

LES MODULATIONS NUMERIQUES

Objet du cours : définir les caractéristiques des différentes modulations numériques mises en œuvre dans les systèmes de communications sans fil.

1. Les modulations numériques de base

1.1. Les trois types de modulations analogiques : rappels.

Les techniques traditionnelles permettant de transmettre par voie hertzienne, une **grandeur analogique** d'un point A vers un point B distant, sont connues. Il s'agit des trois **modulations analogiques** classiques :

- **AM (Amplitude Modulation)** ou **Modulation d'Amplitude MA** ;
- **FM (Frequency Modulation)** ou **Modulation de Fréquence MF** ;
- **PM (Phase Modulation)** ou **Modulation de Phase MP**.

Pour ce type de modulation, la grandeur **analogique** à transmettre (appelée signal **modulant**) module une **onde porteuse** de fréquence f_c , en modifiant l'un de ses trois paramètres caractéristiques Amplitude (modulation AM), Fréquence (modulation FM) ou Phase (modulation PM).

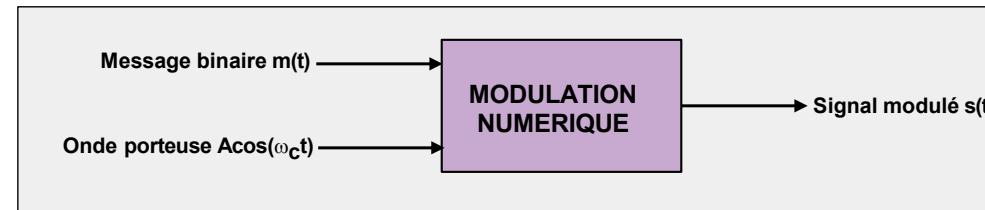
Actuellement, ces techniques de modulations sont principalement utilisées dans le domaine de la radiodiffusion.

1.2. Les trois types de modulations numériques de base

La numérisation de grandeurs initialement analogiques, telles que la voix, par exemple, a conduit à la mise au point de nouvelles techniques visant à transmettre des grandeurs **numériques** par voie hertzienne. Ces techniques reposent sur le principe des **modulations numériques**.

Dans ce cas, tout comme pour les modulations analogiques, le dispositif d'émission associé au système de communications, requiert une **onde porteuse** sinusoïdale de fréquence f_c , destinée au

transport (d'où la terminologie « **porteuse** » choisie) du message binaire à transmettre :



La figure présentée ci-dessous définit l'allure du signal modulé $s(t)$ correspondant à la transmission du message binaire $m(t)$ constitué des 5 bits 10010, et ce, pour les trois types de modulations numériques de base :

- modulation **ASK** (Amplitude Shift Keying), ou **Modulation par Déplacement d'Amplitude MDA** ;
- modulation **FSK** (Frequency Shift Keying), ou **Modulation par Déplacement de Fréquence MDF** ;
- modulation **PSK** (Phase Shift Keying), ou **Modulation par Déplacement de Phase MDP**.

Le signal modulant $m(t)$.

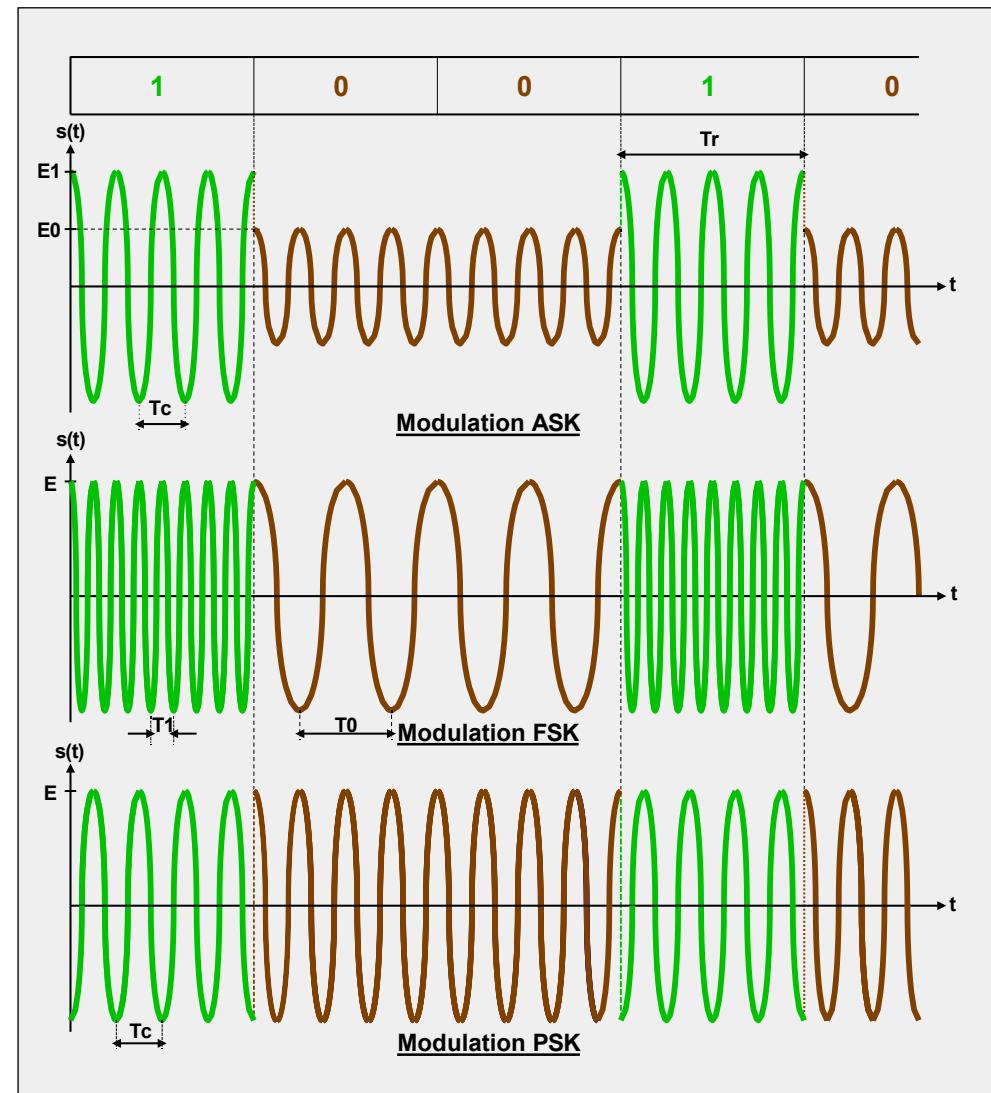
Le message $m(t)$ à transmettre n'est pas un signal électrique, mais une grandeur discrète (dans cet exemple, on transmet le nombre 18).

Ce message, exprimé en binaire $[18]_{(10)} = [10010]_{(2)}$, est transmis sous forme **sérielle** (ici, bit de poids fort en première position), au rythme d'un signal d'horloge de période T_r (**période rythme**).

On peut définir la grandeur $f_r = \frac{1}{T_r}$ (en Hz), appelée **fréquence rythme**.

La valeur affectée à la fréquence rythme correspond également à la **vitesse de transmission**, correspondant au **débit binaire** exprimé en bits/s.

Il s'agit d'une tension sinusoïdale (non représentée ici) d'expression $\text{Acos}(\omega_C t)$, de fréquence f_C (**c** comme **Carrier**, qui signifie porteuse en anglais).



Le signal modulé s(t).

On constate, sur la figure de la page précédente, que pour chacun des trois types de modulations, le signal modulé $s(t)$, pendant la durée élémentaire de transmission d'un bit T_r , a pour expression :

$$s(t) = E \cos(2\pi f t + \chi\pi)$$

Cette tension sinusoïdale est entièrement caractérisée par les trois paramètres :

- amplitude **E**, en volts (**V**) ;
- fréquence **f**, en Hertz (**Hz**) ;
- phase **φ** , en radians (**rad**).

Pour chaque modulation, le changement de niveau logique du bit transmis se caractérise par la modification de l'un des trois paramètres **E**, **f** ou **φ** du signal modulé $s(t)$, et plus précisément, par :

- un **saut d'amplitude** pour une modulation **ASK** ;
- un **saut de fréquence** pour une modulation **FSK** ;
- un **saut de phase** pour une modulation **PSK**.

On peut donc en déduire l'expression du signal modulé $s(t)$ en fonction du niveau logique du bit transmis, et selon le type de modulation considéré :

Remarques :

- On note sur la représentation graphique de la page précédente, pour les modulations ASK et PSK, un rapport $f_c/f_r=4$. En réalité, ce rapport est beaucoup plus élevé. Ce faible rapport n'a été choisi que pour des raisons de lisibilité des représentations graphiques.

Les fréquences f_0 et f_1 associées à toute modulation FSK sont liées à la fréquence f_c de l'onde porteuse par la relation $f_c = (f_0 + f_1)/2$. Or, dans notre exemple, si l'on considère que les axes des temps des 3 oscilloscopes ont même échelle, les fréquences f_0 et f_1 sont telles que $f_0 = f_c/2$ et $f_1 = 2f_c$, ce qui conduit à $(f_0 + f_1)/2 = 5 f_c/2$. Le signal $s(t)$ représenté ne correspond donc pas à une modulation FSK d'onde porteuse égale à f_c , mais $F_c = 5 f_c/2$: peu importe, là encore, f_0 et f_1 ont été choisies pour faciliter la représentation graphique.

Type de modulation	Expression analytique de $s(t)$	
	Pendant la transmission d'un 0	Pendant la transmission d'un 1
ASK	$E_0 \cos(2\pi f_c t + 0)$	$E_1 \cos(2\pi f_c t + \pi)$
FSK	$E \cos(2\pi f_0 t + 0)$	$E \cos(2\pi f_1 t + 0)$
PSK	$E \cos(2\pi f_c t + 0)$	$E \cos(2\pi f_c t + \pi)$

2. Principe de la modulation vectorielle

Comme on vient de le voir, la fonction d'un modulateur numérique consiste, quel que soit le type de modulation considéré, à élaborer un signal sinusoïdal de la forme $s(t) = E \cos(2\pi f_c t + \chi\pi)$.

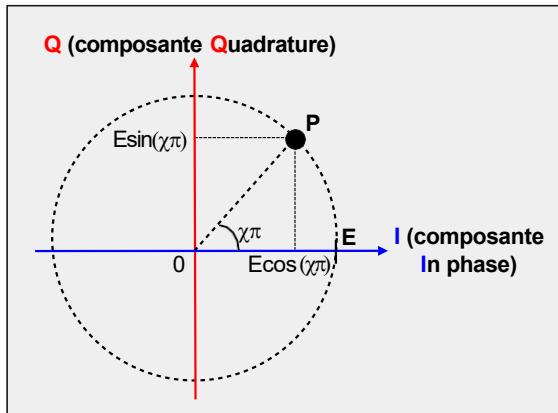
Or, $s(t) = E \cos(2\pi f_c t + \chi\pi)$, soit $s(t) = E \cos(\chi\pi) \cos(2\pi f_c t) - E \sin(\chi\pi) \sin(2\pi f_c t)$

Soit $s(t) = I \cdot \cos(2\pi f_c t) + Q \cdot \cos\left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{2}\right)$ avec $I = E \cos(\chi\pi)$ en Volts et $Q = E \sin(\chi\pi)$ en Volts

Expression de $Q = f(I)$

On constate que $I^2 + Q^2 = E^2\cos^2(\chi\pi) + E^2\sin^2(\chi\pi) = E^2[\cos^2(\chi\pi) + \sin^2(\chi\pi)] = E^2$

La représentation graphique $Q = f(I)$ est donc le cercle de rayon E suivant :



Ainsi, à tout couple de valeurs de paramètres (Amplitude E, Phase φ) associés à la tension modulée $s(t)$, correspond un seul et unique couple de valeurs (I, Q), de coordonnées ($E\cos\varphi, E\sin\varphi$).

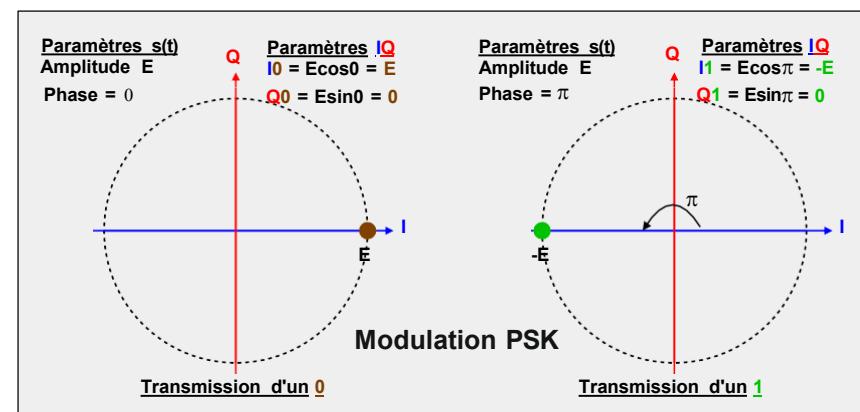
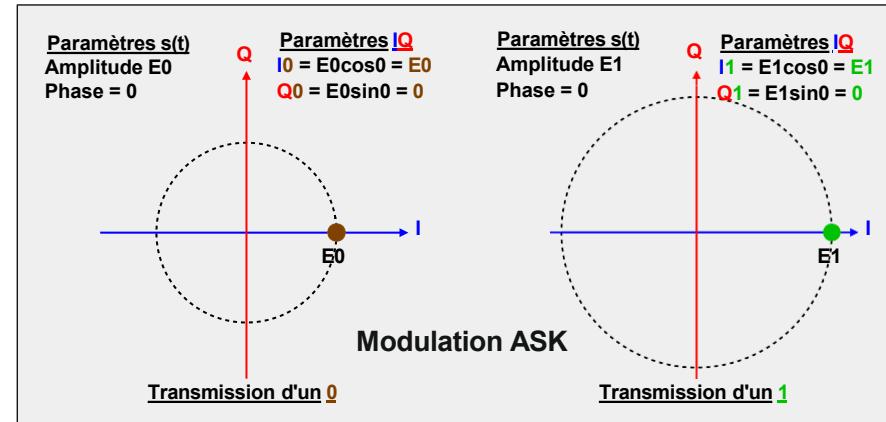
Les paramètres amplitude et phase de la tension modulée $s(t)$ sont matérialisés, dans le plan IQ, par le **point de constellation P**.

Nous obtenons alors, pour la modulation ASK, deux points de constellations distincts, de coordonnées, dans la plan IQ :

- ($E_0, 0$) pendant la transmission d'un « 0 » ;
- ($E_1, 0$) pendant la transmission d'un « 1 ».

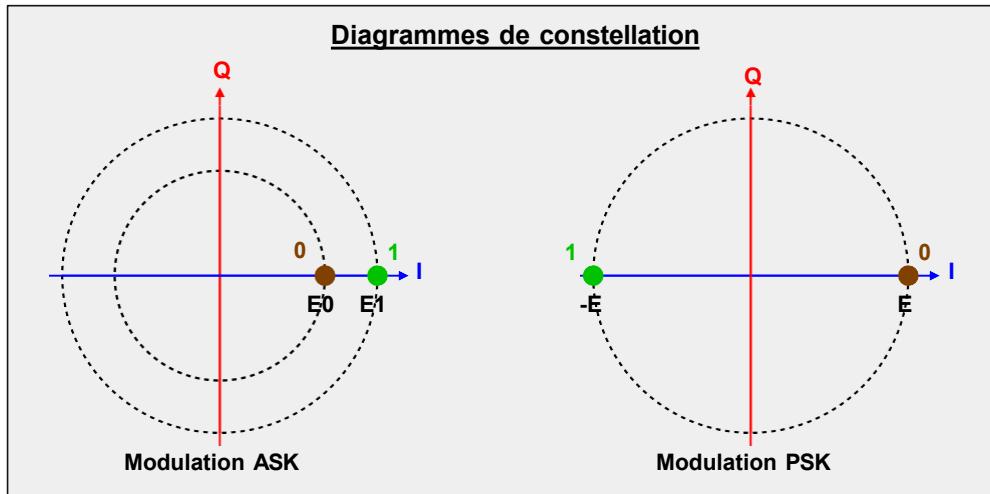
Pour ce qui concerne la modulation PSK, nous obtenons également deux points de constellations distincts, de coordonnées dans la plan IQ :

- ($E, 0$) pendant la transmission d'un « 0 » ;
- ($-E, 0$) pendant la transmission d'un « 1 ».



La représentation de l'ensemble des points de constellation dans le plan IQ s'appelle le **diagramme de constellation**.

Ainsi, le diagramme de constellation de chacune des deux modulations ASK et PSK précédentes est le suivant :



Remarque concernant la modulation FSK.

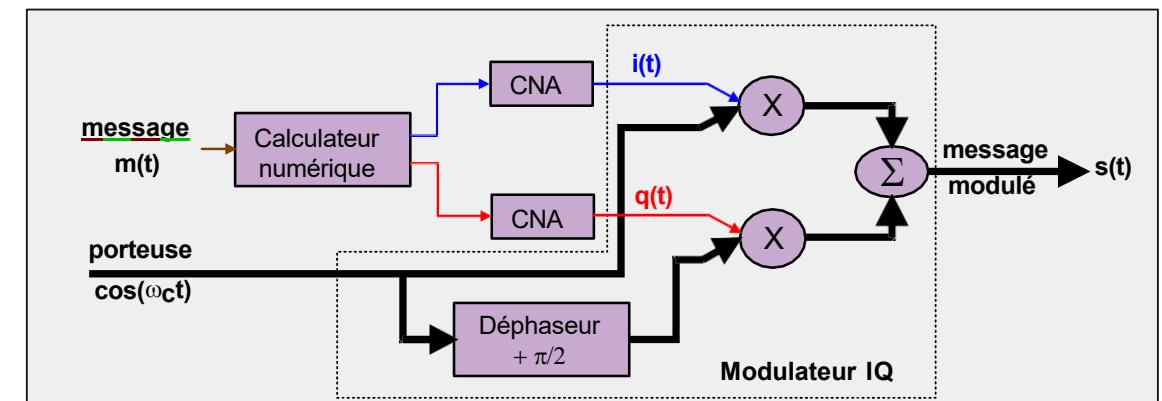
La détermination du diagramme de constellation d'une modulation FSK n'est possible que dans un cas bien précis, que nous traiterons plus en avant.

A ce stade, on peut proposer le synoptique d'un modulateur numérique :

Le modulateur intègre un **calculateur numérique** ainsi que deux **convertisseurs numérique-analogique** permettant d'élaborer, à partir du message numérique $m(t)$ à transmettre, 2 tensions analogiques internes $i(t)$ et $q(t)$, pour lesquelles l'évolution $q(t) = f[i(t)]$ peut se représenter sous forme vectorielle (**vecteur de Fresnel**). C'est la raison pour laquelle on utilise souvent le terme générique de **modulation vectorielle** pour désigner toute modulation numérique.

Par ailleurs, le dispositif permettant, à partir des informations $i(t)$ et $q(t)$, d'élaborer le signal modulé $s(t)$, s'appelle **modulateur IQ**, et constitue le cœur de tout modulateur numérique.

Enfin, il convient de distinguer en couleur et en traits fins, les informations analogiques $i(t)$ et $q(t)$ liées au message $m(t)$ à transmettre (donc de composantes fréquentielles basses), des informations analogiques associées à l'onde porteuse (en traits forts et en noir), de composantes fréquentielles beaucoup plus élevées (voir principe de la transmission en bande transposée abordée au chapitre1).



3. Les modulations numériques usuelles

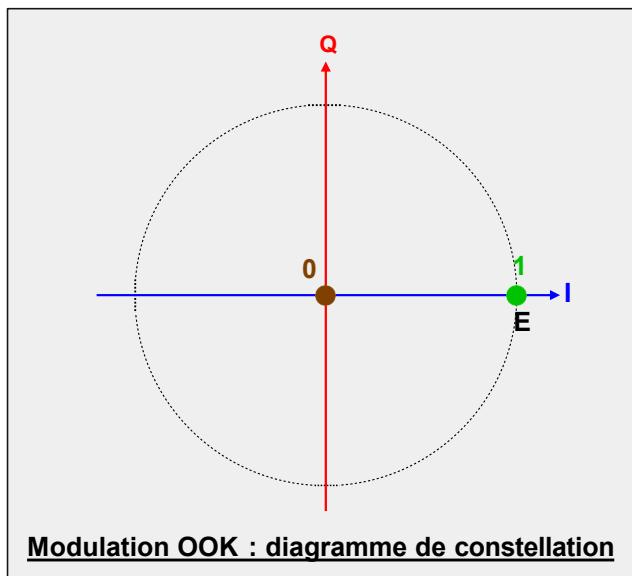
Les 3 modulations de base ASK, FSK et PSK que nous venons de traiter sont fondamentales dans la mesure où elles sont à la base des modulations numériques mises en œuvre dans les très nombreux systèmes de communications sans fil qui nous entourent.
Nous allons désormais nous attacher à décrire les caractéristiques de ces modulations numériques.

3.1. Les modulations numériques à déplacement d'amplitude ASK

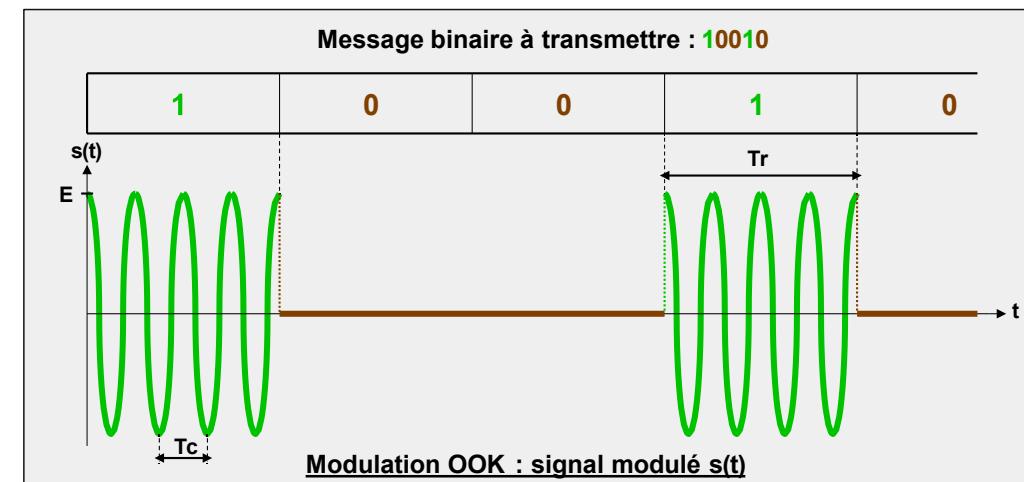
Ces modulations sont assez peu utilisées, à l'exception d'une forme particulière appelée **OOK** (**O**n-**O**ff **K**eying), pour laquelle $s(t) = 0V$ pendant la transmission d'un 0.

On donne ci-dessous le diagramme de constellation d'une modulation OOK, comprenant 2 points de constellation :

- (**0,0**) pendant la transmission d'un « **0** » ;
- (**E,0**) pendant la transmission d'un « **1** ».



D'où l'allure du signal modulé $s(t)$:

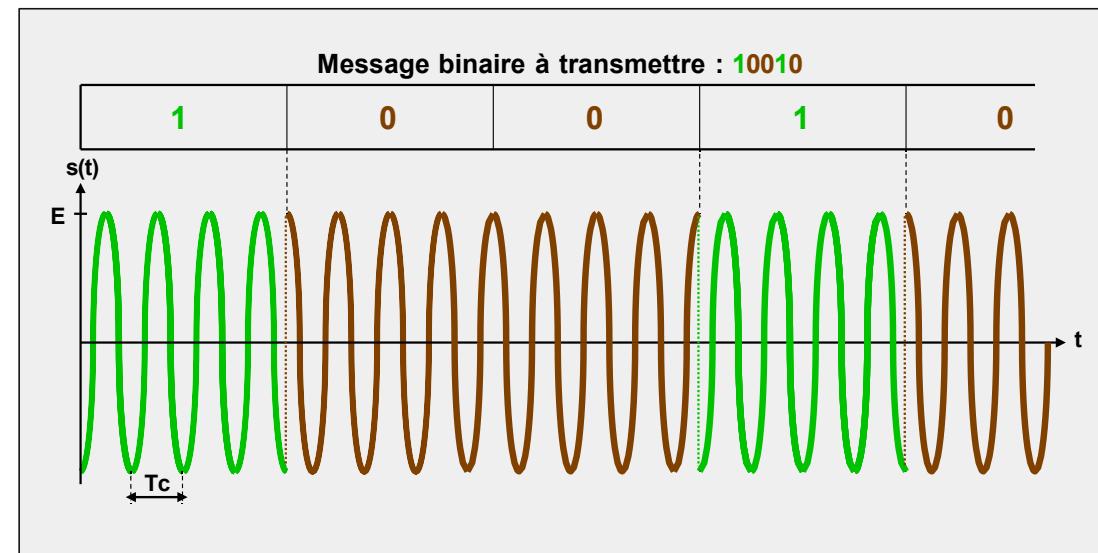
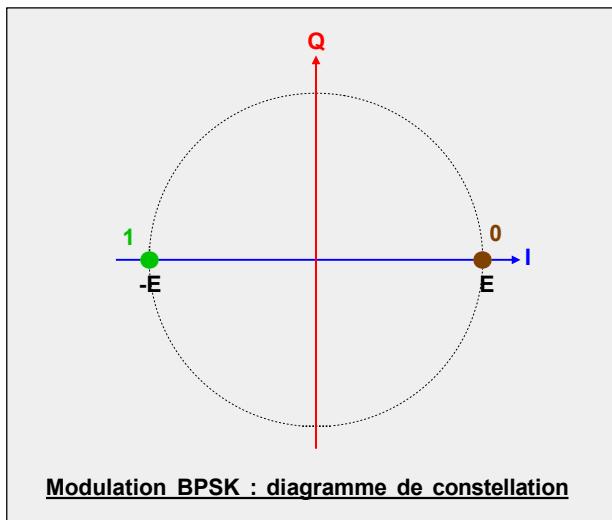


2. Les modulations numériques à déplacement de phase PSK

1. La modulation BPSK ou modulation PSK à 2 états

La modulation PSK de base que nous avons évoquée précédemment présente deux états de modulation distincts, matérialisés, au niveau du diagramme de constellation, par la présence de deux points de constellation distincts. A chacun de ces 2 points de constellation, correspond la transmission d'un seul bit (qui peut valoir **0** ou **1**). Pour cette raison, cette modulation PSK de base à **2 états**, est souvent dénommée **BPSK** (Binary Phase Shift Keying).

Nous rappelons ici brièvement ses caractéristiques :



Les deux modulations à 2 états OOK et BPSK présentent une vitesse de transmission égale à $1/T_r$ bits/s.

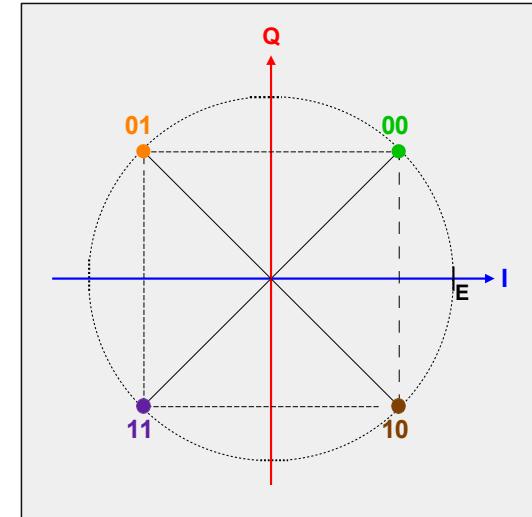
Si l'on souhaite augmenter cette vitesse de transmission tout en conservant la même valeur de fréquence rythme f_r , il faut transmettre non pas un, mais **plusieurs bits** du message **par état de modulation élémentaire**, c'est-à-dire **par durée élémentaire T_r** . Ces modulations font l'objet de la suite de ce chapitre.

3.2.2. La modulation QPSK ou modulation PSK à 4 états

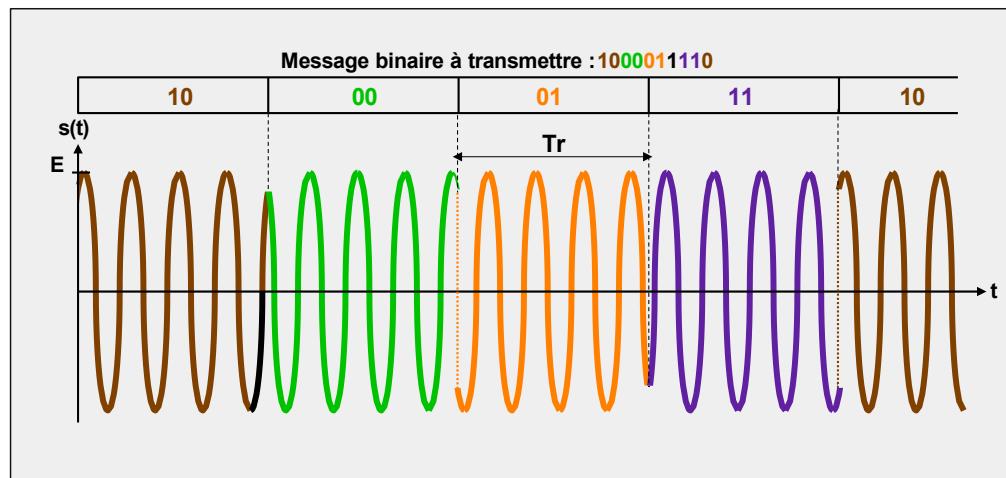
La modulation à déplacement de phase **QPSK** (Quadrature Phase Shift Keying) présente 4 états de modulation distincts. Chaque état de modulation résulte de la combinaison de 2 bits, conformément au diagramme de constellation suivant :

On constate, graphiquement, que :

- à la combinaison de 2 bits **00**, correspond la phase $+\pi/4$;
- à la combinaison de 2 bits **01**, correspond la phase $+3\pi/4$;
- à la combinaison de 2 bits **10**, correspond la phase $-\pi/4$;
- à la combinaison de 2 bits **11**, correspond la phase $-3\pi/4$.



Ainsi, si l'on souhaite transmettre le message $m(t) = \textcolor{red}{1}0000\textcolor{green}{1}\textcolor{orange}{1}\textcolor{purple}{1}0$, et en conservant le même rapport $f_c/f_r=4$ que sur les représentations graphiques précédentes, on obtient le signal modulé $s(t)$ suivant :



Chaque ensemble de 2 bits transmis pendant la durée élémentaire Tr , est désigné par le terme **symbole**.

La modulation QPSK est alors caractérisée par :

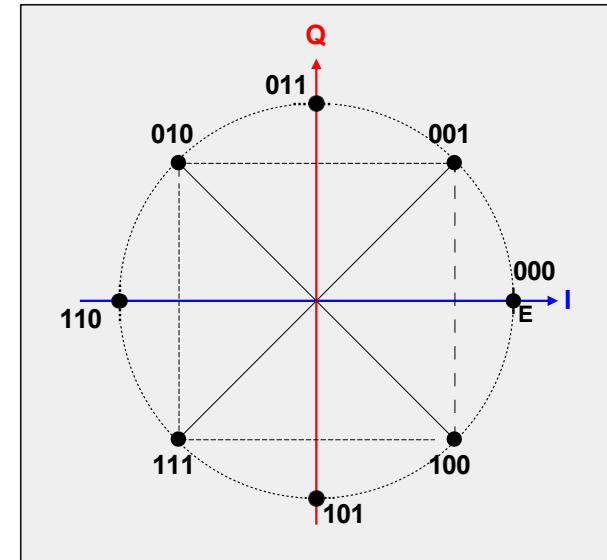
- une **vitesse de transmission** de $2f_r$ bits/s,
- une **vitesse de modulation** (ou **rapidité de modulation**) de f_r symboles/s.

A fréquence rythme f_r identique, la modulation QPSK est donc **deux fois plus rapide** que la modulation BPSK.

3.2.3. La modulation 8PSK ou modulation PSK à 8 états.

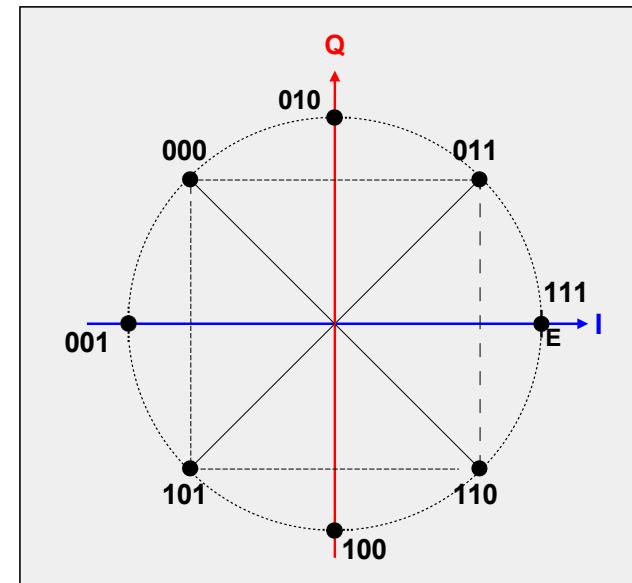
A chaque état de modulation, correspond un symbole constitué d'un ensemble de **3 bits**. La phase du signal modulé $s(t)$ peut prendre, en fonction des combinaisons de ces 3 bits, les 8 valeurs $0, \pm \pi/4, \pm \pi/2, \pm 3\pi/4$ ou π , conformément au diagramme de constellation suivant :

On obtient évidemment, dans ce cas, pour une vitesse de modulation de **f_r symboles/s**, une vitesse de transmission de **$3f_r$ bits/s**.



3.2.4. La modulation Edge PSK (modulation PSK à 8 états)

Il s'agit d'une variante de la modulation précédente, utilisée par exemple en téléphonie mobile de **2,5G** (technologie **Edge**), caractérisée par le diagramme de constellation suivant :



3.2.5. La modulation 16PSK ou modulation PSK à 16 états

On donne ci-dessous, le diagramme de constellation de cette modulation :

Les modulations PSK : synthèse

Pour les modulations à déplacement de phase PSK que nous venons de traiter, l'information à transmettre (1 bit pour une modulation BPSK, 2 bits pour une modulation QPSK, 3 bits pour une modulation 8PSK ou 4 bits pour une modulation 16PSK), est portée par la valeur de la phase $\chi\pi$ du signal modulé $s(t) = E \cos(2\pi ft + \chi\pi)$.

Il existe un deuxième type de modulation numérique à saut de phase, pour laquelle chaque symbole à transmettre est porté non pas par une valeur absolue de phase $\chi\pi$, mais par l'information **d'écart de phase** $\Delta\chi\pi = \chi\pi_n - \chi\pi_{n-1}$ **par rapport à l'état de modulation précédent**.

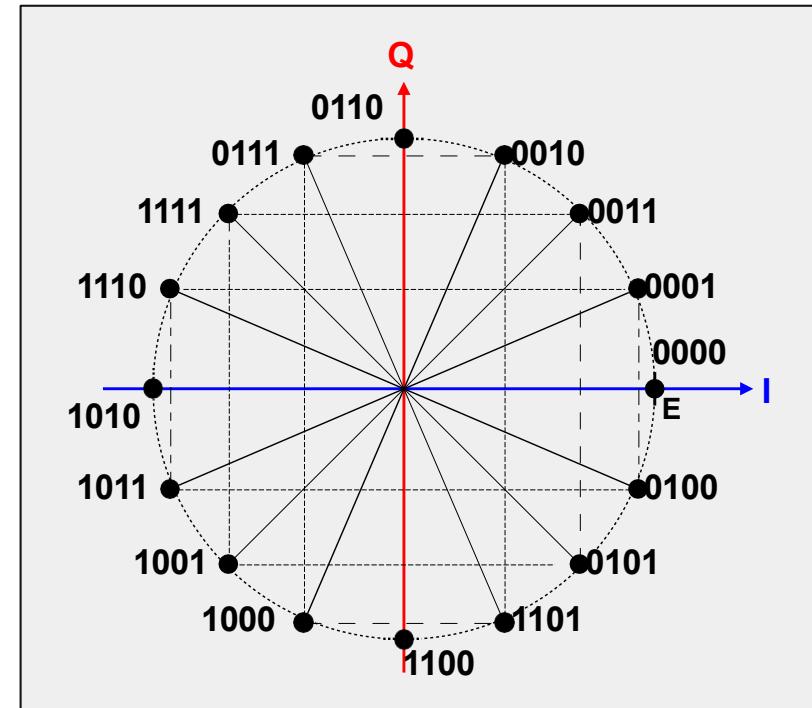
De telles modulations sont appelées **modulations différentielles**.

3.2.6. La modulation DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying)

Le diagramme de constellation est identique à celui associé à la modulation BPSK, mais le codage de l'information transmise est désormais le suivant :

- à la transmission d'un **0**, correspond la conservation de la phase précédente : $\chi\pi_n = \chi\pi_{n-1}$ ($\Delta\chi\pi = 0$)
- à la transmission d'un **1**, correspond une rotation de phase de π : $\chi\pi_n = \chi\pi_{n-1} + \pi$ ($\Delta\chi\pi = \pi$).

Les oscillosogrammes donnés page suivante permettent de comparer le signal modulé $s(t)$ d'une modulation BPSK avec celui d'une modulation DBPSK, et ce, pour un même message $m(t) = \textcolor{red}{0}1101$.



3.2.7. La modulation DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying)

Dans ce cas également, le diagramme de constellation demeure inchangé par rapport à une modulation QPSK, mais le codage de l'information à transmettre est désormais le suivant :

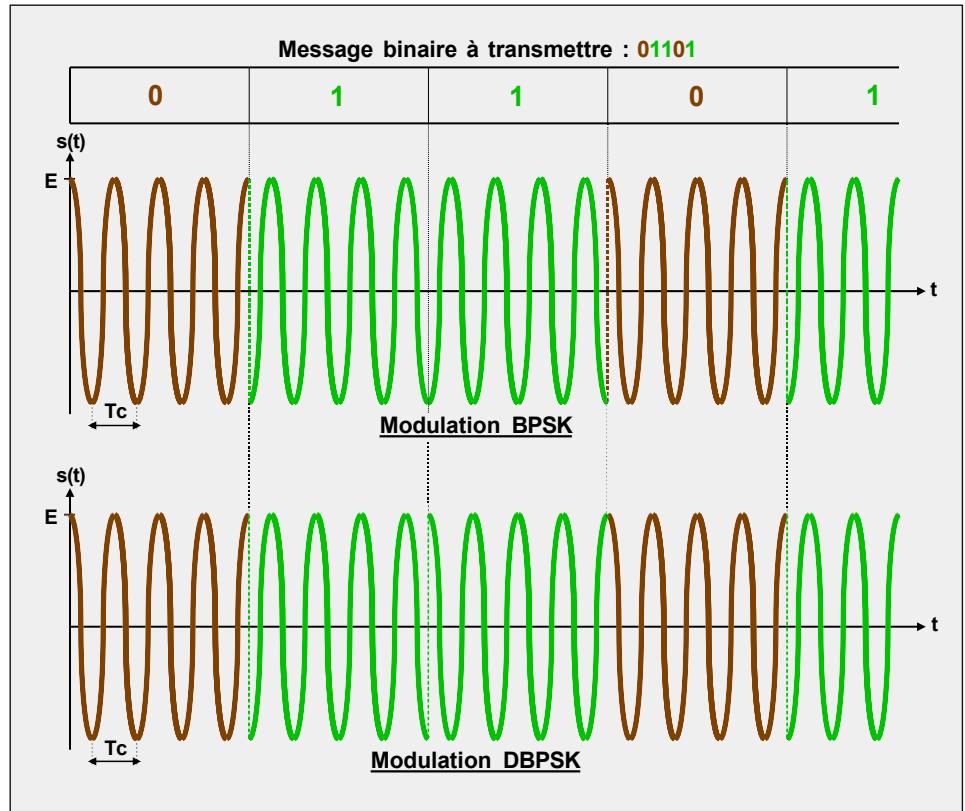
- à la transmission du symbole **00**, correspond $\chi\pi_h = \chi\pi_{h1}$ ($\Delta\chi\pi = 0$),
- à la transmission du symbole **01**, correspond $\chi\pi_h = \chi\pi_{h1} + \pi/2$ ($\Delta\chi\pi = \pi/2$),
- à la transmission du symbole **11**, correspond $\chi\pi_h = \chi\pi_{h1} + \pi$ ($\Delta\chi\pi = \pi$),
- à la transmission du symbole **10**, correspond $\chi\pi_h = \chi\pi_{h1} + 3\pi/2$ ($\Delta\chi\pi = 3\pi/2$).

3.3. Les modulations numériques à déplacement d'amplitude et de phase QAM

Les points de constellation d'une modulation 16PSK (voir §3.2.5.) sont relativement proches les uns des autres, et constituent actuellement une limite technologique. En effet, une modulation 32PSK présenterait des variations de phase élémentaires de $\pi/16 = 11,25^\circ$, ce qui, compte tenu des altérations que subit le signal modulé $s(t)$ dans le canal de transmission, ne permettrait pas une démodulation suffisamment fiable.

De nouvelles modulations ont alors été mises au point, permettant de contourner cette limite technologique, afin d'augmenter le format des symboles transmis, donc d'augmenter la vitesse de transmission.

Il s'agit de modulations à déplacement d'amplitude et de phase combinées, désignées par le terme **QAM** (Quadrature Amplitude Modulation).



3.3.1. La modulation 16QAM

Cette modulation à 16 états présente le diagramme de constellation suivant :

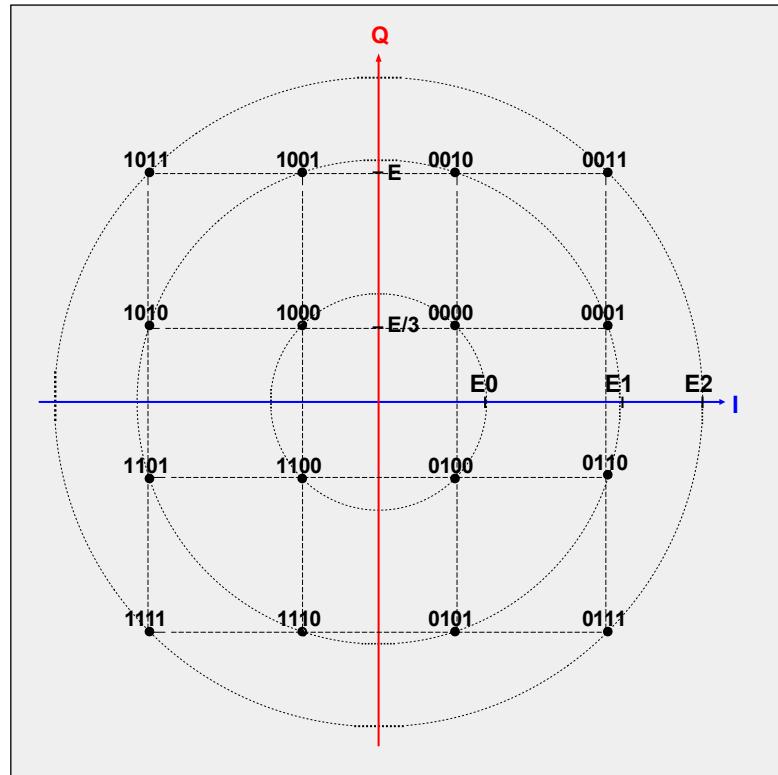
Les 16 points de constellation sont répartis sur 3 cercles concentriques. Le signal modulé $s(t)$ peut donc présenter 3 amplitudes **E0**, **E1** ou **E2** distinctes.

On constate par ailleurs, que les abscisses (ou les ordonnées) de chacun de ces 16 points de constellation ne peuvent prendre que 4 valeurs distinctes $\pm E$ et $\pm E/3$.

3.3.2. Les modulations QAM à plus de 16 états

Actuellement, on rencontre, parmi les différents systèmes de communications sans fil, des modulations numériques à déplacement d'amplitude et de phase :

- **32QAM** (symboles constitués de 5 bits),
- **64QAM** (symboles constitués de 6 bits),
- **128QAM** (symboles constitués de 7 bits),
- **256QAM** (symboles constitués de 8 bits = octets).



3.4. Les modulations à déplacement de fréquence et à phase minimale MSK

Pour une modulation FSK, l'information transmise (un seul bit pouvant prendre les valeurs **0** ou **1**) est portée par deux fréquences **f₀** et **f₁** distinctes.

Ces deux fréquences sont liées à la fréquence f_c de la porteuse par les relations $f_0 = f_c - \Delta f$ ainsi que $f_1 = f_c + \Delta f$, où Δf désigne *l'excursion de fréquence* du signal modulé $s(t)$.

On cherche à réaliser des modulations numériques FSK **à phase continue**, de telle façon qu'à chaque changement de niveau logique du bit transmis, le signal modulé $s(t)$ ne présente pas de discontinuité.

De telles modulations numériques à déplacement de fréquence et à phase continue sont désignées par le terme **CPFSK** (Continuous Phase Frequency Shift Keying) :

On montre que pour qu'une modulation FSK présente une phase continue (donc soit de type CPFSK), l'excursion de fréquence Δf et la fréquence rythme f_r doivent être telles que :

$$\Delta f = \frac{k}{4} f_r, \text{ avec } k \text{ entier naturel.}$$

Enfin, pour réduire l'encombrement spectral du signal modulé $s(t)$, on cherche à rendre l'excursion de fréquence la plus faible possible, ce qui impose $k=1$.

Ce type de modulation CPFSK particulière, pour laquelle $\Delta f = \frac{f_r}{4}$ est appelée modulation **MSK** (Minimum Shift Keying).

On peut donc en déduire que pour une modulation MSK, les fréquences f_0 et f_1 sont telles que :

$$f_0 = f_c - \frac{f_r}{4} \text{ et } f_1 = f_c + \frac{f_r}{4}.$$

Diagramme de constellation d'une modulation MSK

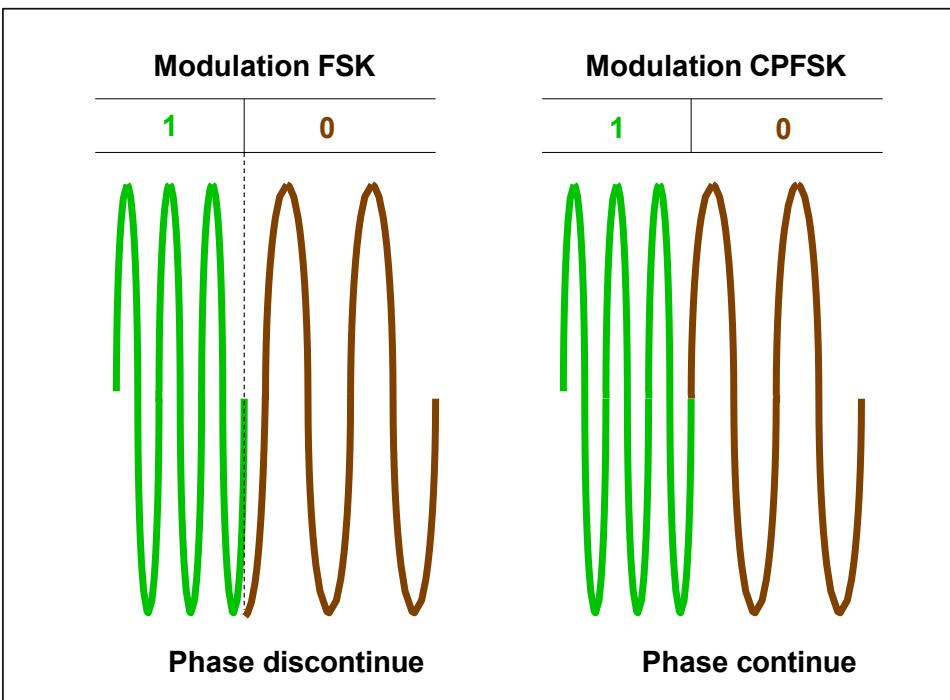
Si l'on se réfère au synoptique du modulateur numérique de la page 5, on constate que le signal

$$\text{modulé a pour expression } s(t) = I \cdot \cos(2\pi f_c t) + Q \cdot \cos\left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Les fréquences f_0 et f_1 n'interviennent pas directement dans cette expression, et déterminer l'allure du diagramme de constellation d'une modulation MSK n'est pas immédiat. On admettra toutefois qu'il est possible de générer des formes d'ondes $i(t)$ et $q(t)$ telles que :

$$s(t) = i_0(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) + q_0(t) \cdot \cos\left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{2}\right) = E \cos(2\pi f_0 t) \text{ pendant la transmission d'un } 0, \text{ et}$$

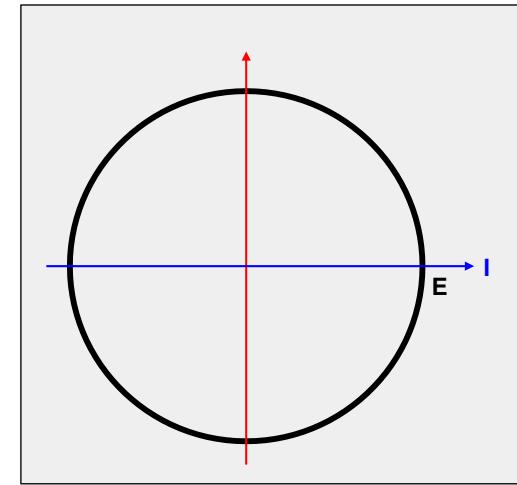
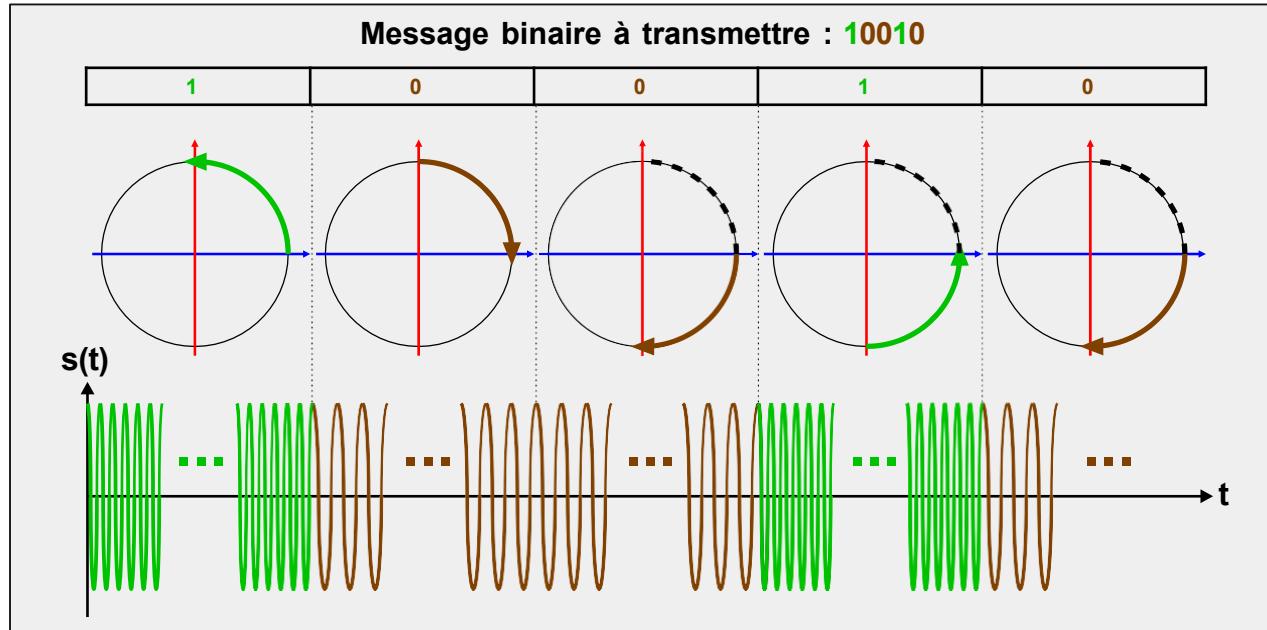
$$s(t) = i_1(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) + q_1(t) \cdot \cos\left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{2}\right) = E \cos(2\pi f_1 t) \text{ pendant la transmission d'un } 1.$$



Contrairement aux modulations de type ASK et PSK, les ondes $i(t)$ et $q(t)$ ne sont pas constantes pendant la durée T_r de transmission d'un bit. Par conséquent, à chaque état de modulation, c'est-à-dire pendant chaque durée T_r , le diagramme de constellation ne présente pas un seul point de constellation P, mais un ensemble de points P se déplaçant sur le cercle de rayon E.

On montre que pendant la durée T_r de transmission d'un **0**, le point de constellation se déplace sur le cercle de rayon E, d'un quart de tour dans le sens **horaire**, et qu'en inversement, pendant la durée de transmission d'un **1**, il se déplace d'un quart de tour dans le sens **trigonométrique**.

Ainsi, en supposant qu'à l'instant $t = 0$ de début de transmission du message $m(t) = \textcolor{red}{1}00\textcolor{brown}{1}0$, la phase à l'origine du signal modulé soit nulle, nous obtenons, au cours du temps, les cinq diagrammes de constellation successifs suivants :



Il s'agit là d'une propriété remarquable des modulations GSM, comme on le verra au chapitre suivant.

Pendant la transmission du message modulant 10010, le point de constellation a donc décrit le demi-cercle droit d'abscisses positives.

On peut donc conclure que pour un message $m(t)$ aléatoire et suffisamment long, les points de constellation occupent la totalité du cercle de rayon E.

4. Synthèse

Les techniques modernes de transmission sans fil reposent sur le concept de modulation vectorielle encore appelée modulation IQ. Comme nous l'avons vu, la tension $s(t)$ issue d'un modulateur IQ, est un signal composite fonction du message $m(t)$ à transmettre ainsi que d'une onde sinusoïdale porteuse de fréquence f_c .

Ce concept de modulation vectorielle ne doit pas être interprété comme une théorie permettant de décrire le fonctionnement d'une modulation numérique, mais au contraire, comme une réalité à laquelle sont confrontés les techniciens spécialistes des transmissions sans fil.

En effet, lorsque ces derniers ont en charge la conception, la qualification ou la maintenance d'un dispositif émetteur, ils doivent procéder à la caractérisation de 3 types de signaux :

- les signaux $i(t)$ et $q(t)$ liés au message à transmettre, représentés par le **diagramme de constellation** $q(t) = f[i(t)]$,
- le signal associé à l'onde porteuse,
- le signal modulé $s(t)$.

Les notions de « voies **I** et **Q** », sont par conséquent **fondamentales** dans le domaine des transmissions sans fil, et la visualisation du **diagramme de constellation** (utilisation de l'oscilloscope en mode XY, avec voie **I** sur l'entrée **X** et voie **Q** sur l'entrée **Y**) absolument **indispensable**, dans une démarche de caractérisation de système de communications « wireless ».