

## Correction des exercices associés au cours sur les modulations numériques

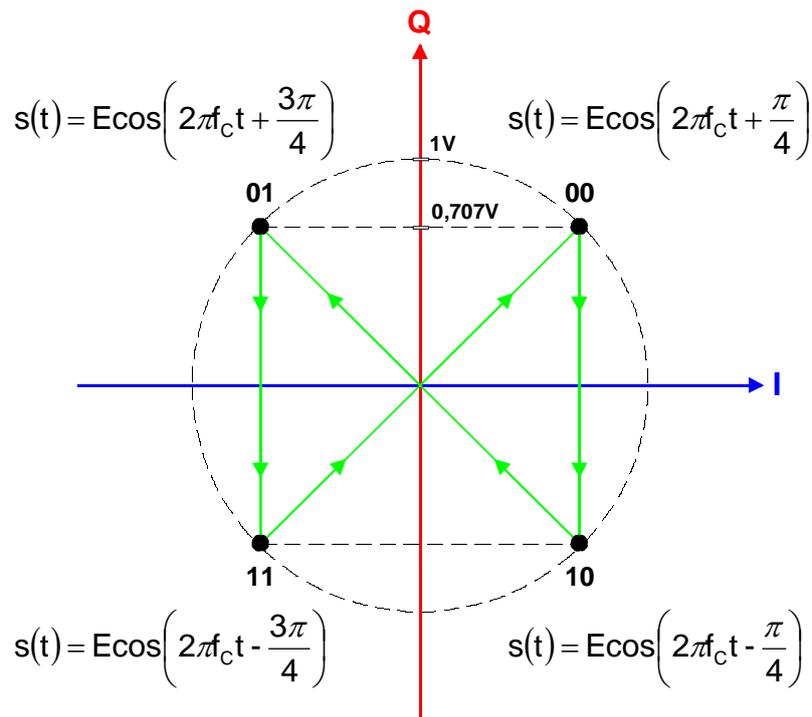
### Modulation QPSK

Analyse du cahier des charges.

Le diagramme de constellation, page 8 du chapitre 2, nous indique que pendant la transmission :

- des 2 bits 00,  $s(t) = E \cos\left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{4}\right)$ ,
- des 2 bits 01,  $s(t) = E \cos\left(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{4}\right)$ ,
- des 2 bits 10,  $s(t) = E \cos\left(2\pi f_c t - \frac{\pi}{4}\right)$ ,
- des 2 bits 11,  $s(t) = E \cos\left(2\pi f_c t - \frac{3\pi}{4}\right)$ .

On peut synthétiser ces éléments sur le diagramme de constellation suivant :



De plus, la vitesse de transmission est de **2 Mbits/s**, ce qui correspond à une vitesse de modulation de **1 Msymboles/s**, donc à une durée de transmission de symbole  $T_r$  égale à **1  $\mu$ s**.

Par ailleurs, la période  $T_c$  de l'onde porteuse est égale **0,2  $\mu$ s**.

Nous obtenons donc  $T_r/T_c = 5$ , et pouvons conclure que nous aurons 5 périodes complètes d'onde porteuse  $T_c$  pendant la durée de transmission  $T_r$  de chaque symbole.

Nous avons tous les éléments pour tracer à main levée, l'allure des tensions  **$i(t)$** ,  **$q(t)$**  et  **$s(t)$** .

Utilisation du tableur Excel.

Il faut faire varier t entre  $t = 0$  et  $t = 4T_r = 4\mu s$  :

- Pour  $t \in [0;1\mu s[$ ,  $i(t) = I = -\frac{\sqrt{2}}{2}$ ,  $q(t) = Q = +\frac{\sqrt{2}}{2}$ , et  $sa(t) = \cos\left(10^7 \pi t + \frac{3\pi}{4}\right)$ ,
- Pour  $t \in [1;2\mu s[$ ,  $i(t) = I = -\frac{\sqrt{2}}{2}$ ,  $q(t) = Q = -\frac{\sqrt{2}}{2}$ , et  $sa(t) = \cos\left(10^7 \pi t - \frac{3\pi}{4}\right)$ ,
- Pour  $t \in [2;3\mu s[$ ,  $i(t) = I = +\frac{\sqrt{2}}{2}$ ,  $q(t) = Q = +\frac{\sqrt{2}}{2}$ , et  $sa(t) = \cos\left(10^7 \pi t + \frac{\pi}{4}\right)$ ,
- Pour  $t \in [3;4\mu s[$ ,  $i(t) = I = +\frac{\sqrt{2}}{2}$ ,  $q(t) = Q = -\frac{\sqrt{2}}{2}$ , et  $sa(t) = \cos\left(10^7 \pi t - \frac{\pi}{4}\right)$ .

On obtient alors les représentations graphiques de  $i(t)$ ,  $q(t)$  et  $sa(t)$  de la page 6.

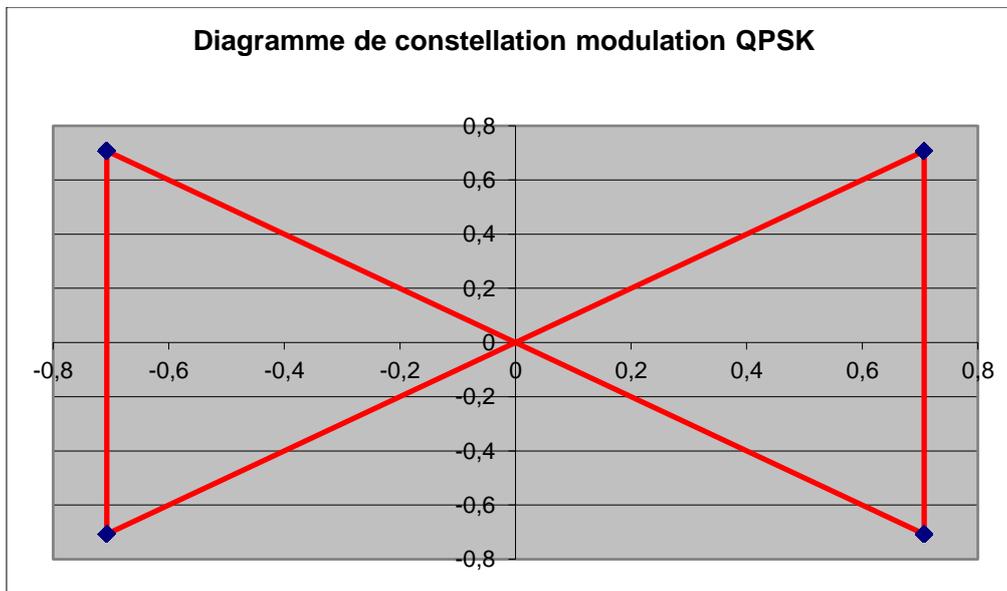
Si l'on part maintenant de l'expression analytique du signal modulé  $s(t)$  issu d'un modulateur IQ

$s(t) = I \cdot \cos(2\pi f_c t) + Q \cdot \cos\left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{2}\right)$ , on obtient, dans notre cas précis :

- Pour  $t \in [0;1\mu s[$ ,  $sb(t) = -\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \cos(10^7 \pi t) + \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \cos\left(10^7 \pi t + \frac{\pi}{2}\right)$ ,
- Pour  $t \in [1;2\mu s[$ ,  $sb(t) = -\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \cos(10^7 \pi t) - \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \cos\left(10^7 \pi t + \frac{\pi}{2}\right)$ ,
- Pour  $t \in [2;3\mu s[$ ,  $sb(t) = +\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \cos(10^7 \pi t) + \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \cos\left(10^7 \pi t + \frac{\pi}{2}\right)$ ,
- Pour  $t \in [3;4\mu s[$ ,  $sb(t) = +\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \cos(10^7 \pi t) - \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \cos\left(10^7 \pi t + \frac{\pi}{2}\right)$ .

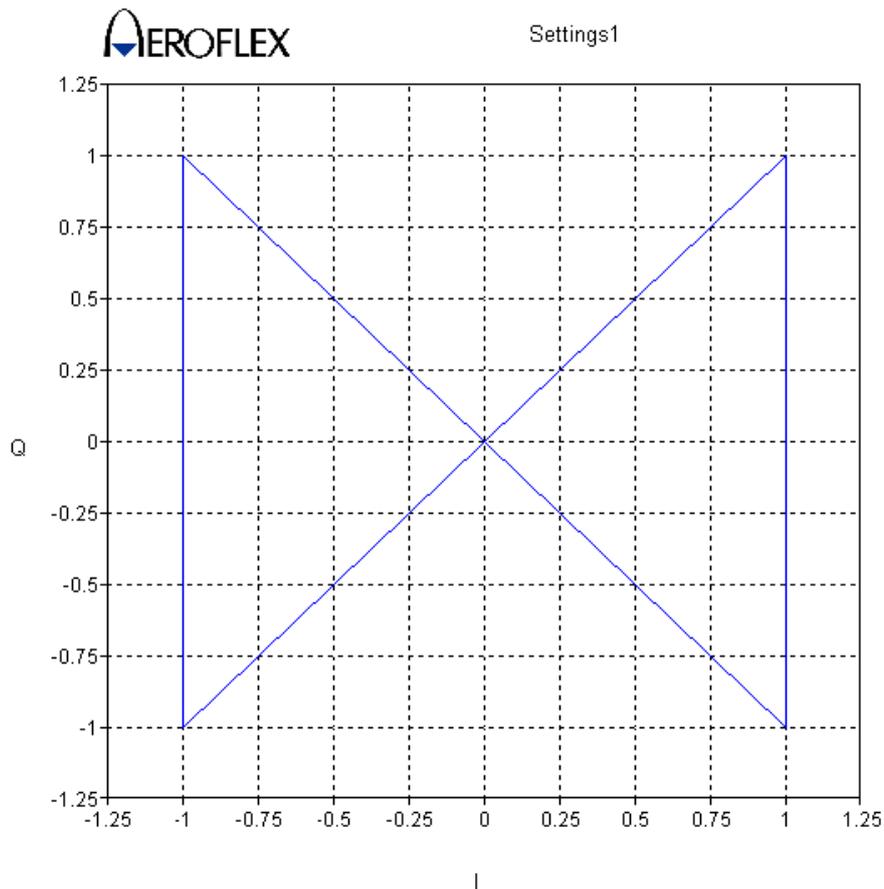
Le tracé de  $sb(t)$  (page 6) confirme évidemment l'égalité  $sa(t) = sb(t) = s(t)$ .

Le tableur Excel nous permet également de tracer le diagramme de constellation  $q(t) = f[i(t)]$  :



Utilisation du logiciel IQCreator.

Le logiciel nous donne directement le tracé du diagramme de constellation.



## Modulation 16QAM

Analyse du cahier des charges.

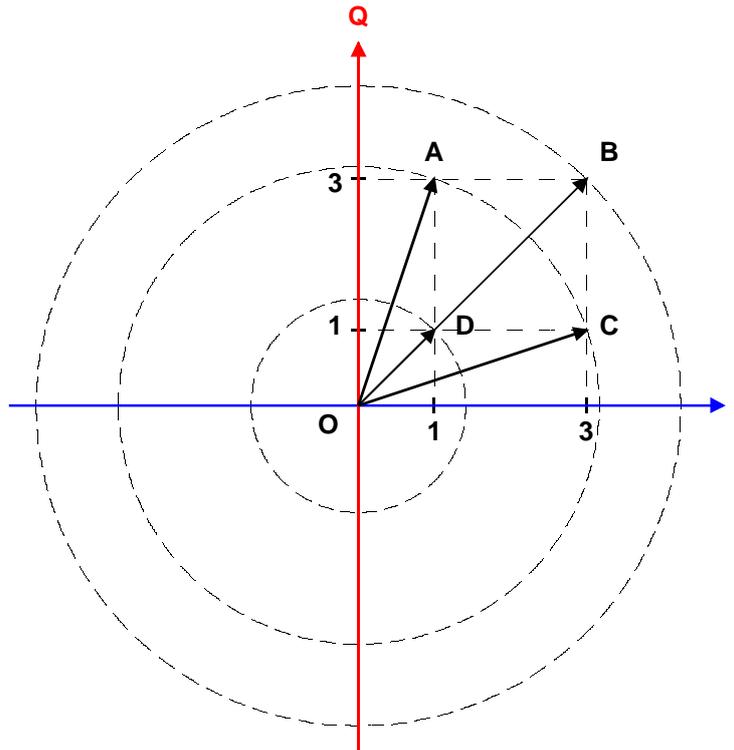
Nous obtenons, pour une vitesse de modulation de **1 Msymboles/s**, une vitesse de transmission de **4 Mbits/s**.

Les valeurs des paramètres vitesse de modulation et fréquence porteuse étant identiques à l'exemple précédent, nous obtiendrons de la même façon, 5 périodes complètes d'onde porteuse  $T_c$  pendant la durée de transmission  $T_r$  de chaque symbole.

La détermination des paramètres (Amplitude + Phase) du signal modulé  $s(t)$  pour chacun des 4 points de constellation peut s'effectuer à l'aide des instruments (règle graduée + équerre), ou bien par calcul.

Privilégions cette dernière approche.

La figure proposée page suivante synthétise, pour le quadrant supérieur droit du diagramme de constellation, les 4 points de constellation A (0010), B(0011), C(0001) et D(0000) :

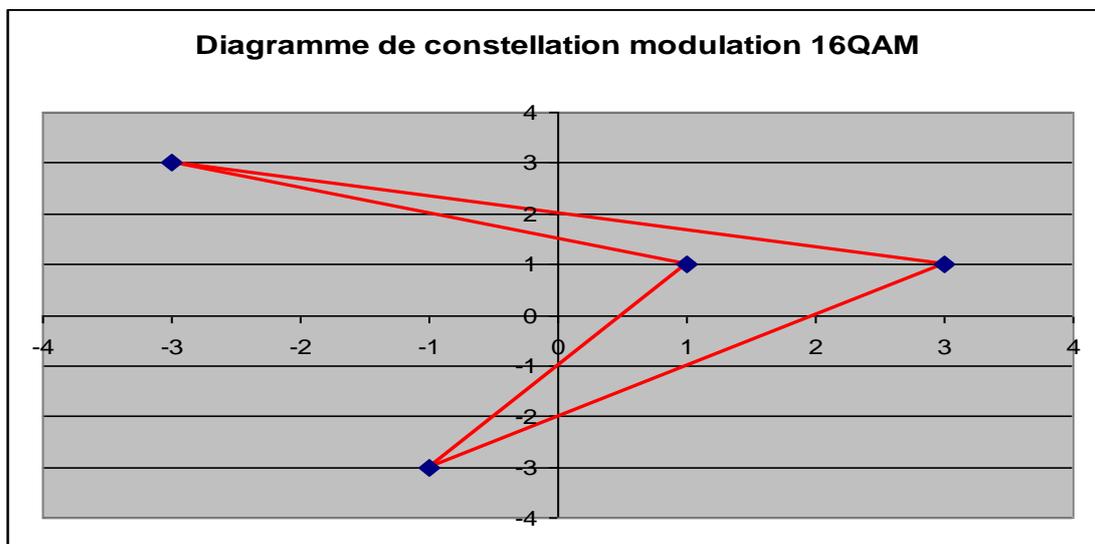


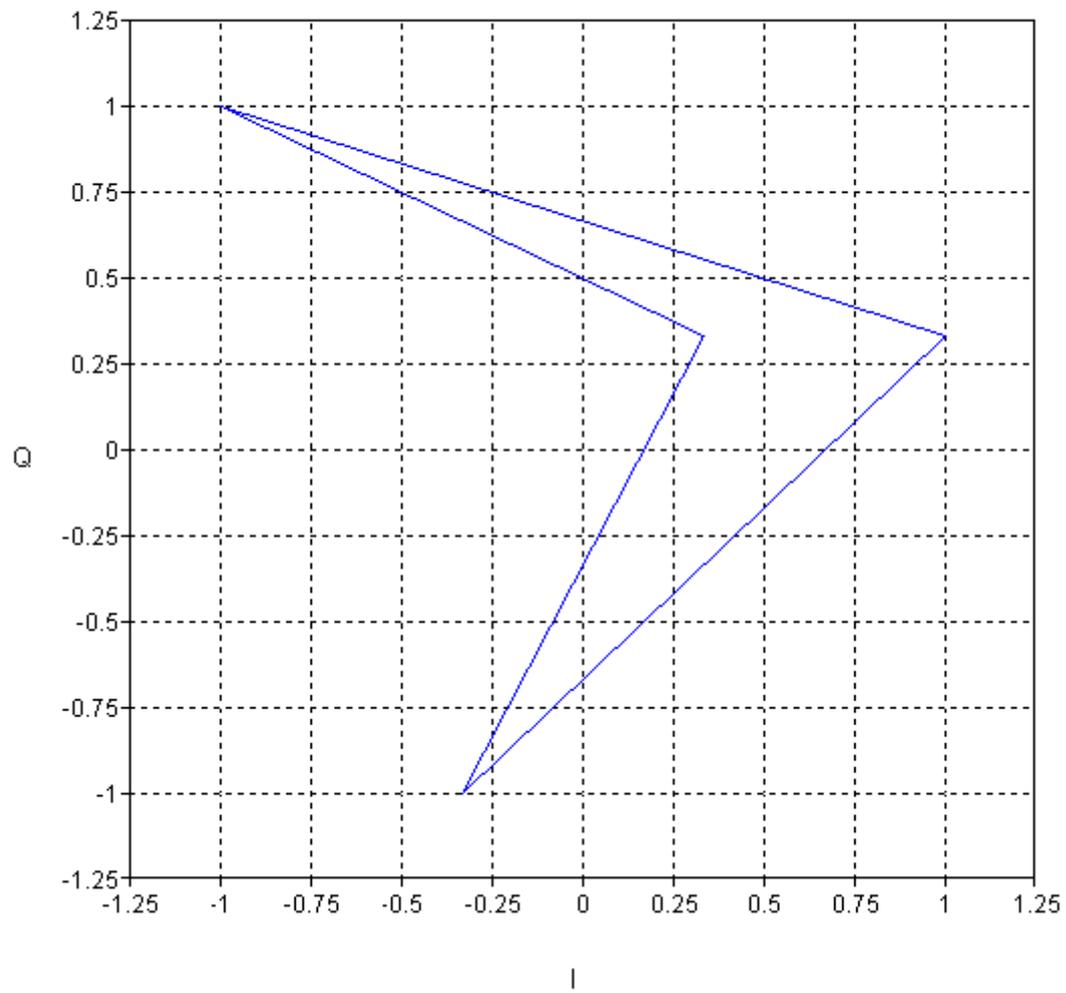
On obtient par simple calcul trigonométrique, les paramètres du signal modulé  $s(t)$  suivants :

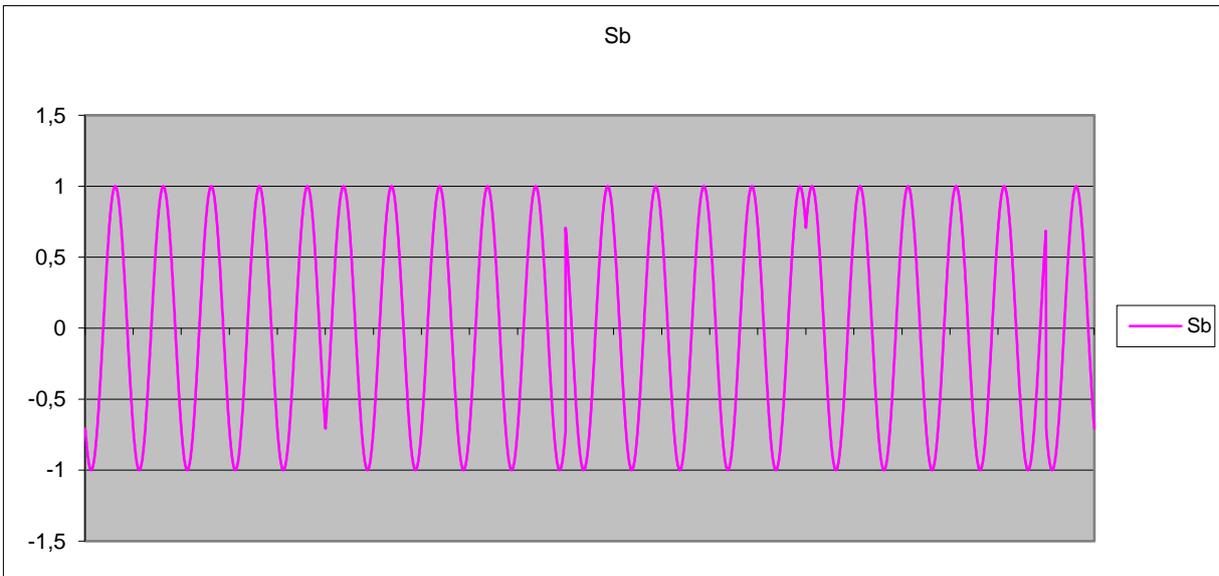
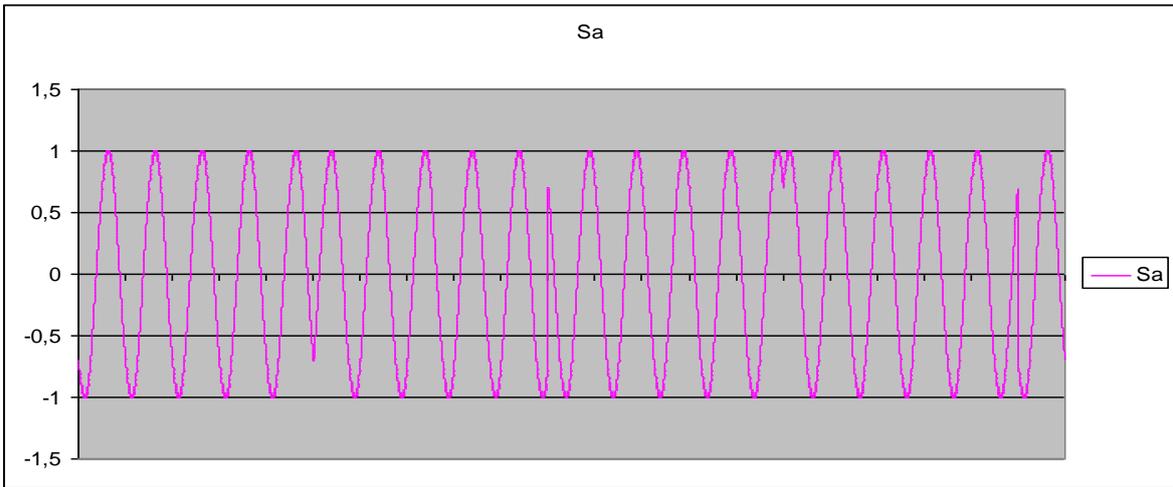
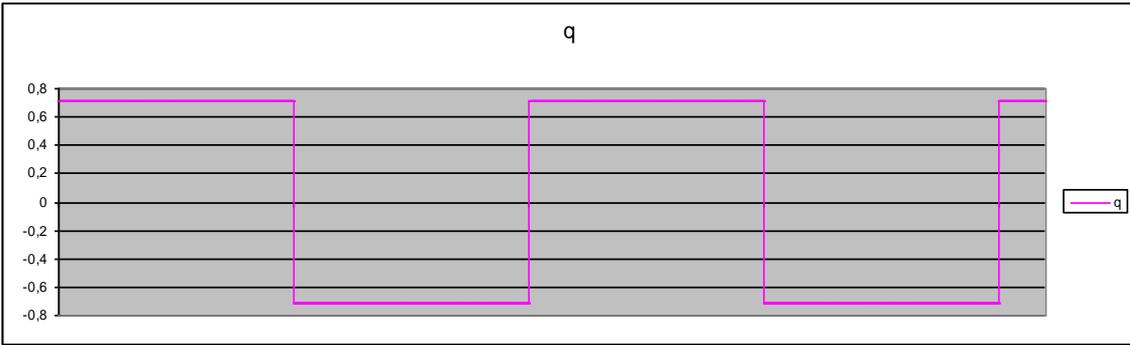
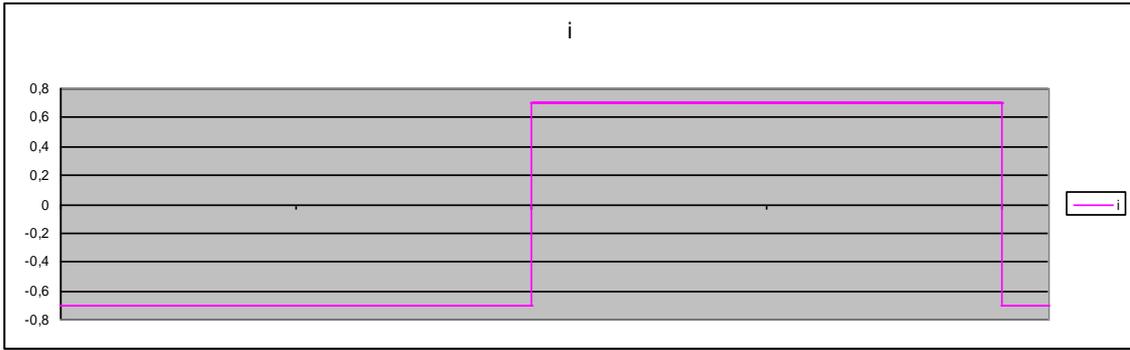
- Point de constellation A : (Amplitude =  $\sqrt{10}$  V ; Phase =  $\text{Arctan}(3)$ ),
- Point de constellation B : (Amplitude =  $3\sqrt{2}$  V ; Phase =  $\pi/4$ ),
- Point de constellation C : (Amplitude =  $\sqrt{10}$  V ; Phase =  $\text{Arctan}(1/3)$ ),
- Point de constellation D : (Amplitude =  $\sqrt{2}$  V ; Phase =  $\pi/4$ ).

Le travail préparatoire est terminé, il est désormais possible de tracer :

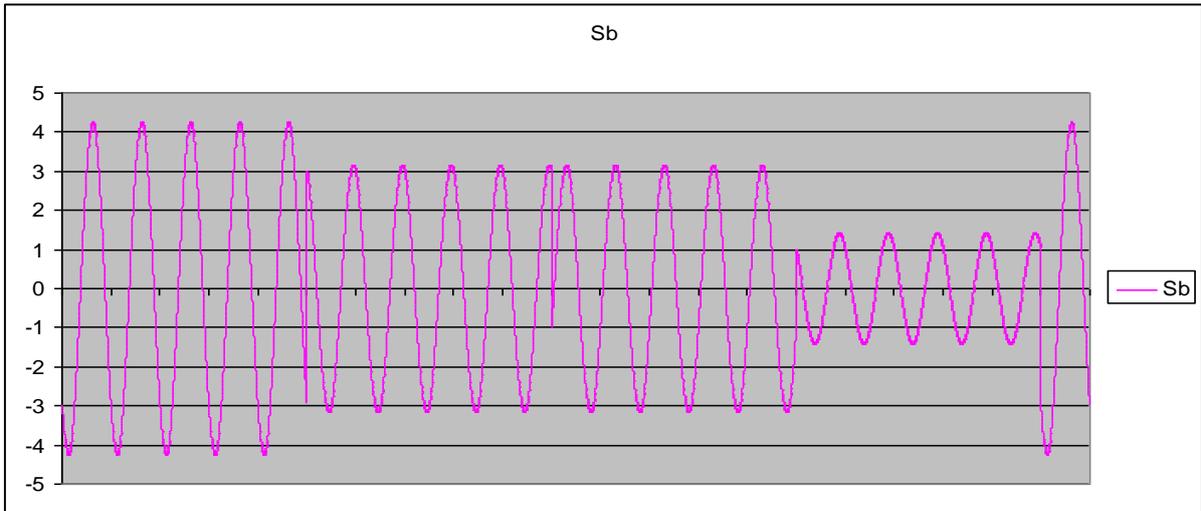
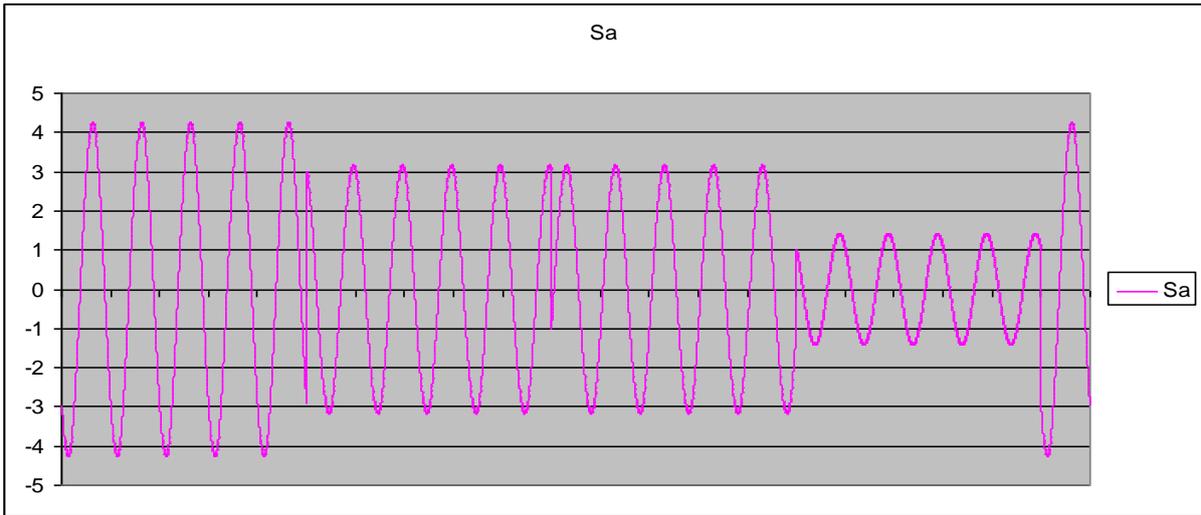
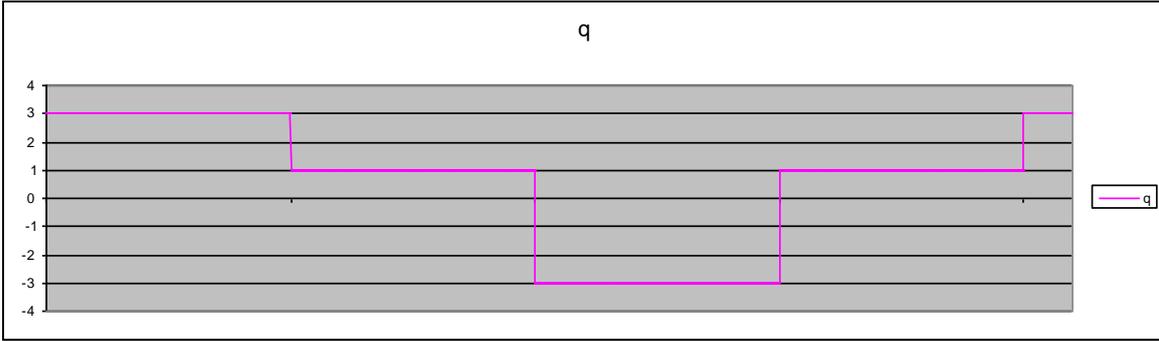
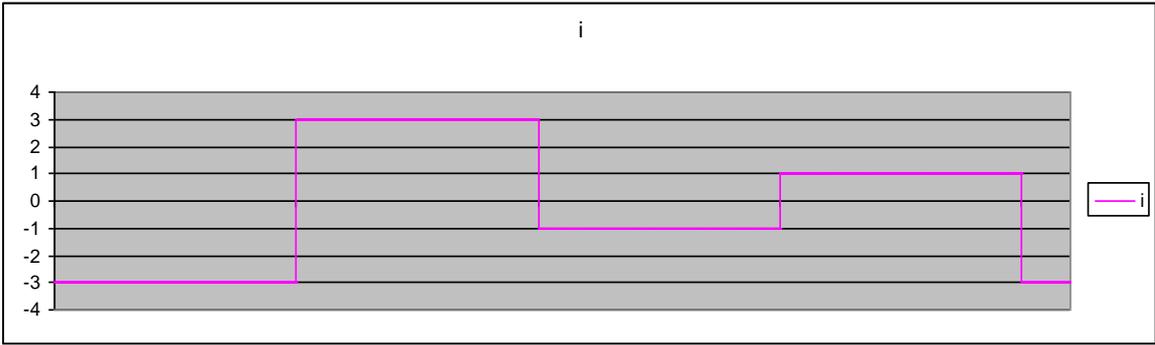
- l'allure des signaux  $i(t)$ ,  $q(t)$  et  $s(t)$  à main levée,
- les signaux  $i(t)$ ,  $q(t)$ ,  $sa(t)$  et  $sb(t)$  à l'aide d'Excel (page 7),
- le diagramme de constellation  $q(t) = f[i(t)]$  à l'aide d'Excel,
- le diagramme de constellation  $q(t) = f[i(t)]$  à l'aide d'IQCreator (page 5).







**Modulation QPSK**



**Modulation 16QAM**