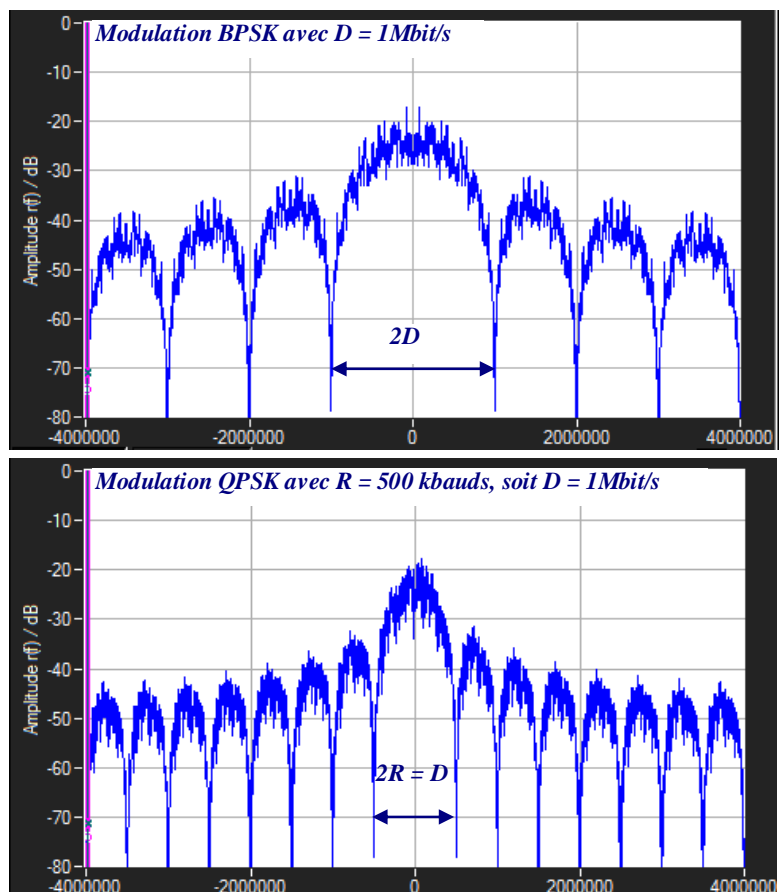
On parle de diagramme de constellation pour la représentation polaire des états de la porteuse modulée.



Aspect spectral.

Le spectre d'une modulation QPSK est analogue à celui d'une modulation BPSK, à ceci près que la largeur du lobe central est moitié moindre.
 Voir ci-contre le spectre d'une modulation BPSK avec un débit binaire de 1Mbit/s et le spectre de la modulation QPSK correspondante. ($R = D/2 = 500$ kbit/s)

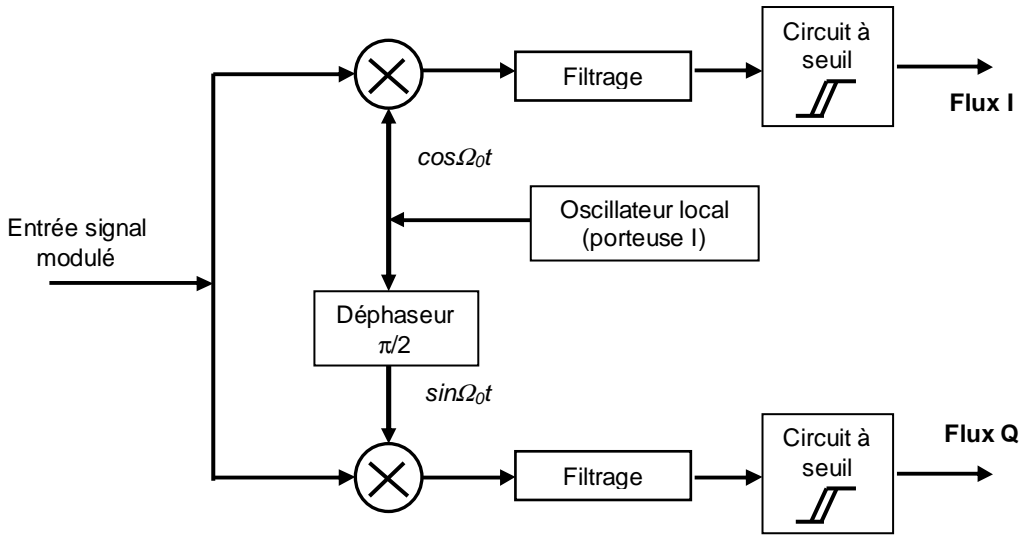
À débit binaire identique, l'efficacité spectrale de la modulation QPSK est double de celle de la modulation BPSK.



Démodulateur QPSK.

Il fonctionne de façon symétrique par rapport au modulateur I Q présenté plus haut.

Le principe s'apparente à celui d'une démodulation cohérente : Le signal modulé est d'abord multiplié par 2 porteuses locales en quadrature. Les produits sont ensuite filtrés et envoyés sur des circuits à seuil, afin de régénérer les flux I et Q.

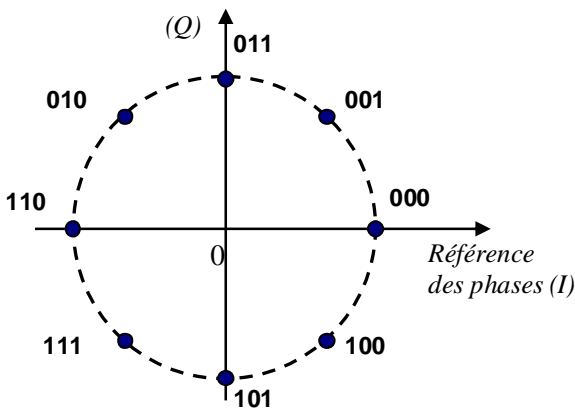


Ce démodulateur est généralisable aux différentes modulations M-PSK; la grosse difficulté réside dans la réalisation d'une porteuse locale, parfaitement synchrone de la porteuse modulée entrante.

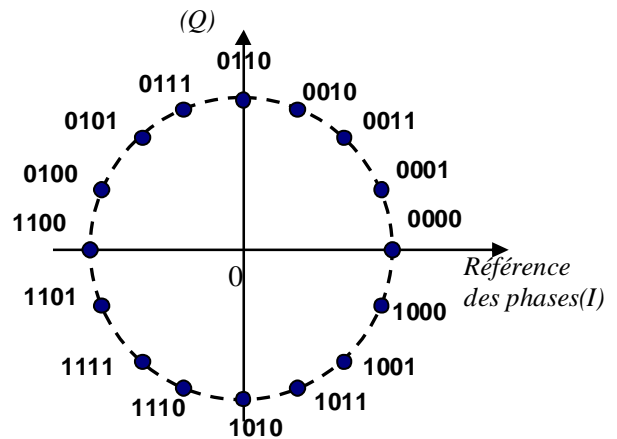
Exemple 2 : Autres modulations M-PSK.

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 : La norme DVB-S2 de TV par satellite prévoit ainsi la possibilité de transmissions en 32PSK pour des applications HD ainsi que des transmissions "grand public" en 8PSK ou 4PSK, selon les conditions de propagation.

Exemples de constellations M-PSK:



Constellation pour la modulation 8PSK (3 bits par symbole)



Constellation pour la modulation 16PSK (4 bits par symbole)

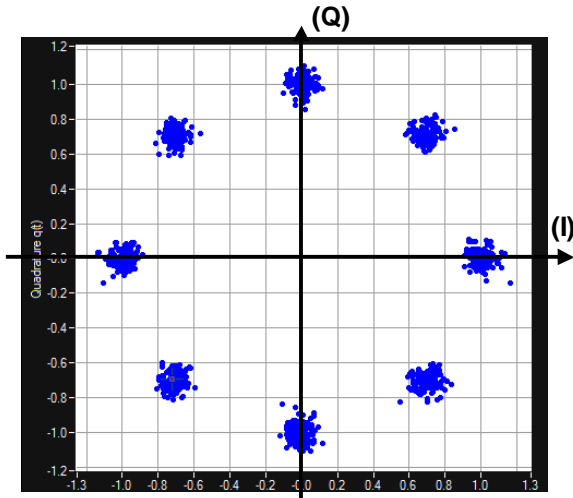
L'augmentation du nombre d'états permet, à débit constant, d'occuper une bande BW de plus en plus faible, ce qui permet d'augmenter de pair l'efficacité spectrale .

Inversement, la robustesse de ces modulations diminue avec le nombre d'états, surtout en présence de bruit. (voir page suivante)

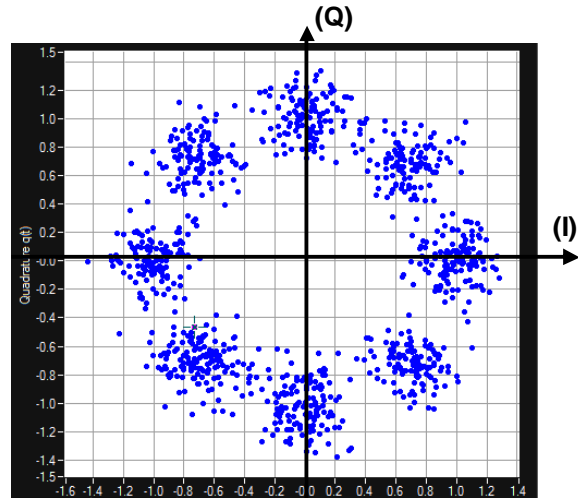
Influence du bruit sur les constellations.

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.

Exemples avec une modulation 8PSK bruitée :



Constellation 8PSK avec rapport signal bruit de 25dB
les différents états sont bien séparés



Constellation 8PSK avec rapport signal bruit de 15dB
la différenciation des états est difficile

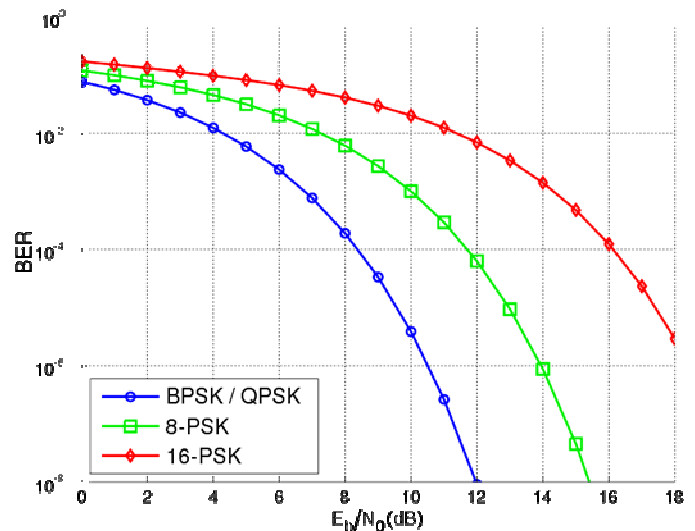
Influence du bruit sur le taux d'erreur binaire

On donne ci-contre un exemple de courbes représentant le taux d'erreur binaire (Bit Error Rate) en fonction du rapport signal bruit (par bit)

Pour un même type de modulation PSK, le BER est d'autant plus faible que le rapport signal bruit est bon.

Par contre, pour un même rapport signal bruit, le BER augmente fortement avec le nombre d'états !!

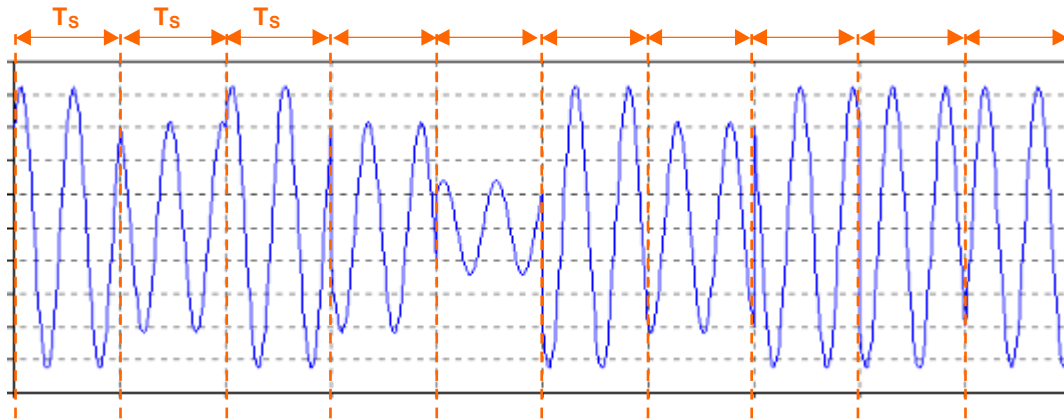
Une transmission de qualité est plus délicate avec une modulation à grand nombre d'états.



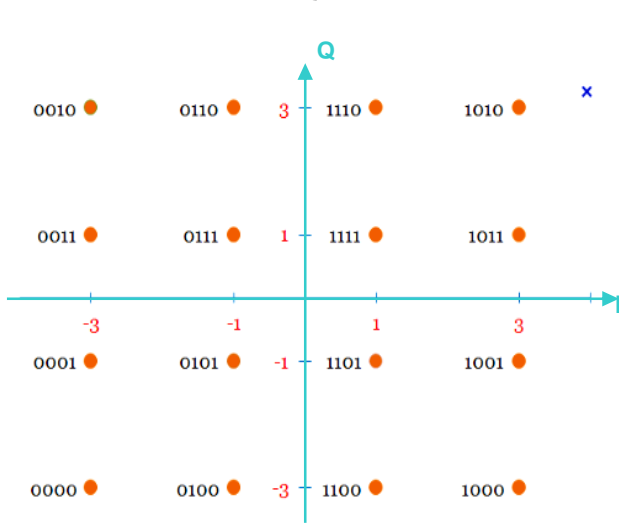
Exemple 3 . Modulations amplitude - phase à M états : Modulations M - QAM.

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) : 64 QAM pour la TNT en France et 16 QAM pour la TNT allemande.

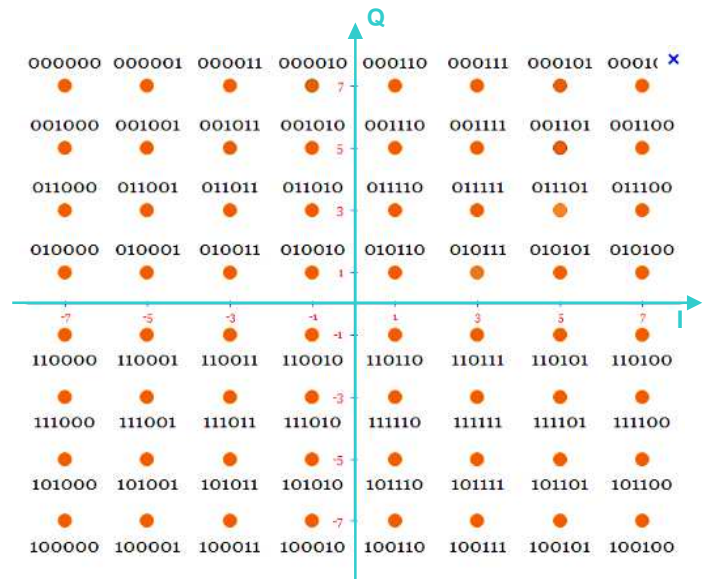
Voir ci-dessous une illustration de chronogramme de la porteuse pour une modulation 16QAM : Chaque symbole (4 bits) a une durée T_s ; on peut observer des sauts de phase et d'amplitude entre 2 symboles successifs.



Les constellations en M-QAM ont l'allure suivante :



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

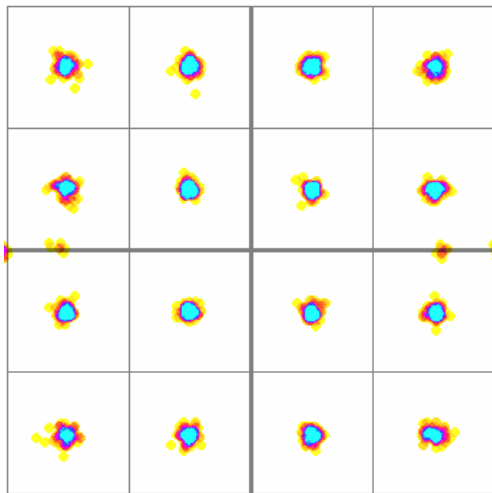


Constellation 64 QAM
 9 niveaux d'amplitude
 52 valeurs de phase

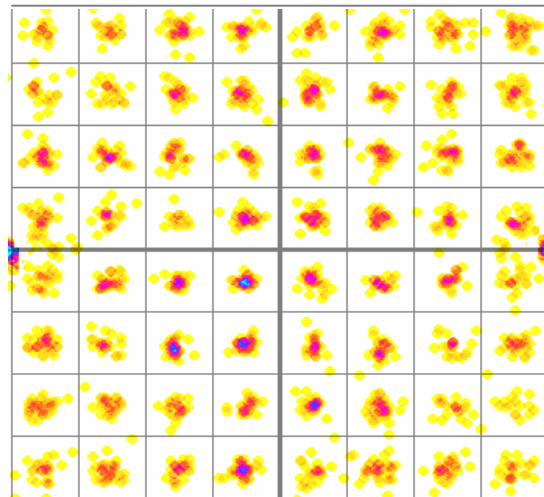
La modulation et la démodulation M-QAM reposent sur les mêmes principes que la modulation - démodulation M-PSK : Modulation de 2 porteuses en quadrature au sein d'un modulateur IQ, et démodulation cohérente. (Les schémas donnés en pages précédentes peuvent être translatés aux modulations M-QAM)

Les remarques quant au dilemme robustesse - efficacité spectrale sont identiques : L'efficacité spectrale augmente avec le nombre d'états (on atteint 8 bit/s.Hz pour la 64 QAM), mais la robustesse au bruit diminue dans les mêmes proportions.

Constellations QAM en présence de bruit : Relevés effectués à l'aide d'un mesureur de champ (Promax HD ranger) sur la même descente d'antenne 75Ω.



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



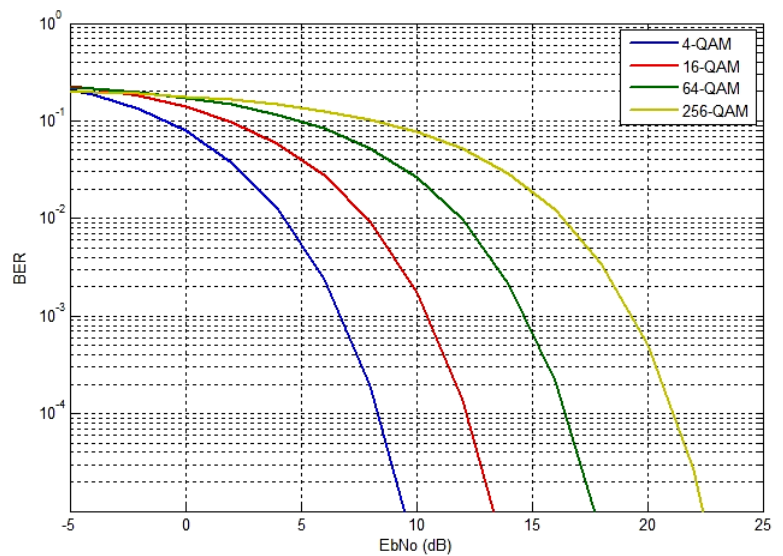
Canal 22 (482 MHz) TNT française
64 QAM rapport C/N \approx 25 dB

Influence du bruit sur le taux d'erreur binaire.

Même dilemme qu'en M-PSK :

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

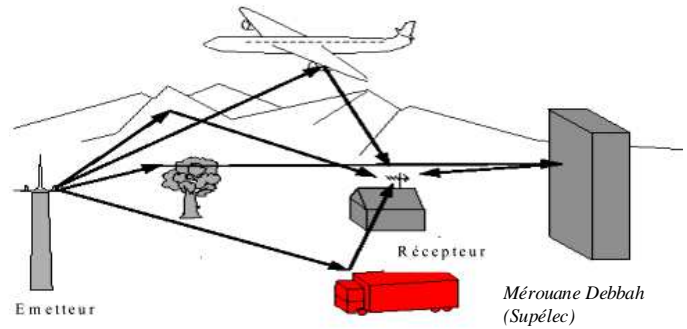
A rapport signal bruit donné, le BER croit fortement avec le nombre d'états.



Modulations à porteuses multiples : Codage COFDM.

Un problème important en transmission est celui du multi trajets :

Entre l'émetteur et le récepteur, le signal peut se propager selon plusieurs trajets, correspondants à des différences δt de temps de propagation. Il en résulte une dégradation du signal reçu, lorsque ces δt sont comparables ou supérieurs aux durées symboliques.

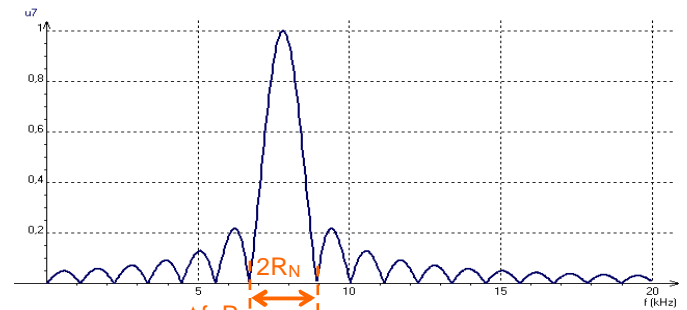


On remplace alors un signal initial, modulant une porteuse unique avec un débit symbolique $R_1 = 1/T_{S1}$, par N signaux "parallèles", modulant N porteuses adjacentes chacune avec des débits symboliques $R_N = R/N$.

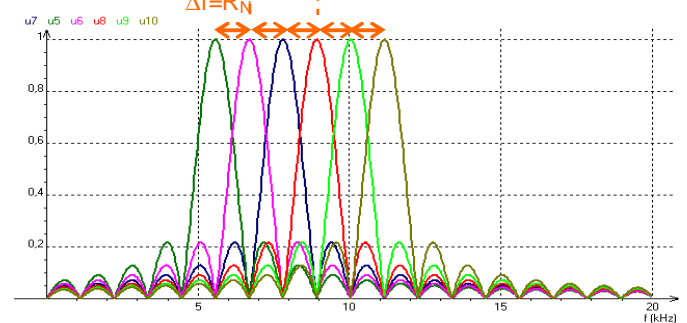
Il en résulte que la durée apparente d'un symbole devient $T_{S2} = N \times T_{S1}$; cette augmentation de la durée symbolique minimise l'effet des décalages temporels δt dus au multi trajets.

Afin d'optimiser l'efficacité spectrale, ces N porteuses sont disposées "orthogonalement" : La densité spectrale de puissance de l'une est nulle quand celle de la suivante est maximale.

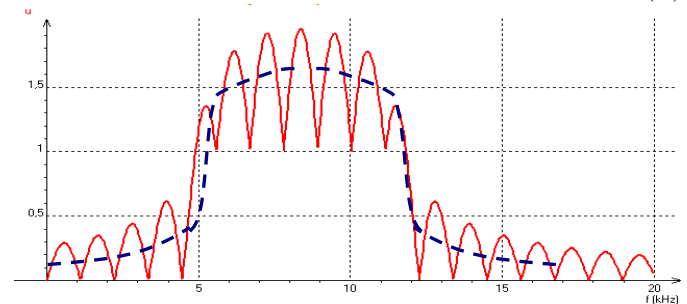
a : Spectre d'une porteuse modulée au rythme R_N



b : Spectre de porteuses adjacentes modulées au rythme R_N . L'orthogonalité impose que le décalage en fréquence entre 2 porteuses contiguës soit $\Delta f = R_N$.



c : Spectre résultant : Sa largeur est $N \times R_N$. Sa forme s'approche d'un rectangle quand N est grand, optimisant ainsi l'occupation du canal alloué.



Cette technique est nommée COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

Elle est notamment utilisée pour la diffusion de la TNT et de la 4G et le sera pour la diffusion de la future (?) radio numérique terrestre sur la bande III (VHF) .

Quelques caractéristiques des émissions en TV numérique terrestre en France.

Actuellement et jusqu'au 5 avril 2016, la bande UHF est divisée en 40 canaux de largeur 8 MHz, entre 470 MHz et 790 MHz.

Chaque canal peut diffuser simultanément un multiplex de 6 chaînes en SD (720×576 pixels ≈ 414720 pixels par image) ou 3 chaînes en HD (1920×1080 pixels ≈ 2073600 pixels par image). Il faut actuellement 8 multiplex en France pour diffuser l'ensemble des chaînes de la TNT.

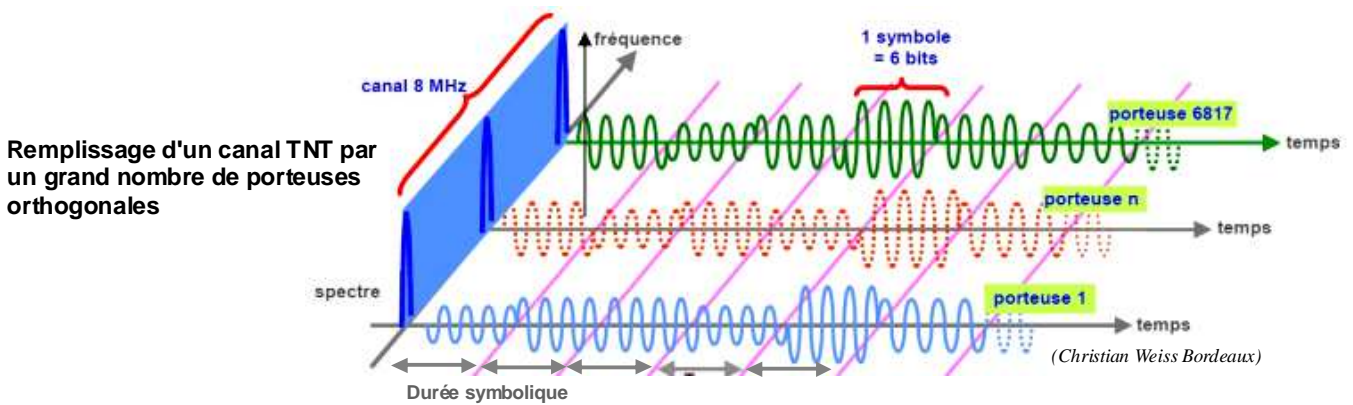
À compter du 5 avril 2016, la redistribution des fréquences n'attribuera plus que 28 canaux de largeur 8MHz, entre 470 MHz et 694 MHz à la TNT; toutes les chaînes étant diffusées en HD avec la norme de compression MPEG4. (En attendant le regroupement de toutes les chaînes au sein de 6 multiplex au lieu de 8 grâce à la nouvelle norme de compression HEVC (2019- 2022 ??))

Chaque canal est occupé par 6817 porteuses orthogonales, espacées de 1116 Hz chacune. ($6817 \times 1116 \approx 7,6$ MHz)

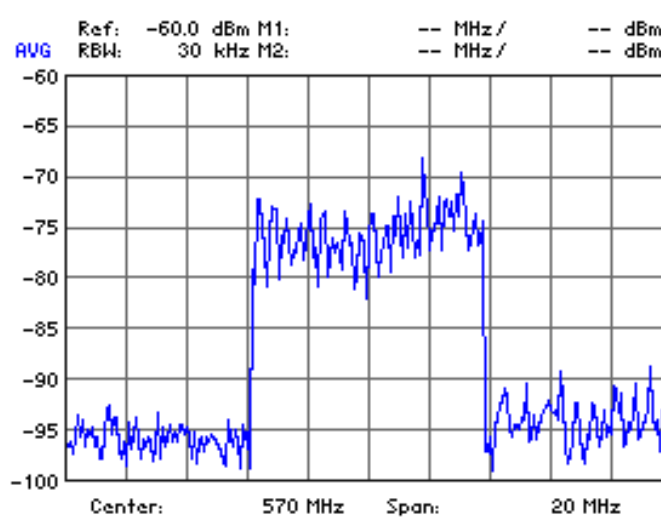
Chaque porteuse est modulée en 64 QAM par des symboles de 6 bits, avec un débit de 1116 bauds.

Chaque symbole a ainsi une durée de 896 μ s, réduisant fortement les effets du multi trajets sur la qualité de réception.

Le débit binaire correspondant est ainsi de $6 \times 1116 \times 6817 \approx 45$ Mbit/s.



Réception du canal 33 de la TNT à Strasbourg ; remarquer la forme quasi rectangulaire du spectre qui optimise l'occupation du canal

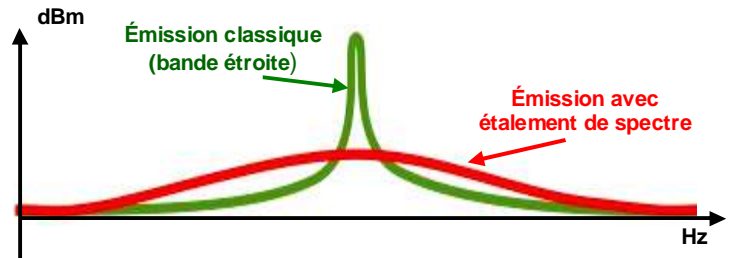


Modulation par étalement de spectre (spread spectrum modulation).

L'objectif est de rendre une communication numérique insensible aux perturbations externes, ou bien de la dissimuler.

Cette technique est utilisée notamment pour les communications 3G, WIFI, Bluetooth, ainsi que dans le GPS. Elle utilise un *multiplexage par code* (CDMA : Code Division Multiple Access) ; le CDMA permet à plusieurs utilisateurs de communiquer simultanément sur la même fréquence.

Le principe consiste à répartir la DSP de l'émission sur une plage de fréquence beaucoup plus large, abaissant par là même le niveau moyen.



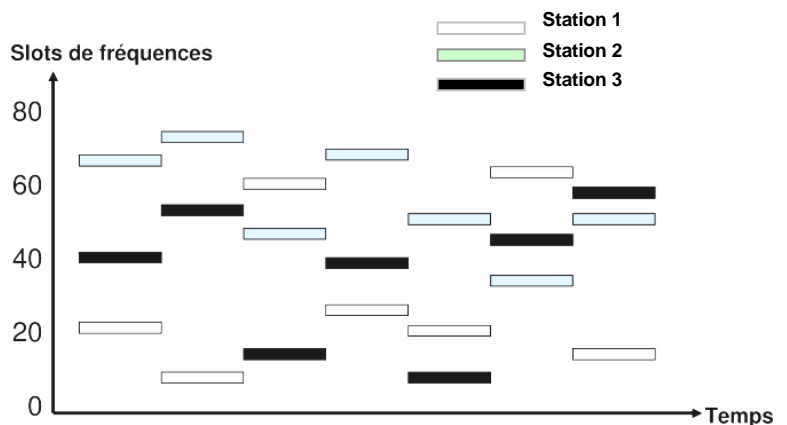
Il existe 2 techniques :

• **Codage par saut de fréquence : FHSS (Frequency Hope Spread Spectrum)**

La bande de communication est découpée en N canaux. (slots de fréquences)

Chaque station émet en sautant entre canaux à un rythme et selon un code donnés. (Le récepteur doit bien sur connaître ces codes)

Les sauts se produisent à un certain rythme, selon une séquence prédéfinie. Celle-ci est optimisée, pour minimiser les probabilités de "collision" entre plusieurs transmissions simultanées.



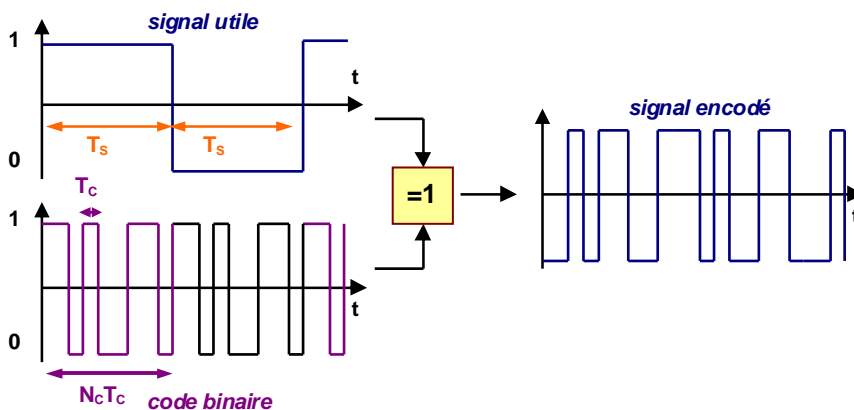
Cette méthode est utilisée par Bluetooth: La bande ISM (2400 à 2483,5 MHz) est découpée en 79 canaux de 1MHz. Les sauts en fréquence ($1/625\mu s = 1600$ sauts par seconde) ont une amplitude de 6 MHz au minimum et sont déterminés par calcul.

Les signaux perturbateurs occupant une bande spectrale limitée ne perturberont donc la liaison que de temps en temps et pour une durée limitée à un time-slot soit 625 μs .

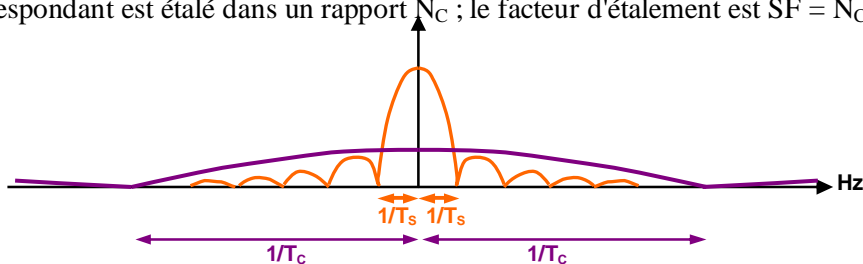
Selon la norme Bluetooth, la modulation est de type GMSK, avec une excursion de fréquence de 150 kHz.

• **Codage par séquence directe : DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum).**

Le signal utile à transmettre, de débit $1/T_s$ est "mêlé" à un code binaire pseudo-aléatoire, de débit $1/T_c$, N_c fois plus rapide. Le mélange est réalisé par un OU exclusif.



Le signal ainsi encodé présente un débit apparent N_C fois plus grand que le signal initial.
Le spectre correspondant est étalé dans un rapport N_C ; le facteur d'étalement est $SF = N_C$ ($SF \Leftrightarrow$ spread factor)



Plusieurs émetteurs peuvent alors coexister sur la même bande de fréquence : Il suffit que chacun d'eux travaille avec son code propre.

Le Wifi et le GPS utilisent cette technique.

Pour le GPS par exemple, le signal qui donne la position du satellite a un débit de 50bit/s.

Il est mélangé à un code aléatoire de débit 1,023 Mbit/s.

Le facteur d'étalement est $SF \approx 20400$, ce qui va entraîner un abaissement de la DSP correspondante de 43dB.

Il en résulte que le signal GPS est noyé dans le bruit de fond et donc inobservable directement !!

Pour une transmission Wifi le signal est mélangé à une séquence pseudo aléatoire de débit 11 Mbits/s, ce qui donne un spectre de largeur $BW=22$ MHz.

Selon le débit du signal initial (non étalé) et la norme Wifi (b, g, n ou ac), le signal étalé module alors une porteuse en BPSK ou QPSK ou plusieurs porteuses avec un codage COFDM.