



Simulation : la modulation du téléphone GSM



 **ROHDE & SCHWARZ** WinIQSIM



Fonctions étudiées :

- modulation MSK
- modulateur à quadrature
- filtrage du signal binaire
- spectre de la porteuse modulée
- multiplexage temporel
- commande de puissance

Introduction :

Ce TP vous propose d'étudier quelques aspects des techniques utilisées dans le standard du téléphone GSM. Au besoin, on pourra se reporter aux documents **GSM-réseau** et **GSM-mobile** consultables sur la page Diaporamas du site www.ta-formation.com qui expose les bases de cette technique.

L'étude se fera par simulation avec le logiciel WinIQsim de Rohde et Schwarz qui permet :

- de simuler les signaux des différents types de modulations numériques et d'en visualiser les propriétés
- de créer ces signaux simulés avec un générateur de signaux (fonction non utilisée dans ce TP)

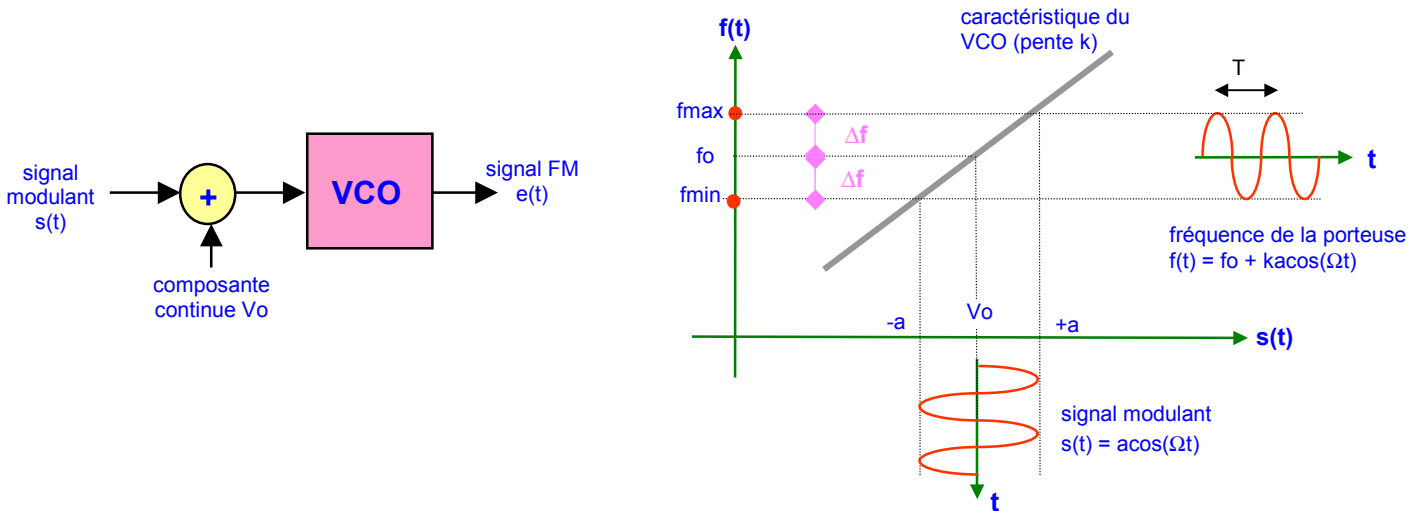
Ce logiciel de simulation WinIQsim (version 4.30) est téléchargeable gratuitement avec sa notice d'utilisation à l'adresse : www.rohde-schwarz.com

I) Indice de modulation en numérique :

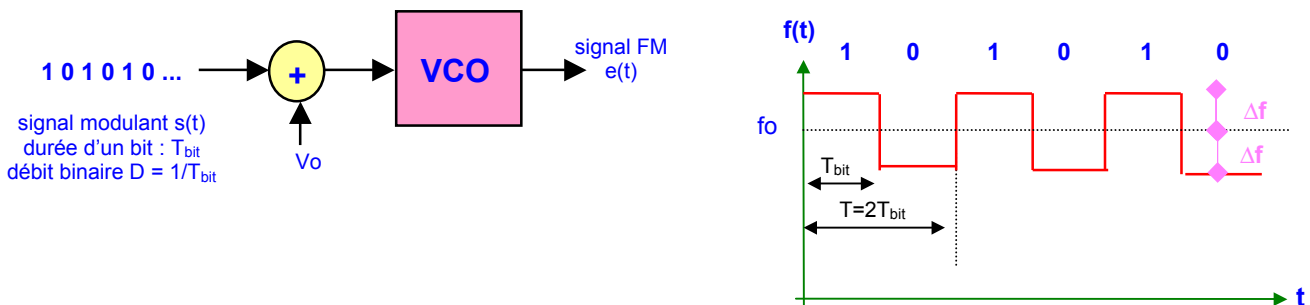
Lorsqu'on module en fréquence une porteuse par un signal modulant sinusoïdal $s(t) = \text{acos}(\Omega t)$ de période $T=1/F$:

- la fréquence instantanée s'écrit : $f(t) = f_0 + k\text{acos}(\Omega t)$
- l'excursion en fréquence vaut : $\Delta f = \pm ka$
- l'indice de modulation m s'écrit : $m = \Delta f / F$

Ce signal FM est, en général, produit par un VCO :



Si le signal modulant est un signal binaire, on étend la définition de l'indice de modulation m :



L'indice de modulation m pour une modulation numérique s'écrit : $m = \Delta f / F = \Delta f \cdot 2T_{\text{bit}} = 2\Delta f / D$

La fréquence instantanée s'écrit alors : $f(t) = f_0 \pm mD/2$ (+ pour un "1" et - pour un "0")

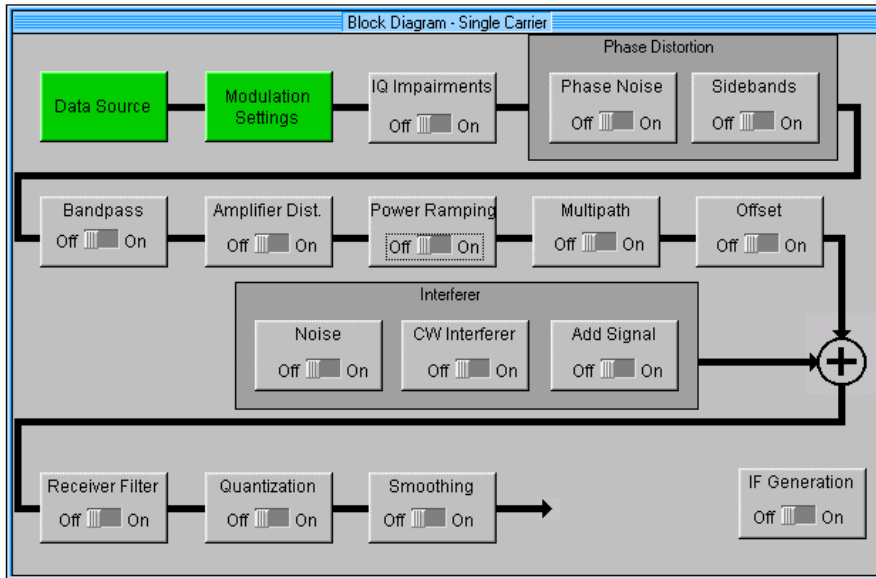
II) La modulation MSK :

Le téléphone GSM utilise une modulation de fréquence avec un indice de modulation $m = 0,5$. Cette valeur de m particulière correspond à l'appellation **MSK** (Minimum Shift Keying).

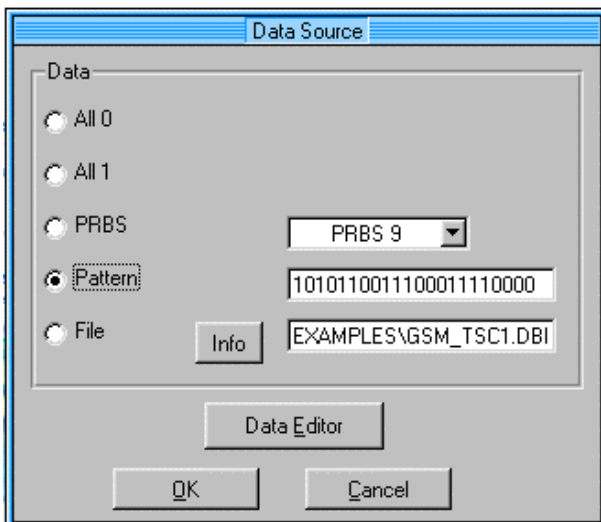
Les données binaires sont transmises et reçues par le téléphone avec un débit binaire : $D = 270,83333 \text{ kbits/s}$.

1) Quelle est la durée T_{bit} que nécessite la transmission d'un bit ? quelle serait la fréquence F du signal périodique correspondant à la séquence binaire "10101010..." ? Quelle est l'excursion en fréquence Δf du GSM ?

Démarrer le logiciel WinQsim, choisir New puis Single Carrier dans le Menu Files pour effacer les paramétrages liés à une utilisation précédente et afficher le Block Diagram suivant :



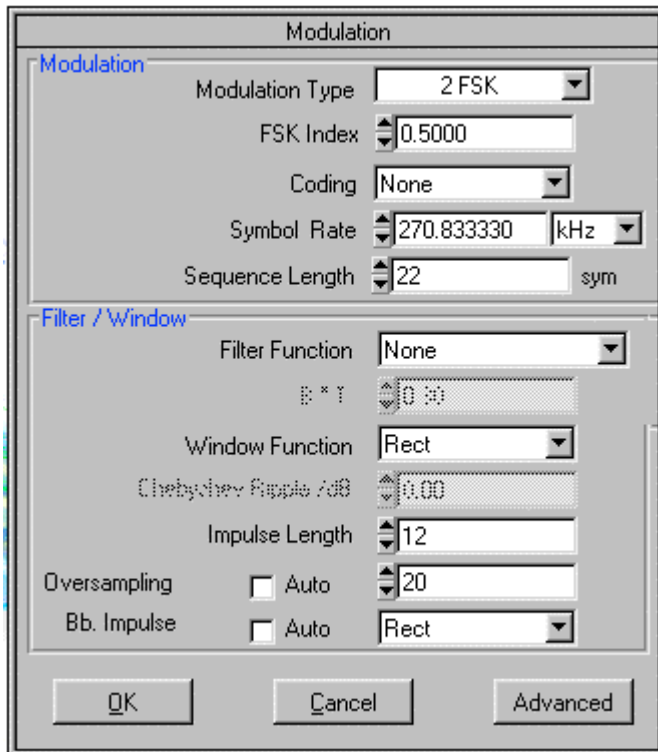
En cliquant sur le cadre Data Source, sélectionner Pattern et entrer dans la fenêtre un signal modulant constitué de la séquence : 1010110011100011110000



Remarque : outre le Pattern personnalisé, on pourra choisir comme entrée pour d'autres simulations une séquence "0000000..." ou "1111111...", des séquences pseudoaléatoires PRBSX (X=7,9,15,16,20,21,23) de longueur 2^X ou enfin un signal préenregistré (salve de données GSM par exemple).

Pour définir le type de modulation, ouvrir la fenêtre Modulation Settings et entrer les données suivantes :

- **Modulation type** : 2 FSK , modulation de fréquence à 2 états
- **FSK index** : 0,5 c'est l'indice de modulation m (automatique si on choisit MSK)
- **Coding** : None, pas de codage du signal binaire pour le moment
- **Symbol rate** : 270,83333 kHz, c'ets le débit binaire
- **Sequence length** : 22 bits pour le signal d'entrée
- **Filter Function** : None, le signal binaire module la porteuse sans filtrage préalable (absurde en pratique!)
- **Oversampling** : 20 cela veut dire que chaque bit est codé sur 20 échantillons (pour les calculs)
- **Bb Impulse** : Rect (un bit garde sa valeur pendant la durée T_{bit})

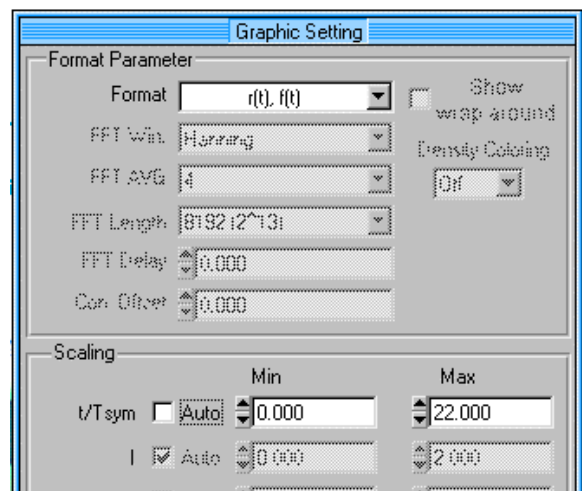


Ouvrir la fenêtre Graphic Settings, sélectionner la visualisation de l'amplitude $r(t)$ et de la fréquence $f(t)$ du signal modulé pour les 22 bits d'entrée et tracer les 2 courbes en cliquant sur Plot Graph :

2) En théorie, l'amplitude d'un signal FM est constante (et égale à 1 dans ces simulations). La simulation montre-t-elle une amplitude $r(t)$ du signal modulé constante ?

3) Avec les curseurs, mesurer l'excursion en fréquence Δf du signal modulé et comparer à la valeur théorique.

4) En gardant le même débit D, modifier la valeur de l'indice de modulation et vérifier son incidence sur l'excursion en fréquence de la porteuse.



III) Le modulateur à quadrature :

La production avec un VCO d'un signal FM aux caractéristiques précises (m , Δf) pose des problèmes car elles dépendent de l'amplitude du signal modulant et des propriétés du VCO qui peuvent varier dans le temps.

De ce fait, on produit le signal FM du GSM avec un modulateur à quadrature ou modulateur IQ, plus complexe en apparence mais aux performances bien meilleures et plus approprié aux techniques numériques.

Il faut produire un signal FM de fréquence : $f(t) = f_0 \pm mD/2 = f_0 \pm D/4$ (+ pour un "1" et - pour un "0")

Sa pulsation s'écrit alors : $\omega(t) = \omega_0 \pm 2\pi D/4 = \omega_0 \pm \pi D/2$

et sa phase, intégrale de la pulsation : $\theta(t) = \omega_0 t \pm \pi Dt/2 = \omega_0 t + \varphi(t)$ avec $\varphi(t) = \pm \pi Dt/2$

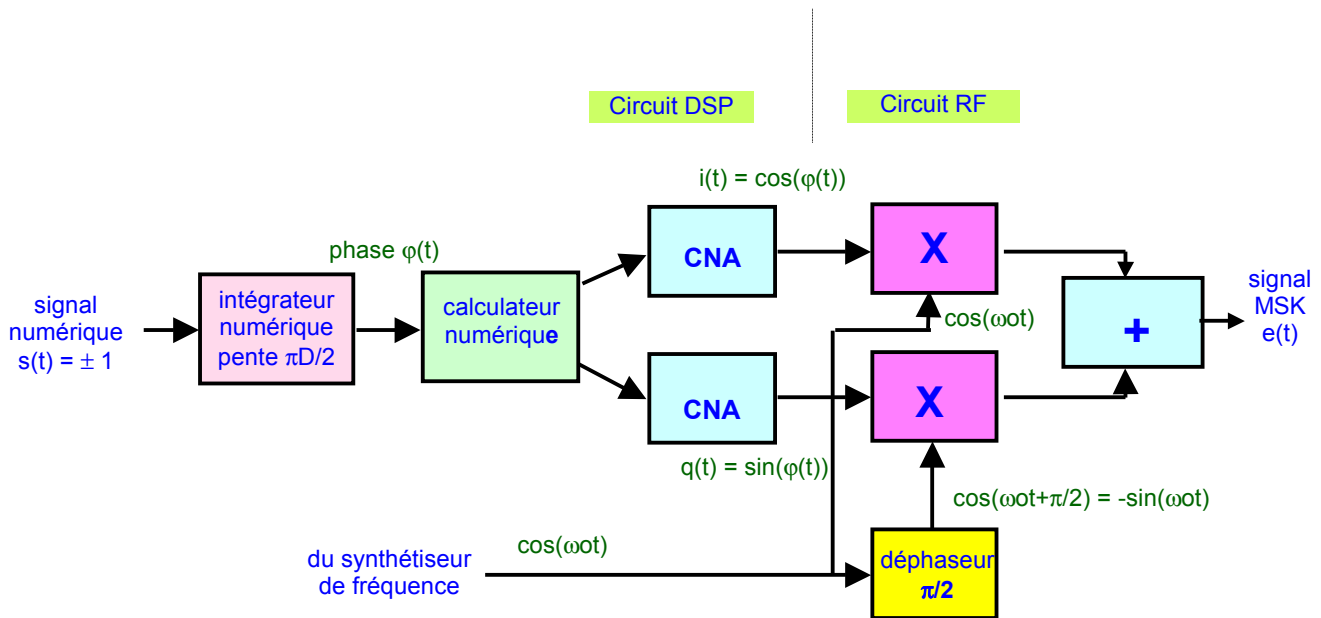
La porteuse modulée MSK s'écrit donc : $e(t) = \cos(\omega_0 t + \varphi(t))$ avec $\varphi(t) = \pm \pi Dt/2$

Si on développe cette expression, on peut voir qu'il est facile de produire ce signal :

$$e(t) = \cos(\varphi(t)).\cos(\omega_0 t) - \sin(\varphi(t)).\sin(\omega_0 t) = \cos(\varphi(t)).\cos(\omega_0 t) + \sin(\varphi(t)).\cos(\omega_0 t + \pi/2)$$

La structure produisant le signal modulé est directement calquée sur ce résultat :

- le signal binaire est intégré pour obtenir $\varphi(t) = \pm \pi Dt/2$
- le processeur calcule le cosinus et le sinus : $i(t) = \cos(\varphi(t))$ et $q(t) = \sin(\varphi(t))$
- les signaux $i(t)$ et $q(t)$ sont multipliés par la porteuse à ω_0 et la même porteuse déphasée de $\pi/2$
- les signaux résultants sont additionnés et donnent la porteuse $e(t)$ modulée MSK



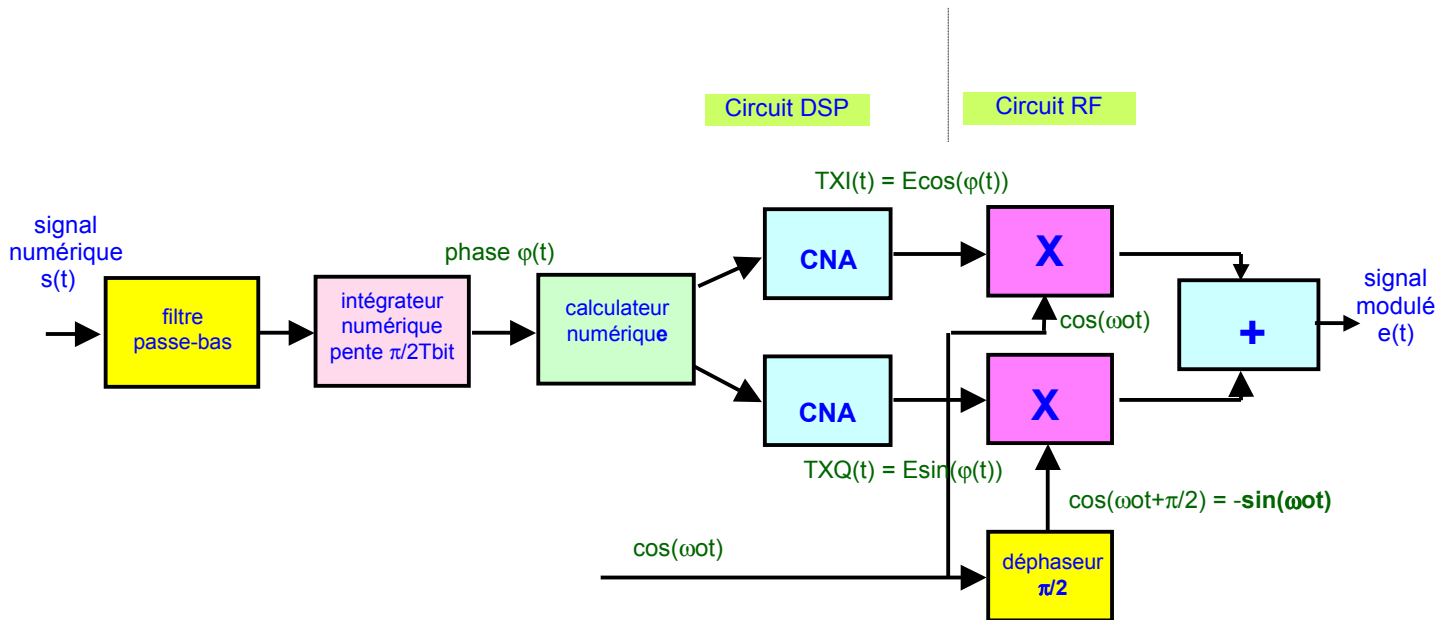
Pendant la durée d'un bit, la phase évolue linéairement avec une pente positive ou négative suivant la valeur du bit, et aura tourné de $\pm \pi/2$ pendant la durée de transmission d'un bit.

5) En partant de la séquence binaire définie précédemment, dessiner sur la **Feuille réponse 1** l'évolution de la phase $\varphi(t)$ et des signaux $i(t)$ et $q(t)$.

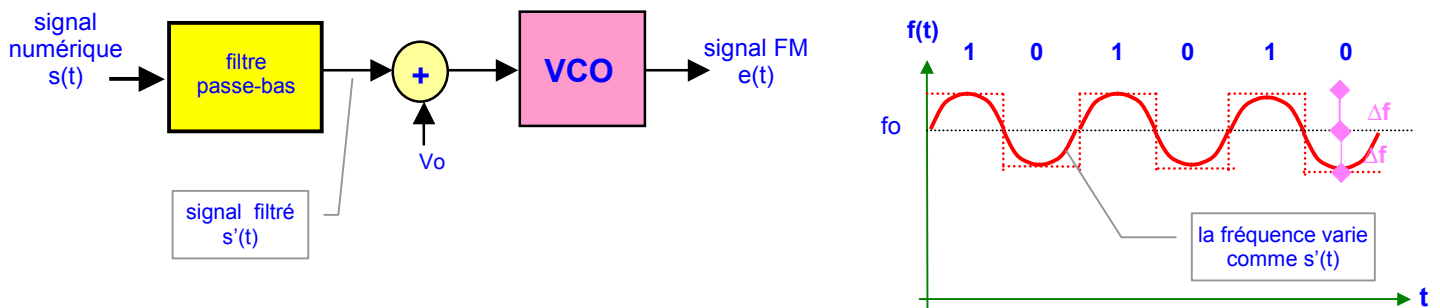
6) Avec WinQsim, visualiser les signaux $r(t)$ et $\phi(t)$, puis $i(t)$ et $q(t)$ et comparer les résultats aux courbes prévues. Vérifier la valeur de la rotation de phase durant T_{bit} .

IV) Le filtrage du signal binaire :

La modulation d'une porteuse par un signal binaire aboutit à un spectre trop large. C'est pourquoi on trouve toujours à l'entrée du modulateur un filtre passe-bas (classique d'ordre n , mais plus souvent gaussien ou "en cosinus").



L'ensemble passe-bas + modulateur est alors équivalent à la structure suivante :



7) Toujours pour la même séquence binaire et le même type de modulation (2FSK avec $m = 0,5$), relever les variations de $r(t)$ et $f(t)$ pour les filtres passe-bas suivants (Filter Function dans la fenêtre Modulation) :

- **5^{ème} ordre** coupant à 270 kHz (Butterworth 5rd order, Cutoff freq/ $f_{\text{sym}} = 1$)
- **filtre en cosinus** (Cosine, Rolloff = 0,5)
- **gaussien** coupant à $B = 81,2$ kHz (Gauss, $B.T_{\text{bit}} = 0,3$), c'est le filtre utilisé dans le standard GSM
- **5^{ème} ordre** coupant aussi à $B = 81,2$ kHz (Butterworth 5rd order, Cutoff freq/ $f_{\text{sym}} = 0,3$)

8) Parmi ces différents filtres, lequel respecte le mieux l'excursion en fréquence souhaitée de $\Delta f = \pm 67,7$ kHz ? Lequel respecte le mieux la forme du signal binaire ?

9) Sur les **Feuilles réponses 2 et 3**, observer les réponses en fréquences des filtres gaussien et en cosinus et déterminer les résultats demandés.

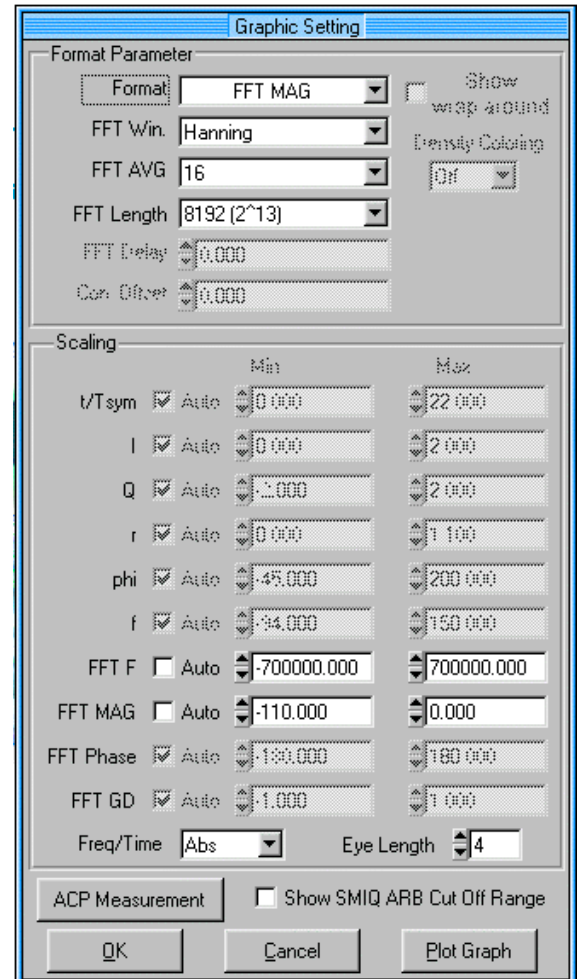
V) Spectre de la porteuse modulée :

Pour observer le spectre de la porteuse modulée, il faut un signal modulant plus long que la séquence de 22 bits.

On choisira donc comme signal d'entrée une séquence pseudo-aléatoire PRBS11 (longueur $2^{11} = 2048$) qui sera répétée 4 fois (Sequence length = 8192 dans la fenêtre Modulation).

Pour visualiser le spectre, on choisit l'option FFT MAG dans la fenêtre Graphic Settings, avec le paramétrage suivant :

- moyenne sur 16 spectres calculés
- FFT sur 8192 points
- plage de fréquence ± 700 kHz
- lage d'amplitudes : 0 à -110 dB



10) Tracer le spectre de la porteuse modulée pour les 3 filtres passe-bas suivants :

- **5^{ème} ordre** coupant à 270 kHz (Butterworth 5rd order, Cutoff freq/ $f_{sym} = 1$)
- **filtre en cosinus** (Cosine, Rolloff = 0,5)
- **gaussien** coupant à $B = 81,2$ kHz (Gauss, $B.T_{bit} = 0,3$) qui est le filtre utilisé dans le standard GSM

Pour chaque tracé, superposer au spectre réel le gabarit pour le standard GSM donné en Annexe. Quel est le filtre passe-bas qui donne un spectre respectant au mieux le gabarit ?

11) Pour se persuader de l'importance du filtrage passe-bas du signal numérique avant modulation, tracer le spectre du signal modulé sans aucun filtrage préalable et conclure quant à l'intérêt du filtrage.

12) Dans le standard GSM, un canal a une largeur de 200 kHz. L'émission d'un mobile tient-elle dans un canal ? Si un mobile émet une puissance $P_0 = 5$ dBm dans le canal N, quelle sera le niveau du signal parasite au centre du canal N+1 ? du canal N+2 ?

VI) Le multiplexage temporel :

Toutes les études précédentes ont été faites en régime permanent, c'est-à-dire avec une émission continue.

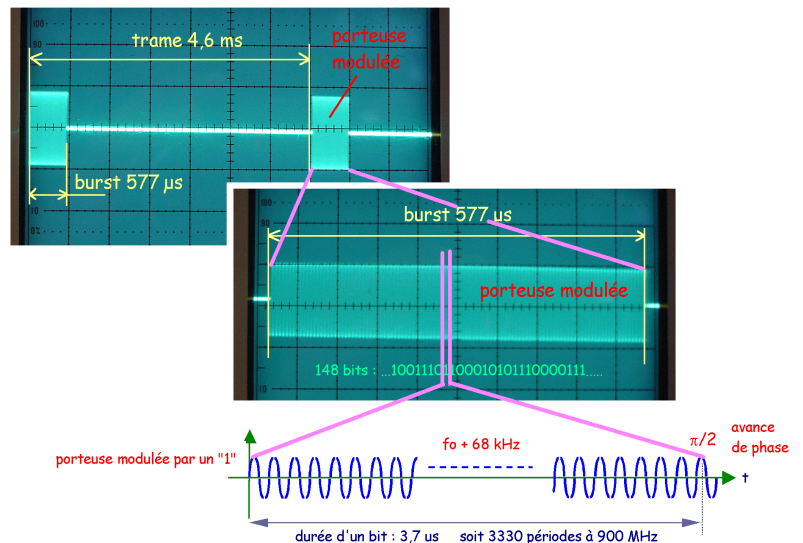
Or le mobile GSM émet une porteuse modulée de manière discontinue, les données numériques (voix, paramètres liés à la liaison) étant regroupées par salves de 148 bits avec le timing suivant :

Caractéristiques de l'émission :

- temps divisé en trames de 4,6 ms
- trame divisée en 8 time-slots de 577µs
- le mobile émet durant 1 time-slot
- en 577µs il émet une salve de 148 bits

Valeurs exactes :

- référence TCXO à $f_0 = 13,000$ MHz
- débit $D = f_0/48$
- durée du bit : $T_{\text{bit}} = 1/D = 3,6923$ µs
- 1250 bits/trame
- durée de la trame $1250 \cdot T_{\text{bit}} = 4,61$ ms



Le signal numérique modulant est maintenant une séquence GSM standard dans un des time-slots de la trame. Pour cela, dans le menu **File**, sélectionner **Open settings** et choisir la séquence **gsm_slo1.iqs** dans le dossier **examples**.

Vérifier que le paramétrage du logiciel correspond alors à celui du GSM : modulation MSK, codage différentiel du signal binaire, débit standard, filtrage gaussien avec B.T=0,3.

13) Visualiser l'allure de l'amplitude $r(t)$ et la fréquence $f(t)$ durant une trame (t/T_{sym} allant de 0 à 1250). Dans quel time-slot (ils sont numérotés de 0 à 7) l'émission a-t-elle lieu pour cette séquence binaire ?

14) Visualiser l'allure de $r(t)$ en zoomant sur la montée en puissance de l'émission (t/T_{sym} allant de 150 à 160) et mesurer l'instant t_1 où le niveau nominal d'émission est atteint. De la même façon, mesurer l'instant t_2 où le niveau d'émission commence à décroître. La durée $t_2 - t_1$ est-elle suffisante pour transmettre les 148 bits utiles ?

15) Pour la durée du time-slot (t/T_{sym} allant de 150 à 320), visualiser d'abord les signaux $r(t)$ et $\varphi(t)$, puis les signaux $r(t)$ et $f(t)$. Vérifier les caractéristiques de l'amplitude $r(t)$ et de la fréquence $f(t)$ correspondent à ce qui est attendu.

16) On supprime maintenant le début et la fin du time-slot (t/T_{sym} allant de 160 à 300) et on visualise le diagramme de l'oeil courbe obtenu en superposant les variations de $f(t)$ sur 4 symboles. Pour cela, sélectionner la courbe **Eye diagram f** avec une longueur **Eye Length = 4**. Faire apparaître sur le tracé les instants de décision (au milieu du symbole). Le récepteur pourra-t-il facilement reconnaître un "1" d'un "0" ?

17) Même question après avoir rajouté du bruit (case **Noise**) lors de la transmission :

- avec un rapport porteuse/bruit $E_b/N_0 = 55$ dB et un bruit dans toute la bande (Bandwith = full)
- avec un rapport porteuse/bruit $E_b/N_0 = 45$ dB et un bruit dans toute la bande (Bandwith = full)

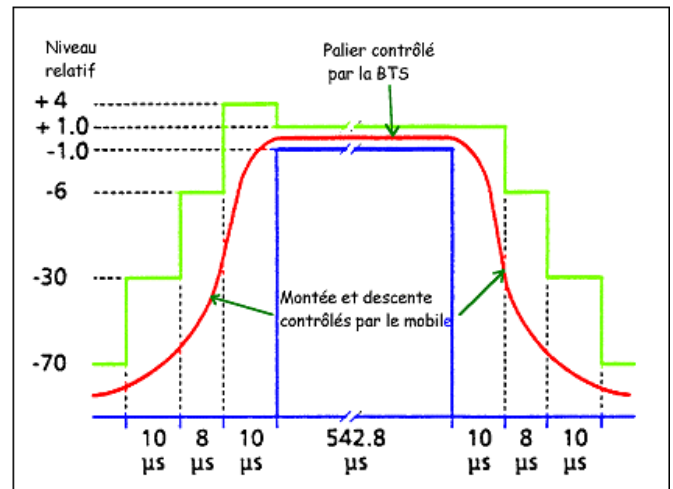
VII) La commande de puissance :

Pour cette question, on pourra recharger la séquence **gsm_slo1.iqs** pour repartir sur une bonne configuration.

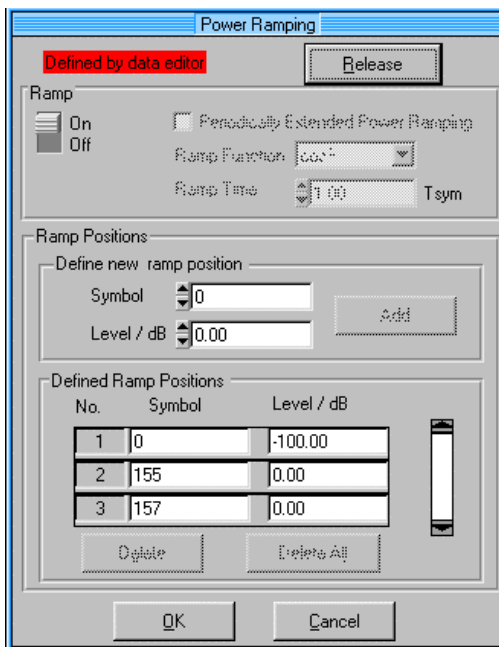
Lors de l'émission d'une salve de données, la puissance d'émission du mobile (2W maxi) dépend de la position du mobile dans la cellule et est ajusté par la station de base (BTS) pour assurer un taux d'erreurs acceptable.

Mais c'est le mobile qui gère la montée et la descente en puissance selon un gabarit assez précis :

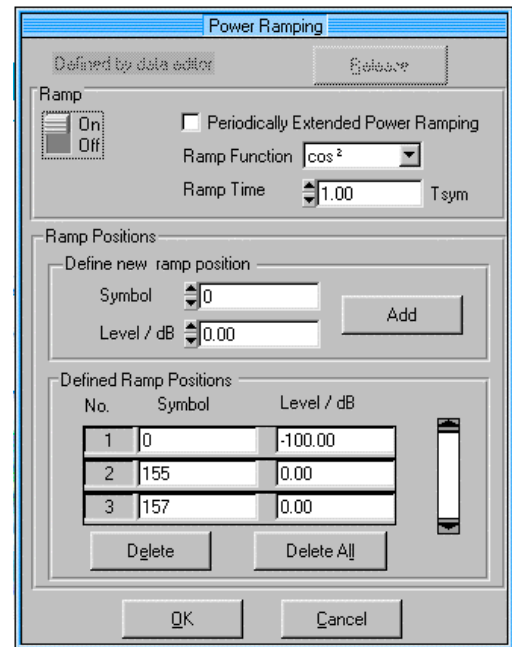
- une montée et une descente progressives du niveau de la porteuse permet de limiter l'encombrement spectral
- la forme de la montée (et de la descente) est une fonction \cos^2
- typiquement, la montée (et la descente) durent un temps $\tau \approx 1$ à $2T_{\text{bit}}$
- toute modification de la forme ou de la durée du profil joue sur le spectre



Pour vérifier l'influence sur le spectre du profil de montée en puissance, cliquer sur le cadre **Power Ramping** puis sur **Release** pour permettre la modification des paramètres par rapport au standard GSM.



Release →



18) Vérifier l'allure de $r(t)$ en zoomant sur la montée en puissance de l'émission (t/T_{sym} allant de 150 à 160) et relever les spectres dans les cas suivants :

- montée linéaire : **Ramp function = linear**, de durées **Ramp time = 0,2 - 1 et 2**
- montée en \cos^2 : **Ramp function = \cos^2** , de durées **Ramp time = 0,2 - 1 et 2**

Dans quel(s) cas le spectre respecte-t-il le gabarit du GSM ?

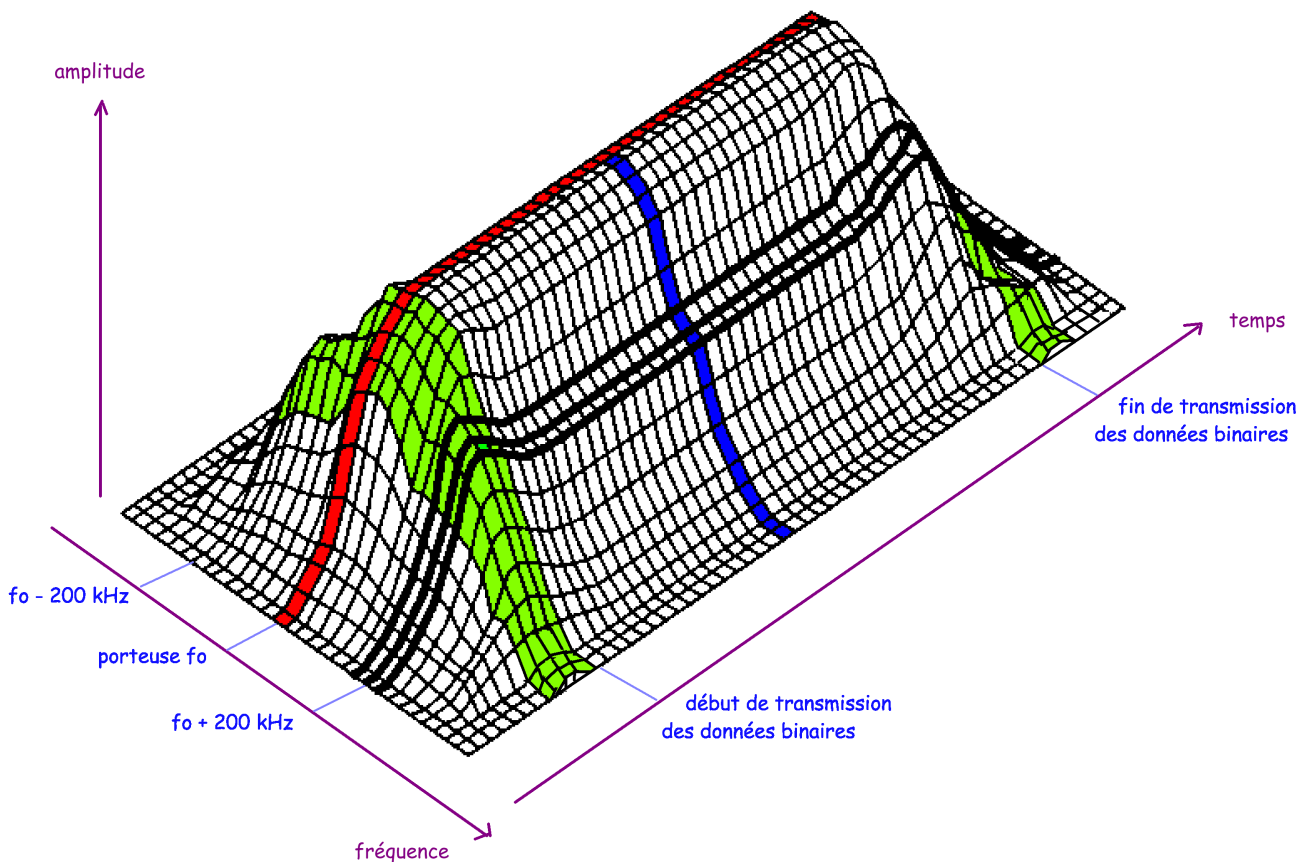
Remarque : pour la montée en \cos^2 , l'amplitude s'écrit $r(t) = R \cdot \cos^2[0,5\pi(1-t/\tau)]$ et passe de 0 (à $t = 0$) à R (à $t = \tau$)

VII) Conclusion :

Les simulations effectuées à l'aide de WinIQsim ont permis de mettre en évidence un certain nombre de propriétés de la modulation utilisée dans le standard GSM.

Ces propriétés peuvent être résumées sur ce diagramme représentant l'évolution du spectre au cours du temps pendant l'émission, par le mobile, d'une salve de données :

- le spectre de la porteuse modulée n'est pas le même au démarrage et à l'arrêt de l'émission (courbes vertes) que pendant l'émission (courbe bleue)
- le démarrage et l'arrêt de l'émission se font selon une courbe bien déterminée (courbe rouge)
- le spectre du signal émis déborde en permanence du canal
- le spectre est un peu plus encombrant durant les phases transitoires



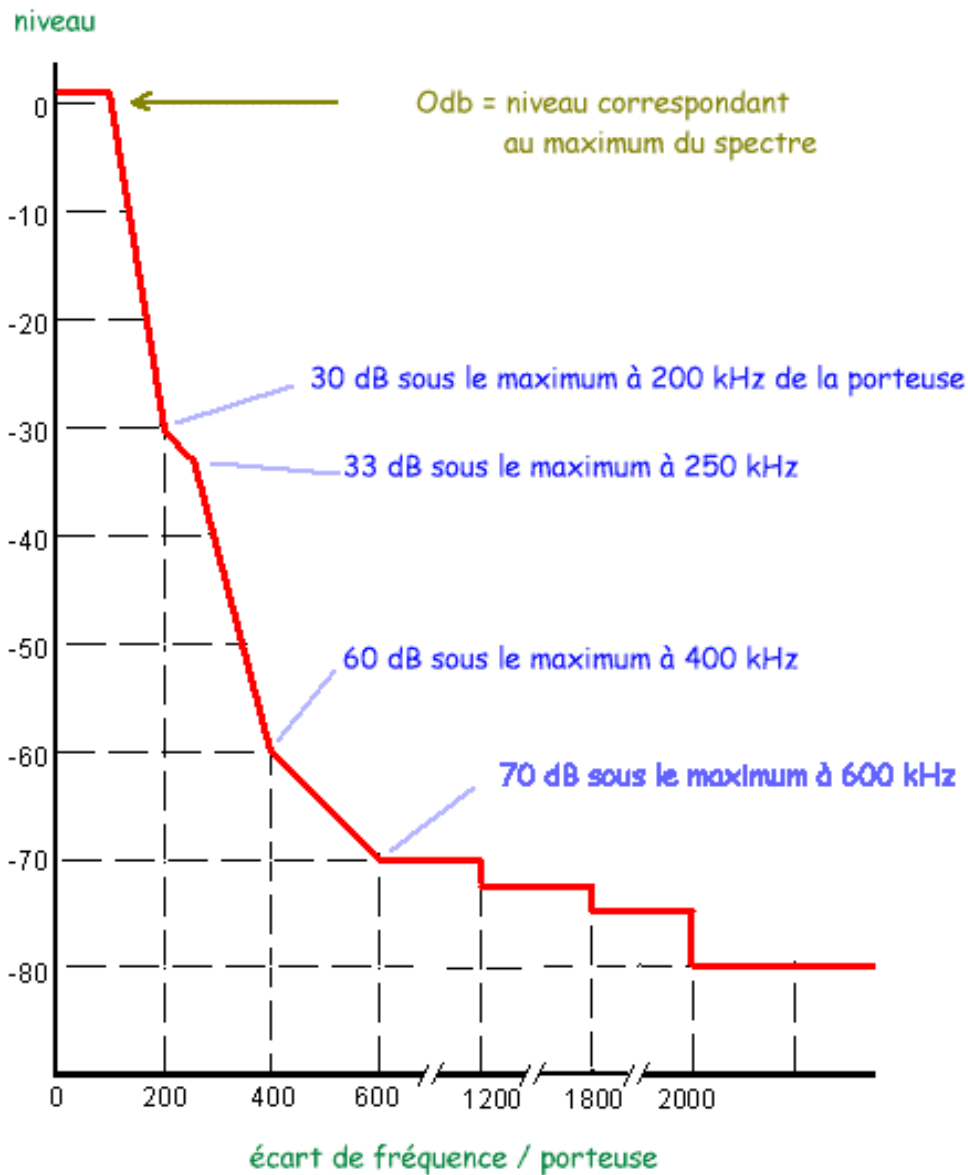
Remarque : dans la littérature sur le GSM on appelle

- "Spectrum due to modulation" le spectre correspondant à la courbe bleue
- "Spectrum due to switching" le spectre correspondant à la courbe verte

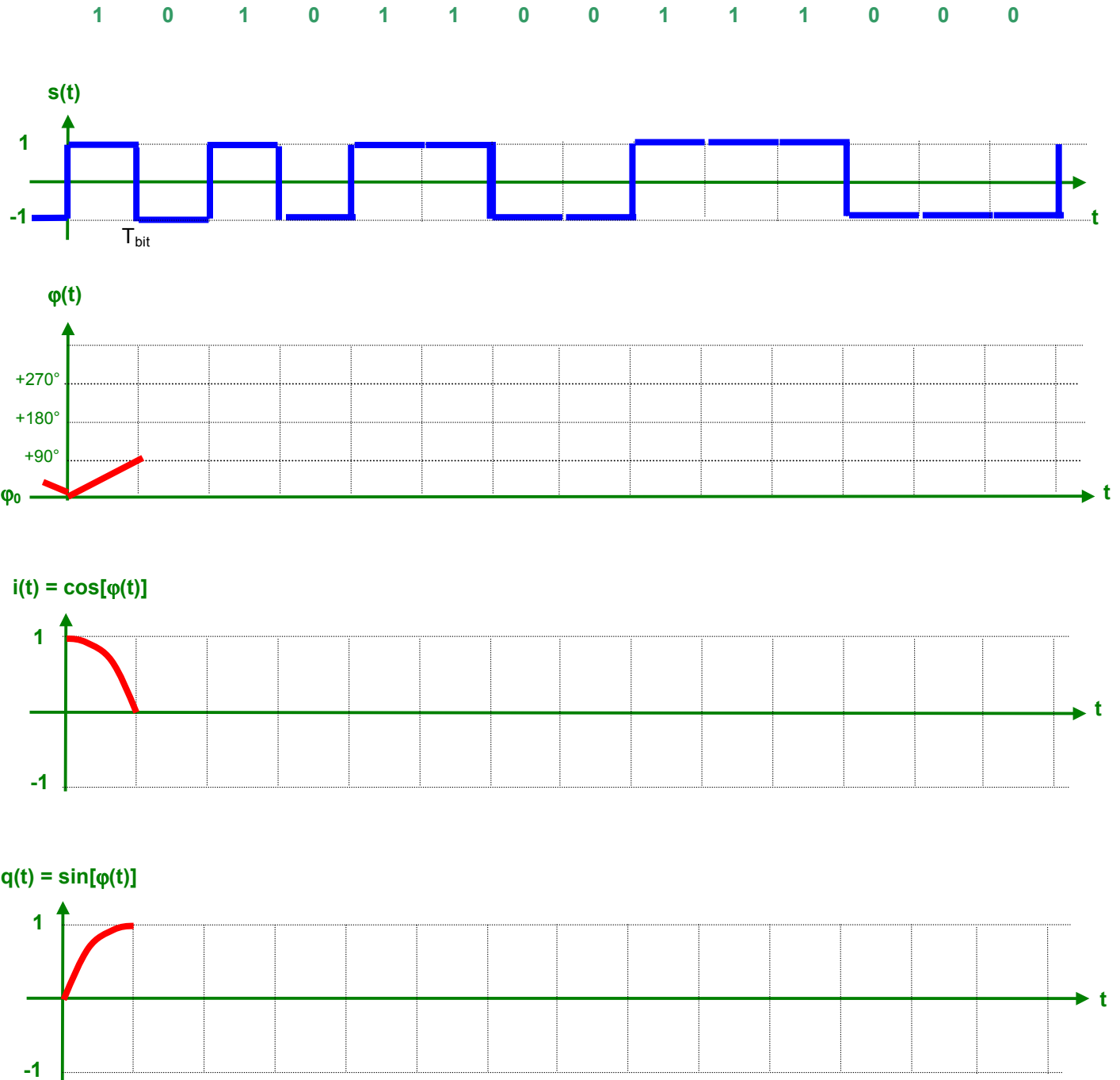
19) Conclure quant aux résultats mis en évidence par cette simulation en remplissant la **Feuille réponse 4**.

Annexe : gabarit du spectre du signal modulé GMSK

Après filtrage passe-bas et modulation MSK, le spectre de la porteuse, de chaque côté de la fréquence centrale, doit rester en-dessous du gabarit donné par la courbe rouge.



Feuille réponse 1 : allures de $\varphi(t)$, $i(t)$ et $q(t)$



Feuille réponse 2 : courbe de réponse du filtre passe-bas gaussien

Le module de la transmittance d'un filtre gaussien utilisé pour traiter des signaux binaires de débit D s'écrit :

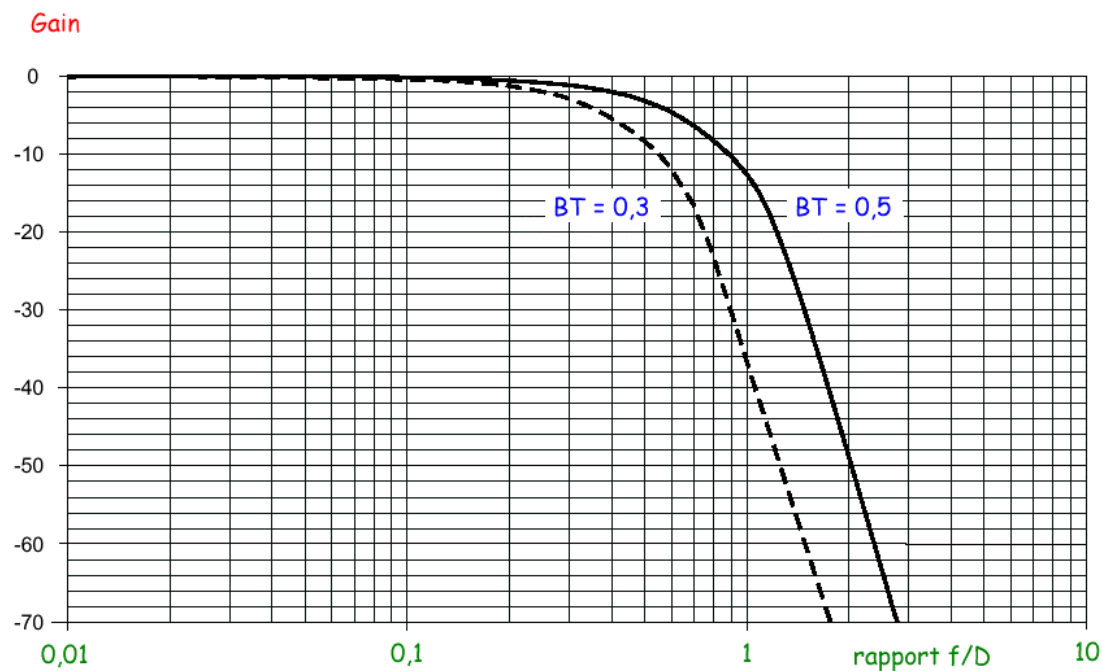
$$H(f) = \exp\left[-0,3466\left(\frac{f}{BT D}\right)^2\right] \quad \text{où BT représente le produit (bande passante x durée du bit)}$$

Pour le GSM, on utilise un filtre gaussien avec $BT = 0,3$ alors que pour le DECT et Bluetooth, on a choisi $BT = 0,5$.

Pour le GSM, l'expression précédente devient : $H(f) = \exp\left[-\left(\frac{f_{\text{kHz}}}{138}\right)^2\right]$

Pour le débit $D = 270,8333$ kHz :

- le module calculé de la transmittance à la fréquence $f = 81,2$ kHz vaut : $H_1 =$ = dB
- la fréquence de coupure calculée de ce filtre vaut : $f_c =$ kHz
- la fréquence de coupure mesurée pour $BT = 0,3$ vaut : $f'_c =$ kHz
- la fréquence de coupure mesurée pour $BT = 0,5$ vaut : $f''_c =$ kHz
- pour $BT = 0,3$ le module à une fréquence double de la coupure vaut : $H_2 =$ dB



Remarque : ce filtre s'appelle ainsi car sa réponse impulsionnelle est une gaussienne. Il a été retenu pour le GSM parce qu'il ne déforme pas trop le signal binaire, minimise l'encombrement spectral de la porteuse modulée et se comporte bien vis-à-vis du bruit.

Feuille réponse 3 : courbe de réponse du filtre passe-bas en cosinus

Le module de la transmittance d'un filtre en cosinus s'écrit en fonction du coefficient α appelé roll-off :

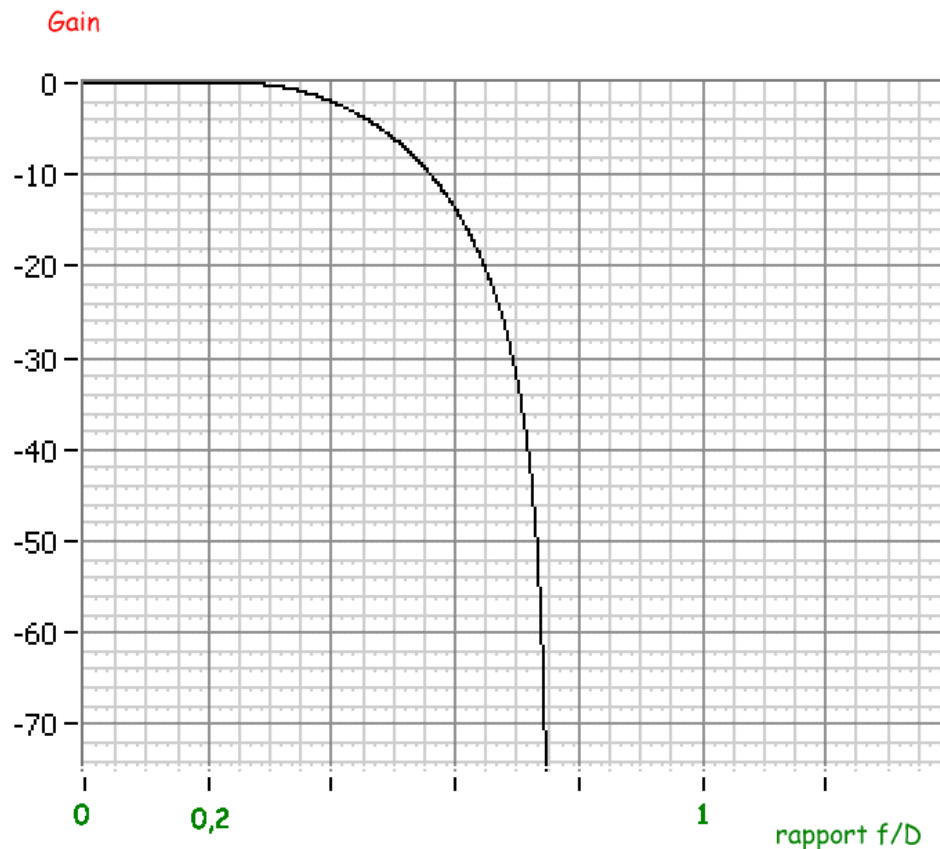
- $H(f)=1$ si $f < 0,5D(1-\alpha)$
- $H(f)=0,5\left[1+\cos\frac{\pi}{\alpha D}\left(f-\frac{D}{2}(1-\alpha)\right)\right]$ si $0,5D(1-\alpha) < f < 0,5D(1+\alpha)$
- $H(f)=0$ si $f > 0,5D(1+\alpha)$

Pour la valeur $\alpha = 0,5$ couramment utilisée dans les systèmes de communication numérique (autres que le GSM, DECT ...), la transmittance devient :

- $H(f)=1$ si $f < 67,7$ kHz
- $H(f)=0,5\left[1+\cos\frac{2\pi}{D}(f-0,25D)\right]$ si $67,7$ kHz $< f < 135,4$ kHz
- $H(f)=0$ si $f > 135,4$ kHz

Pour le débit $D = 270,8333$ kHz du GSM :

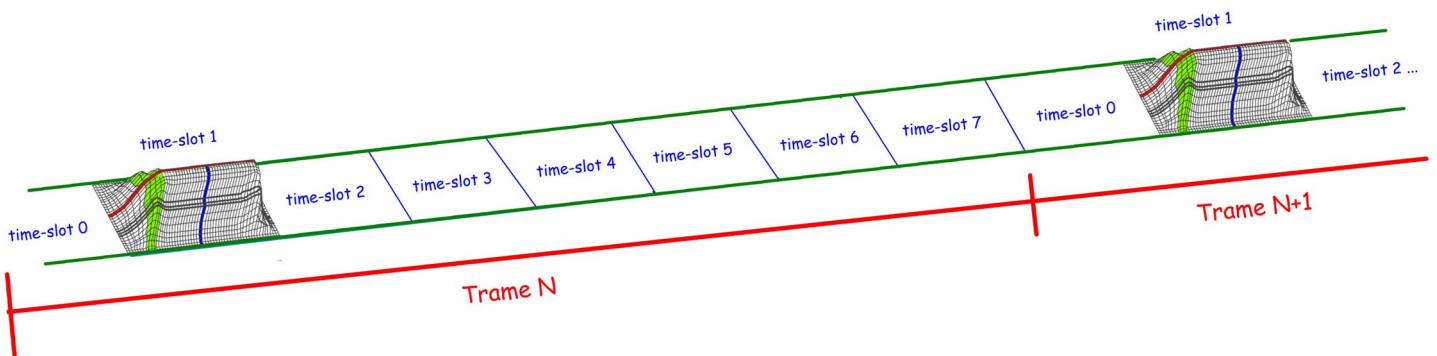
- la fréquence de coupure calculée de ce filtre vaut : $f_c =$ kHz
- la fréquence de coupure mesurée vaut $f'_c =$ kHz
- le module à une fréquence double de la coupure vaut : $H_2 =$ (valeur calculée)



Feuille réponse 4 : conclusions

1 Dans les phases d'émission, le signal émis a les propriétés suivantes :

- | | Vrai | Faux |
|--|--------------------------|--------------------------|
| a) le signal est modulé en amplitude (modulation en tout-ou-rien) avec un débit de 270,833 kbits/s | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) le signal est modulé en fréquence avec une excursion d'environ ± 68 kHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) la fréquence varie par sauts brusques, la phase varie continûment, l'amplitude est constante | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) le signal binaire est filtré par un filtre gaussien pour améliorer la qualité de la transmission | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| e) le spectre du signal modulé tient entièrement dans le canal qui a une largeur de 200 KHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| f) le filtrage du signal binaire est essentiel pour limiter l'encombrement spectral | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| g) le signal est produit par un modulateur à quadrature plus performant qu'un VCO | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| h) la phase de la porteuse tourne de $\pm 90^\circ$ environ à chaque émission de bit | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| i) le signal modulé est la somme de deux signaux $i(t)$ et $q(t)$ | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |



2 En début et fin d'émission, les propriétés du signal sont les suivantes :

- | | Vrai | Faux |
|---|--------------------------|--------------------------|
| a) le spectre est plus large qu'en régime permanent | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) la forme du spectre doit être parfaitement maîtrisée pour une bonne réception du signal | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) la montée (et la descente) en puissance se fait selon une courbe la plus linéaire possible | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) la forme du profil de commande de la puissance émise est en mémoire dans le mobile | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| e) le spectre en régime transitoire s'appelle « Spectrum due to switching » | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

3 Au cours d'une conversation :

- | | Vrai | Faux |
|---|--------------------------|--------------------------|
| a) le mobile émet des données binaires durant 10% du temps | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) lorsqu'il n'émet pas, tous les circuits du mobile sont au repos pour minimiser sa consommation | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) la durée d'un time-slot d'émission est d'environ 570 μ s | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) la puissance émise par le mobile est toujours la même, elle est fixée par le mobile | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| e) en présence de bruit, la reconnaissance des 0 et 1 transmis est plus difficile pour la station de base | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

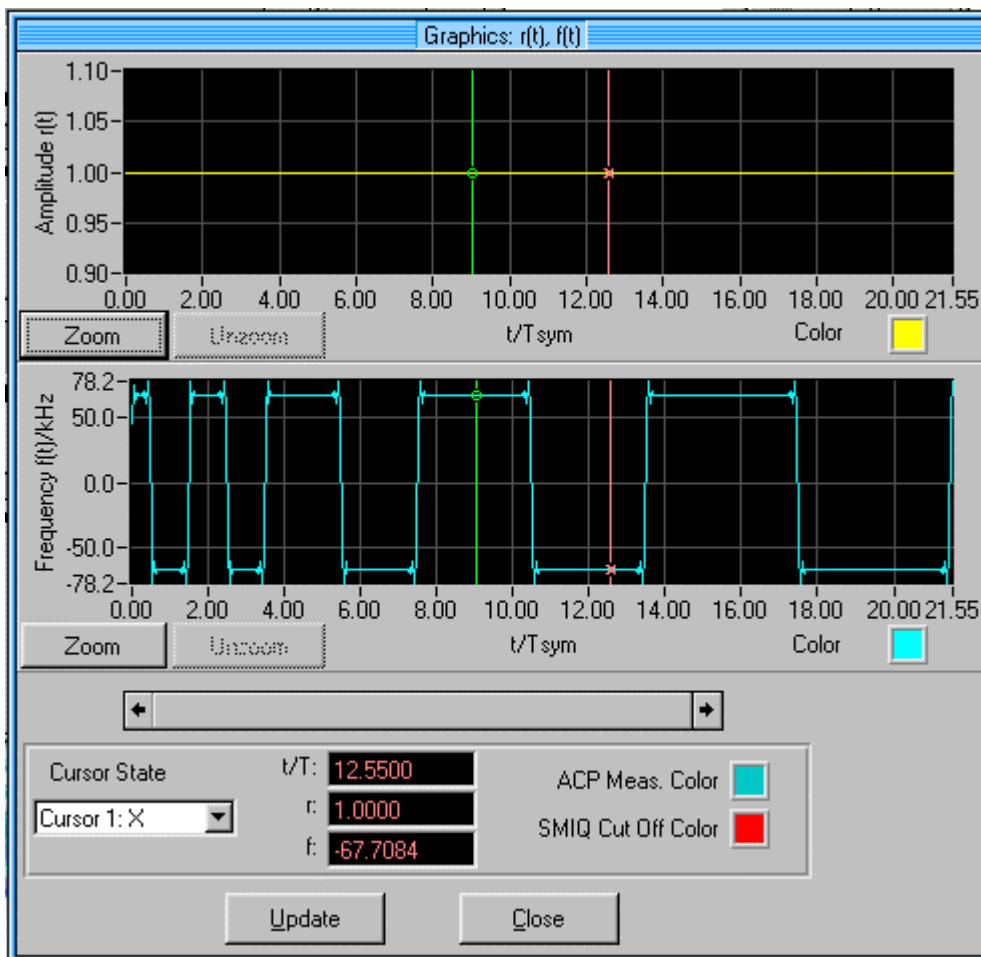
► Simulation : modulation du téléphone GSM (corrigé)

II) La modulation MSK :

1) Quelle est la durée T_{bit} que nécessite la transmission d'un bit ? quelle serait la fréquence F du signal périodique correspondant à la séquence binaire "10101010..." ? Quelle est l'excursion en fréquence Δf du GSM ?

- $T_{\text{bit}} = 1/D = 3,69 \mu\text{s}$
- le signal 10101010 est un signal périodique de période $T = 2T_{\text{bit}}$ soit $F = D/2 = 135,4 \text{ kHz}$
- $\Delta f = \pm mD/2 = \pm 67,7 \text{ kHz}$

2) En théorie, l'amplitude d'un signal FM est constante (et égale à 1 dans ces simulations). La simulation montre-t-elle une amplitude $r(t)$ du signal modulé constante ?



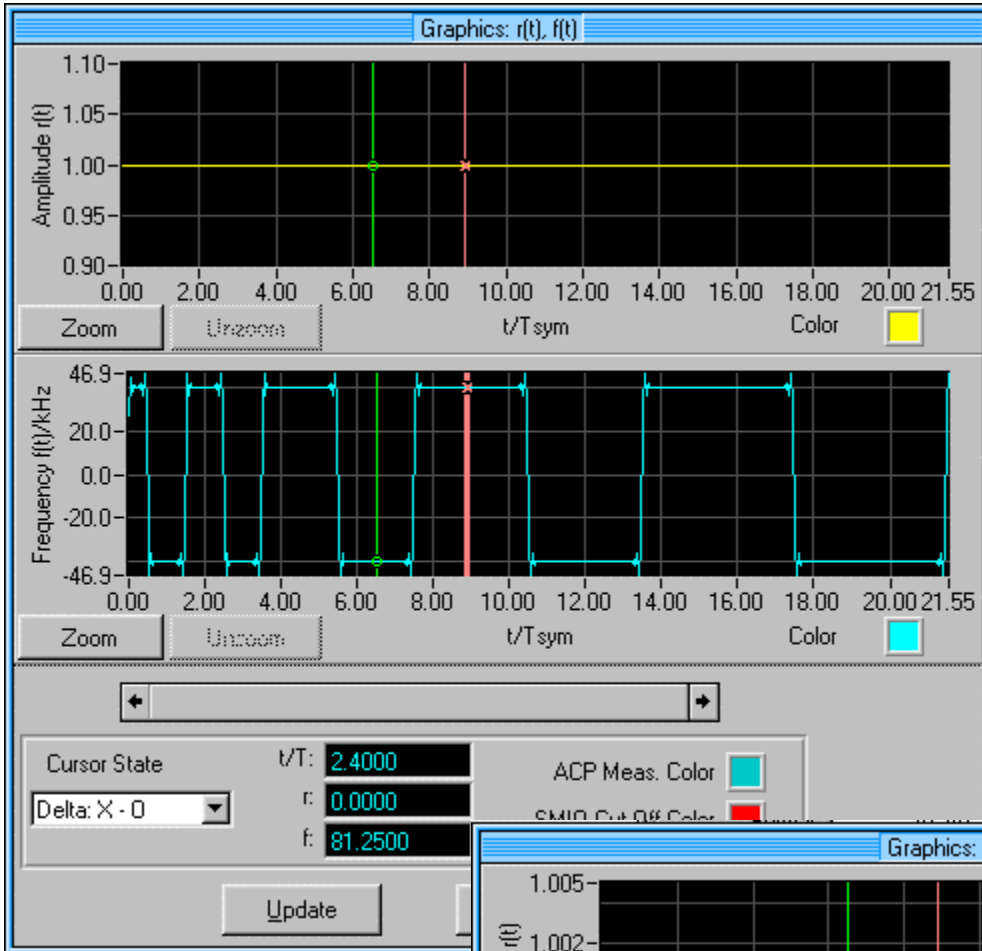
On constate sur le relevé que l'amplitude $r(t)$ du signal est bien constante.

3) Avec les curseurs, mesurer l'excursion en fréquence Δf du signal modulé et comparer à la valeur théorique.

La fréquence varie de part de d'autre de la porteuse avec une amplitude de $\pm 67,7 \text{ kHz}$

On note aussi un léger dépassement dans le régime transitoire de variation de la fréquence sur lequel on reviendra.

4) En gardant le même débit D , modifier la valeur de l'indice de modulation et vérifier son incidence sur l'excursion en fréquence de la porteuse.



Pour $m = 0,3$:

▪ Δf calculée :

$$mD/2 = 40,6 \text{ kHz}$$

▪ Δf mesurée :

$$81,25/2 = 40,6 \text{ kHz}$$

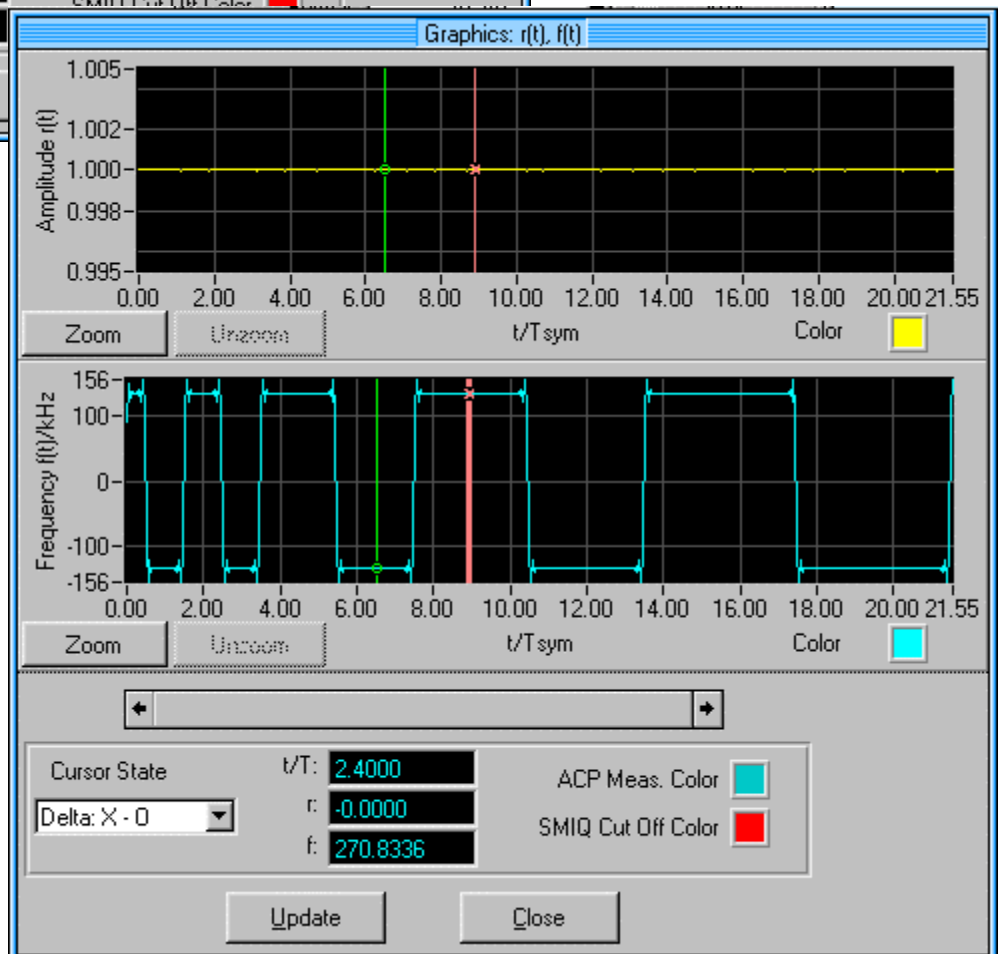
Pour $m = 1$:

▪ Δf calculée :

$$mD/2 = 135,4 \text{ kHz}$$

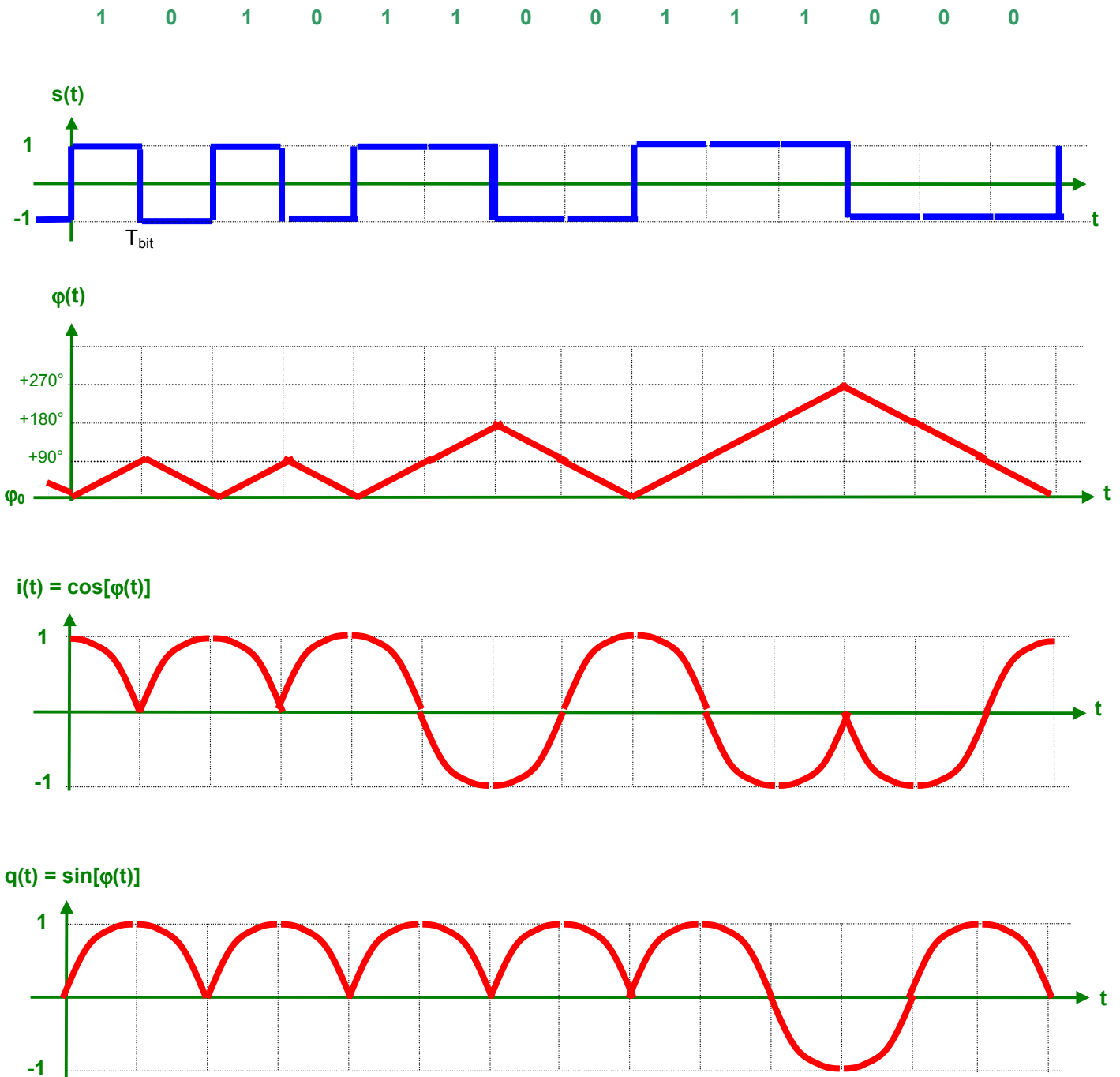
▪ Δf mesurée :

$$81,25/2 = 135,4 \text{ kHz}$$

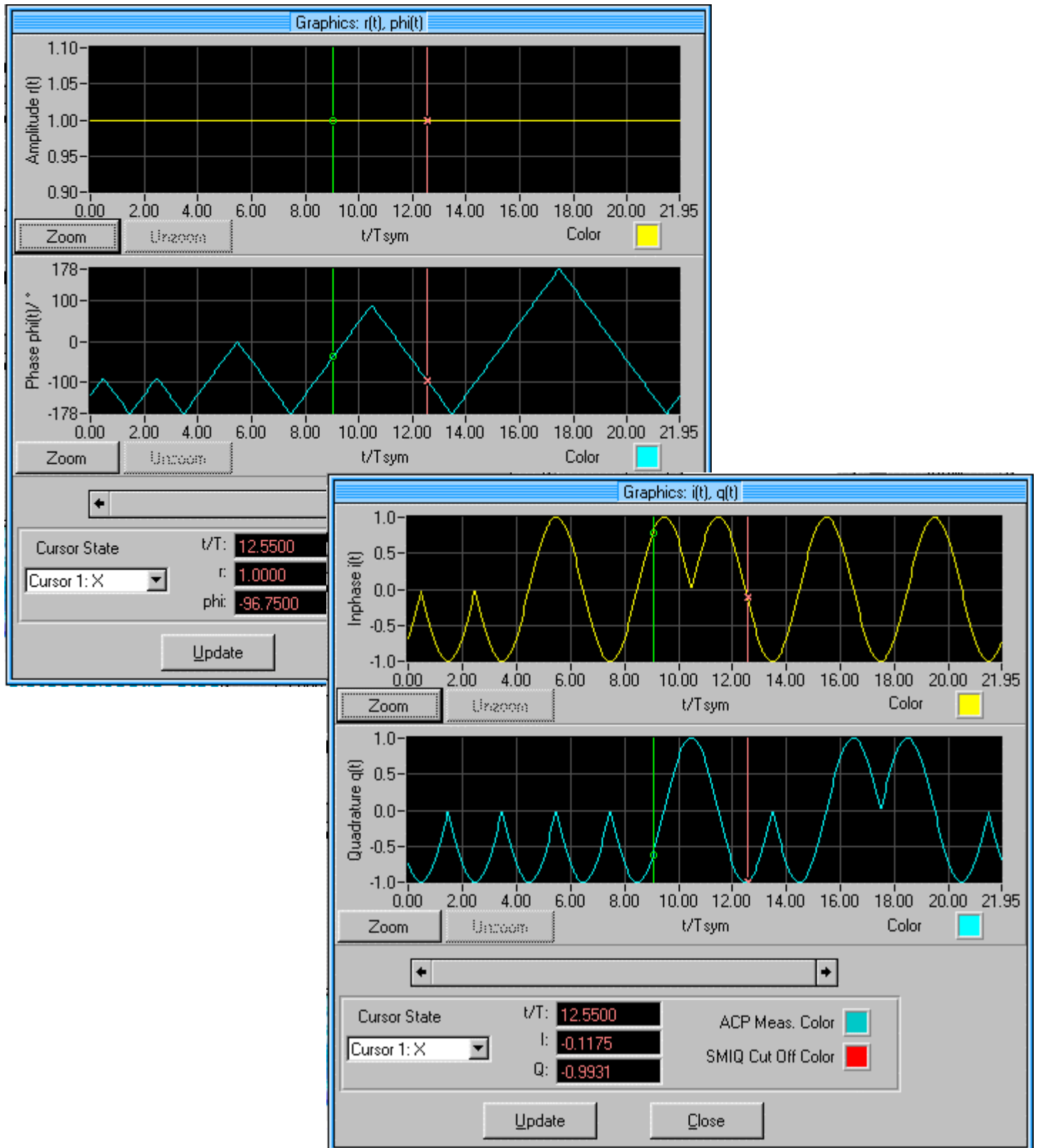


III) Le modulateur à quadrature :

5) En partant de la séquence binaire définie précédemment, dessiner sur la feuille réponse 1 l'évolution de la phase $\varphi(t)$ et des signaux $i(t)$ et $q(t)$.



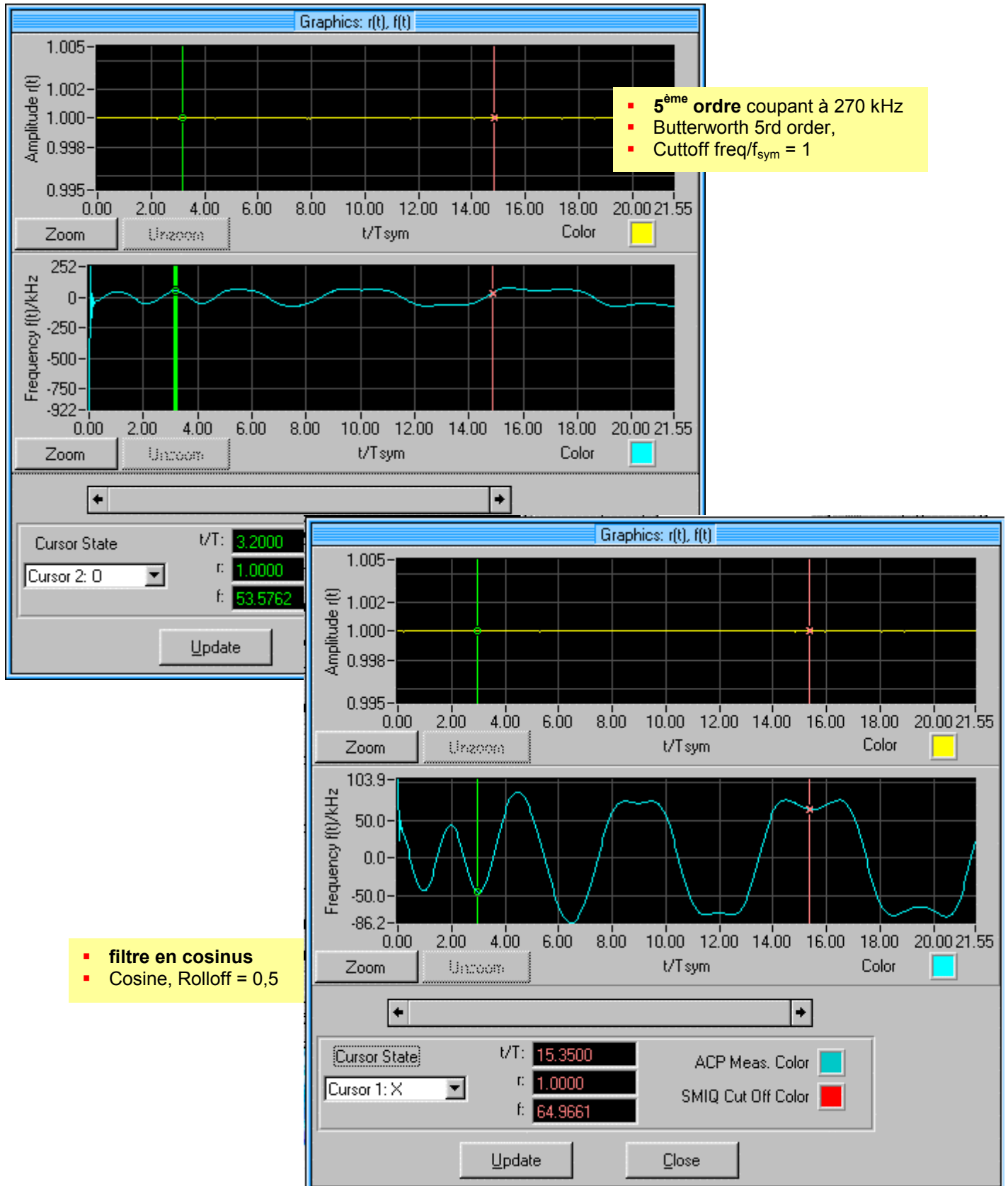
6) Avec WinQsim, visualiser les signaux $r(t)$ et $\phi(t)$, puis $i(t)$ et $q(t)$ et comparer les résultats aux courbes prévues. Vérifier la valeur de la rotation de phase durant T_{bit} .

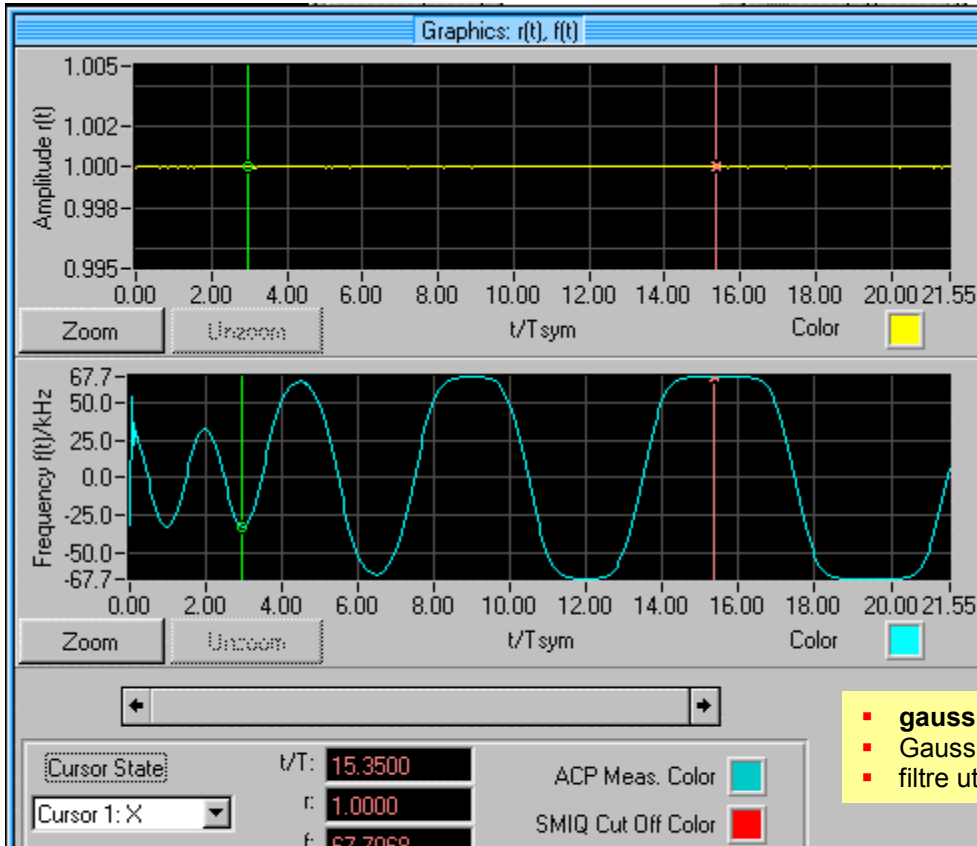


Conclusion : les courbes de $\phi(t)$, $i(t)$ et $q(t)$ obtenues par simulations sont en accord avec les courbes prévues.

IV) Le filtrage du signal binaire :

7) Toujours pour la même séquence binaire et le même type de modulation (2FSK avec $m = 0,5$), relever les variations de $r(t)$ et $f(t)$ pour les filtres passe-bas suivants (Filter Function dans la fenêtre Modulation) :





- gaussien coupant à $B = 81,2$ kHz
- Gauss, $B.T_{bit} = 0,3$
- filtre utilisé dans le standard GSM



- 5^{ème} ordre coupant aussi à $B = 81,2$ kHz
- Butterworth 5rd order
- Cutoff freq/ $f_{sym} = 0,3$)

8) Parmi ces différents filtres, lequel respecte le mieux l'excursion en fréquence souhaitée de $\Delta f = \pm 67,7$ kHz ? Lequel respecte le mieux la forme du signal binaire ?

- le filtre de Butterworth coupant à 81,2 kHz est inutilisable car il ne respecte pas la forme du signal binaire initial. La reconnaissance des "1" et des "0" au niveau du récepteur sera donc difficile, voire impossible.
- les trois autres filtres respectent bien la forme du signal.
- les filtres gaussien et en cosinus donnent une excursion en accord avec celle qui est souhaitée

9) Sur les feuilles réponses 2 et 3, observer les réponses en fréquences des filtres gaussien et en cosinus et déterminer les résultats demandés.

Filtre passe-bas gaussien

Pour le GSM, l'expression précédente devient :
$$H(f) = \exp\left[-\left(\frac{f_{\text{kHz}}}{138}\right)^2\right]$$

Pour le débit $D = 270,8333$ kHz :

- le module calculé de la transmittance à la fréquence $f = 81,2$ kHz vaut : $H_1 = 0,707 = -3$ dB
- la fréquence de coupure calculée de ce filtre vaut : $f_c = 81,2$ kHz
- la fréquence de coupure mesurée pour $BT = 0,3$ vaut : $f'_c/D = 0,3$ soit $f'_c = 81$ kHz
- la fréquence de coupure mesurée pour $BT = 0,5$ vaut : $f''_c = 135$ kHz
- pour $BT = 0,3$ le module à une fréquence double de la coupure vaut : $H_2 = -12$ dB = 0,25

Filtre passe-bas en cosinus

Pour la valeur $\alpha = 0,5$ couramment utilisée dans les systèmes de communication numérique (autres que le GSM, DECT ...), la transmittance devient :

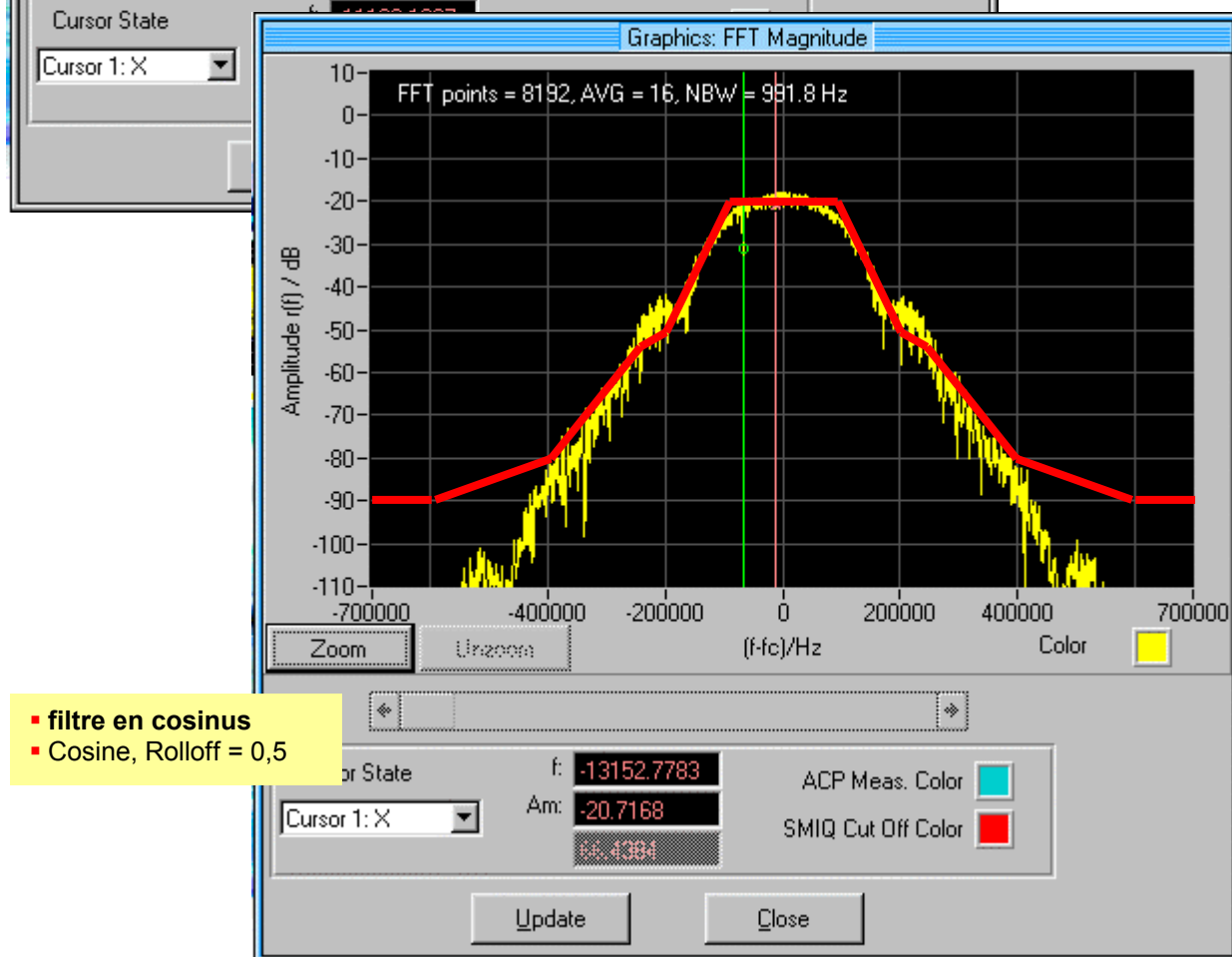
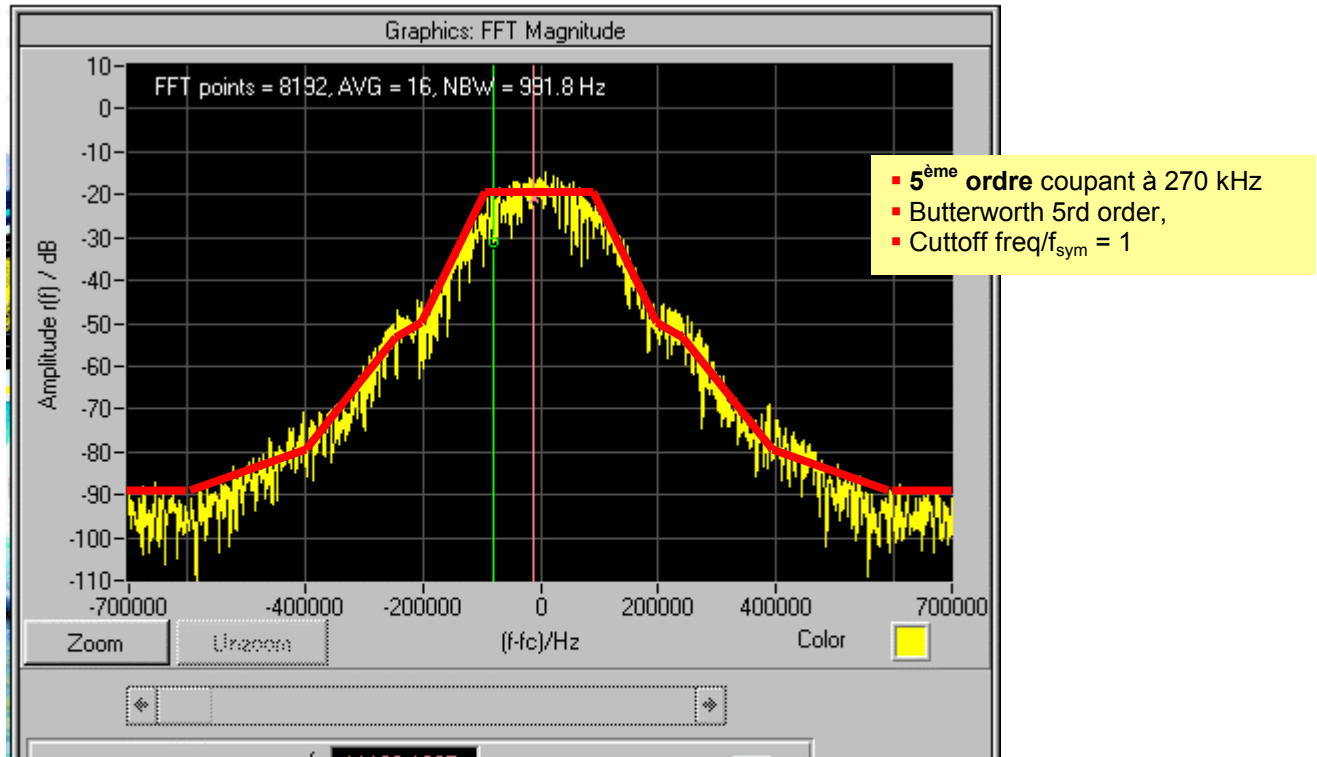
- $H(f) = 1$ si $f < 67,7$ kHz
- $H(f) = 0,5 \left[1 + \cos \frac{2\pi}{D} (f - 0,25D) \right]$ si $67,7$ kHz $< f < 135,4$ kHz
- $H(f) = 0$ si $f > 135,4$ kHz

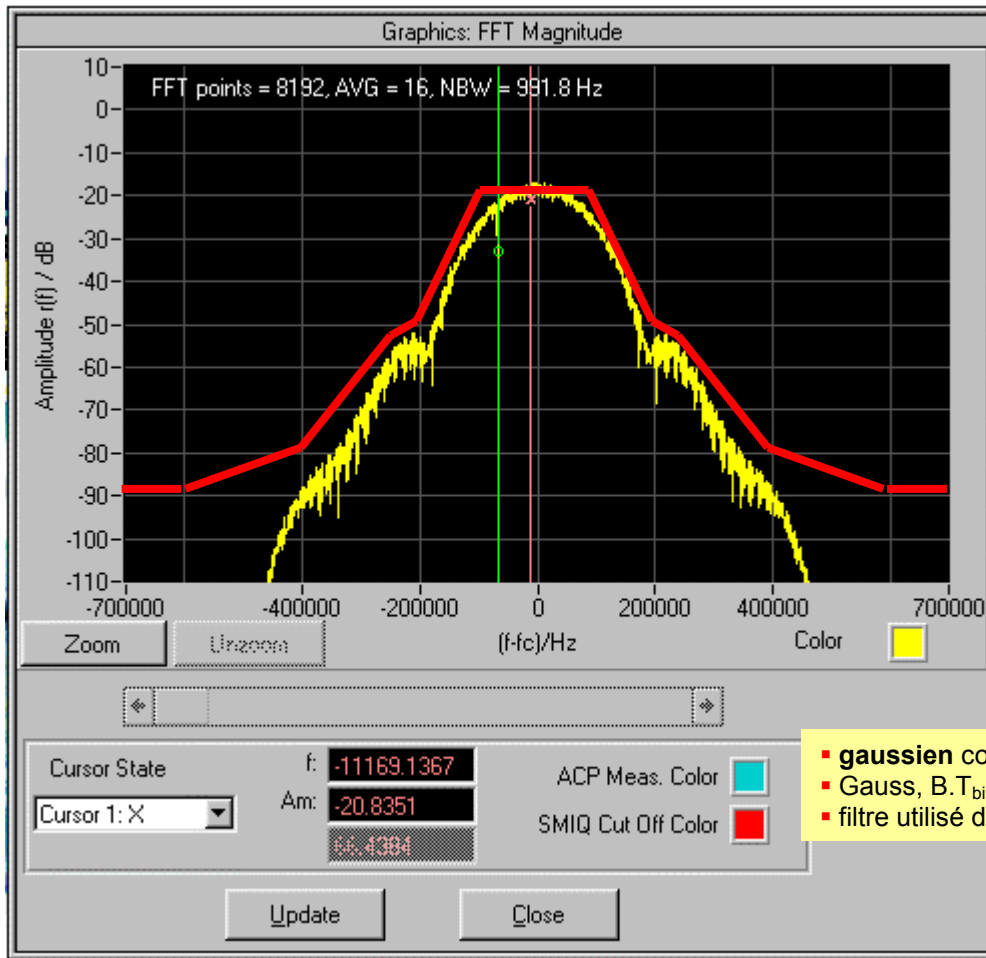
Pour le débit $D = 270,8333$ kHz du GSM :

- la fréquence de coupure calculée de ce filtre vaut : $f_c = 117$ kHz
- la fréquence de coupure mesurée vaut f : $f'_c/D = 0,42$ soit $f'_c = 114$ kHz
- le module à une fréquence double de la coupure vaut : $H_2 = 0$ (car $f > 135,4$ kHz)

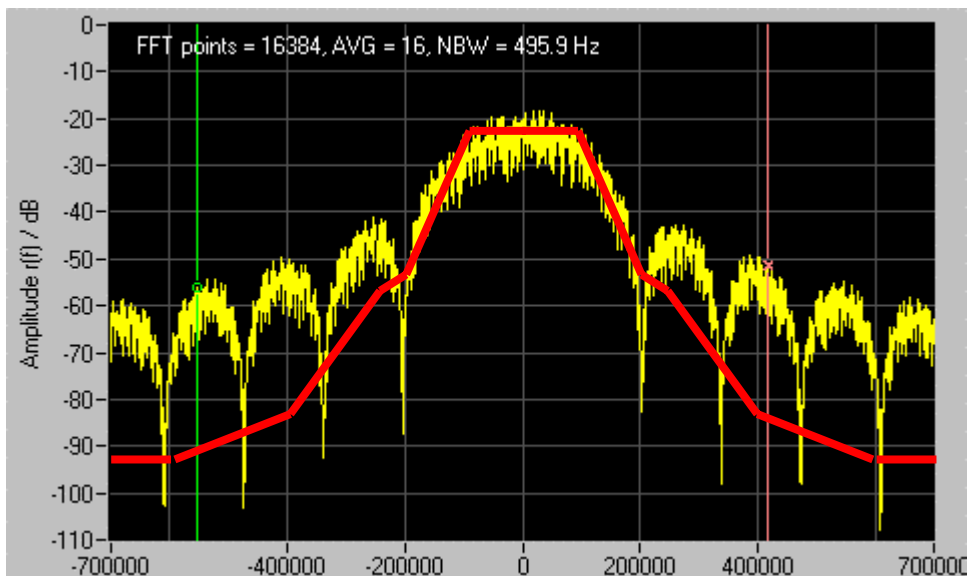
V) Spectre de la porteuse modulée :

10) Tracer le spectre de la porteuse modulée pour les 3 filtres passe-bas suivants :



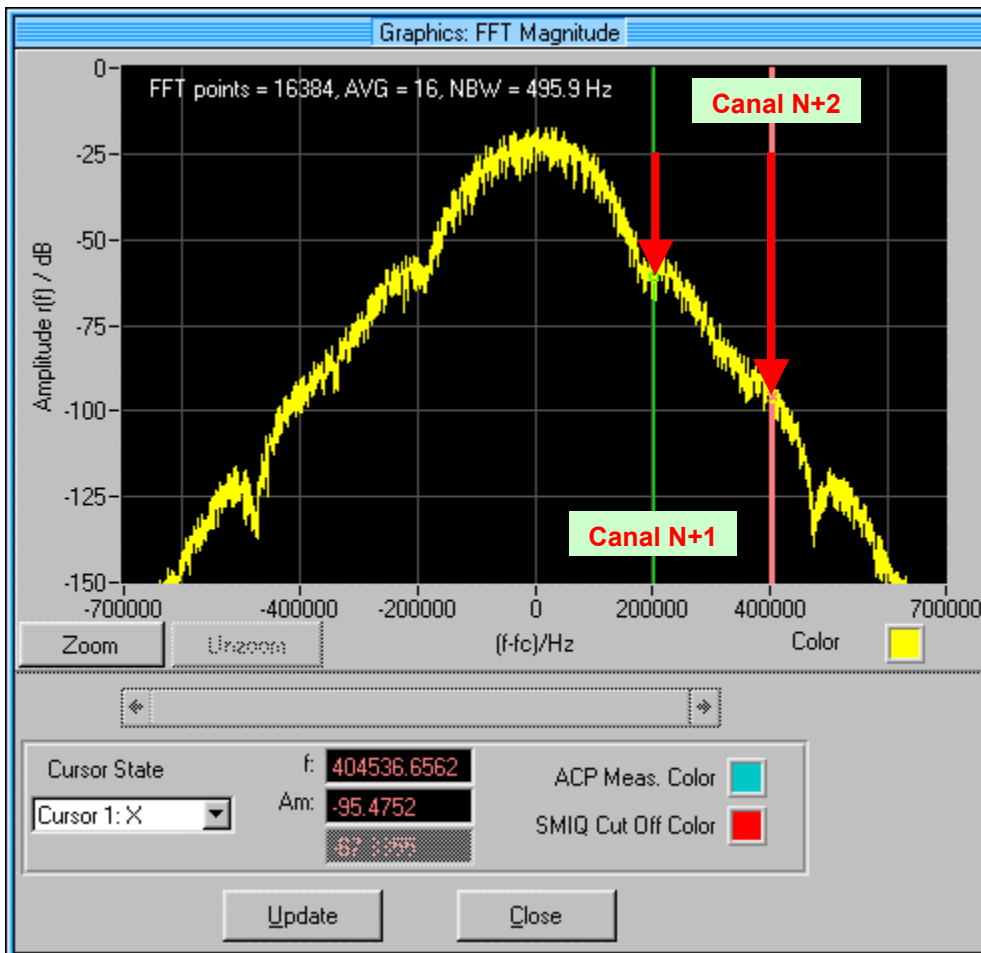


11) Pour se persuader de l'importance du filtrage passe-bas du signal numérique avant modulation, tracer le spectre du signal modulé sans aucun filtrage préalable et conclure quant à l'intérêt du filtrage.



En l'absence de filtrage du signal binaire, on voit bien que l'encombrement spectral est plus important et que les lobes secondaires du spectre sortent largement du gabarit

12) Dans le standard GSM, un canal a une largeur de 200 kHz. L'émission d'un mobile tient-elle dans un canal ? Si un mobile émet une puissance $P_0 = 5$ dBm dans le canal N, quelle sera le niveau du signal parasite au centre du canal N+1 ? du canal N+2 ?



Les niveaux du spectre d'une émission dans le canal N sont :

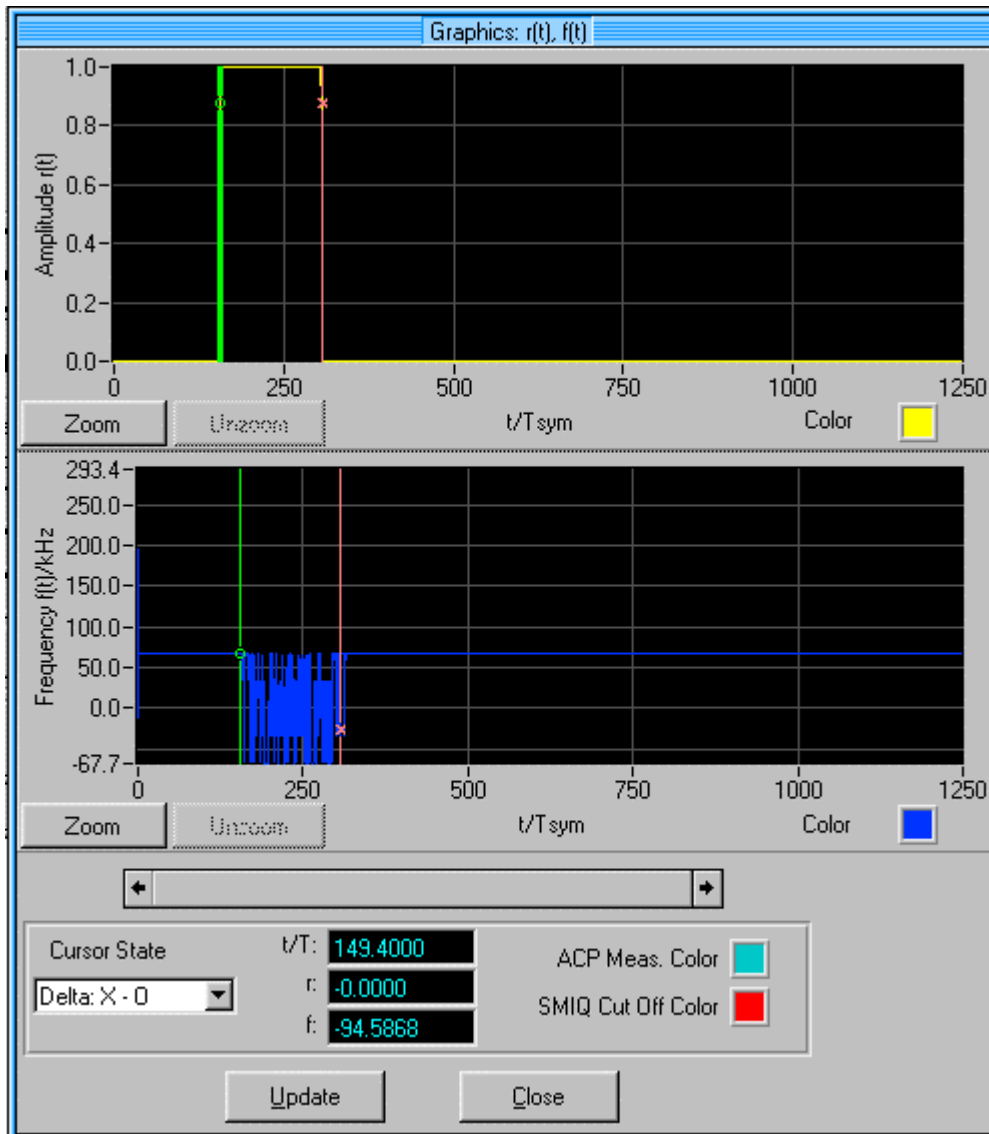
- dans le canal N+1, 15 dB en dessous, soit $P_{N+1} = P_0 - 15 = -10$ dB
- dans le canal N+2, 28 dB en dessous, soit $P_{N+2} = P_0 - 28 = -23$ dB

Remarque : en pratique, le nombre de canaux utilisés dans une cellule est toujours inférieur à 10.

Les fréquences utilisées à l'intérieur d'une cellule ne correspondent jamais à des canaux adjacents, pour éviter justement les perturbations d'un canal à l'autre.

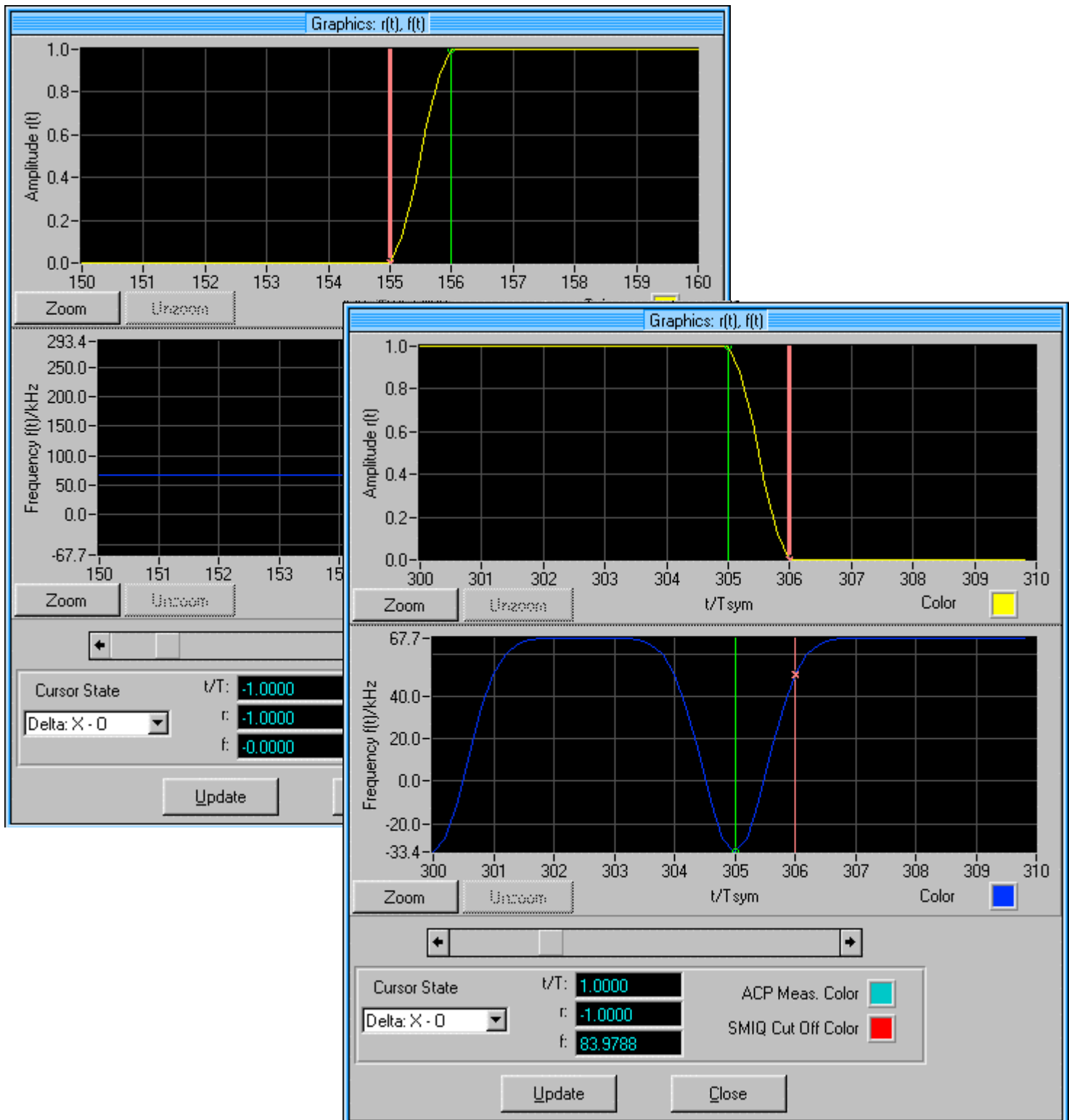
VI) Le multiplexage temporel :

13) Visualiser l'allure de l'amplitude $r(t)$ et la fréquence $f(t)$ durant une trame (t/T_{sym} allant de 0 à 1250). Dans quel time-slot (ils sont numérotés de 0 à 7) l'émission a-t-elle lieu pour cette séquence binaire ?



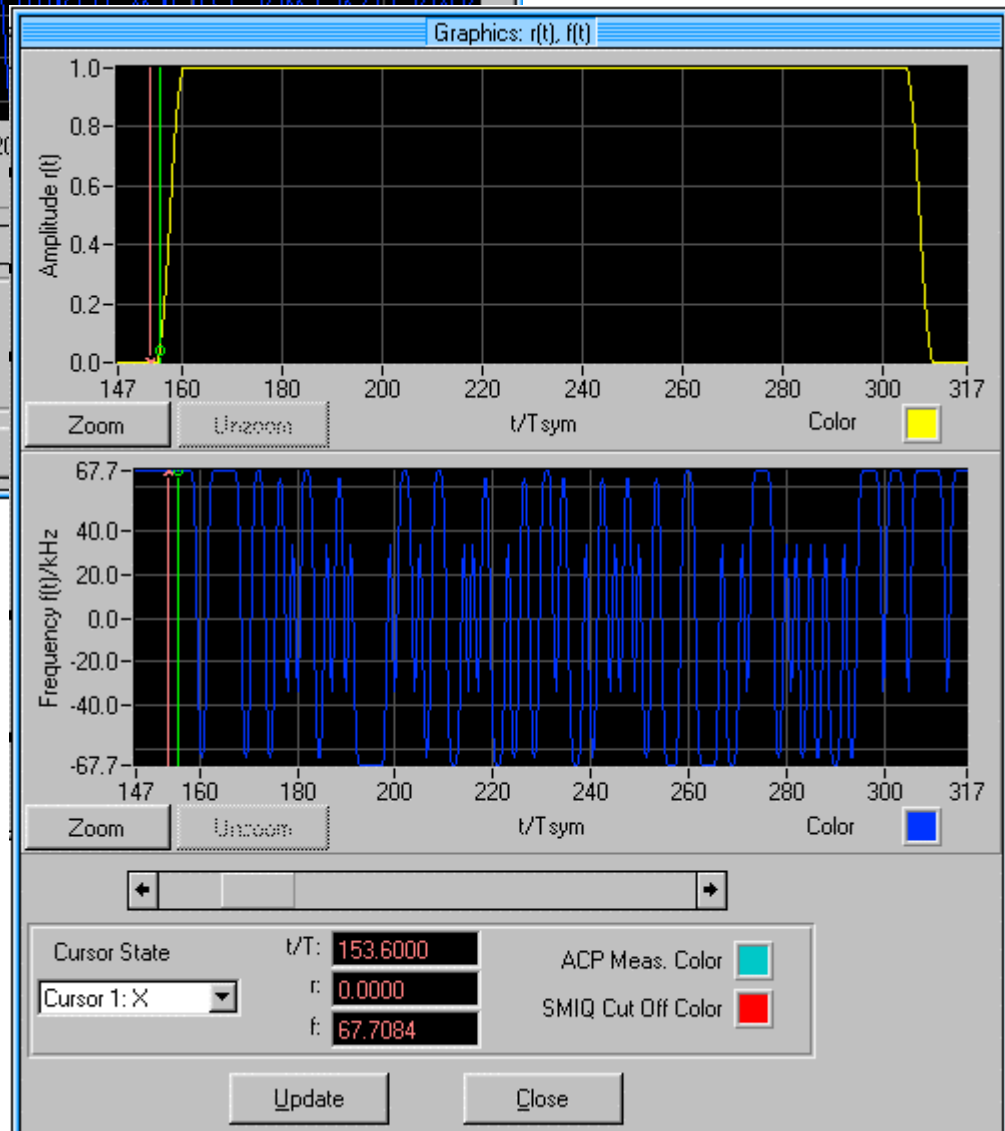
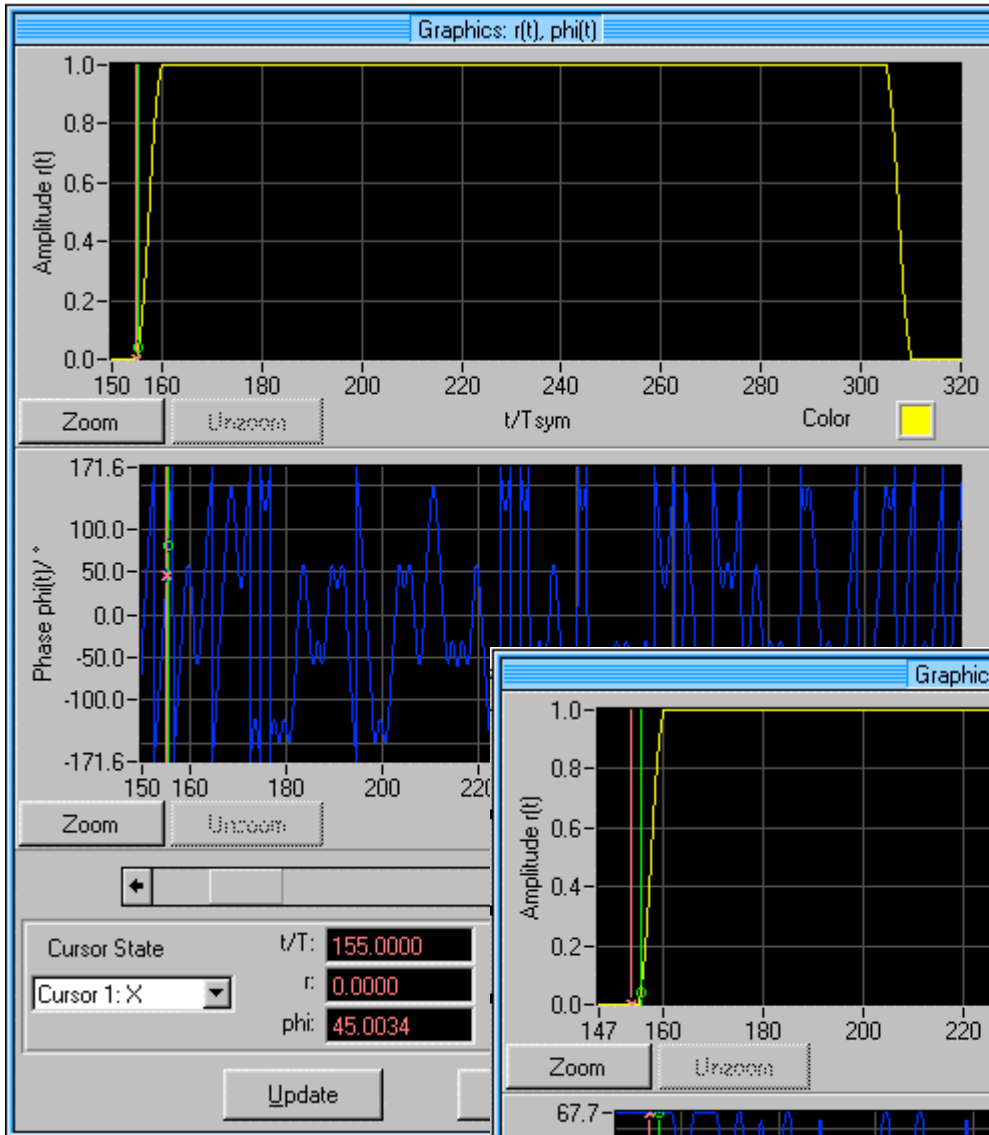
- l'émission du mobile démarre à l'instant $156.T_{\text{bit}}$, s'arrête à l'instant $305.T_{\text{bit}}$ et dure donc environ $149.T_{\text{bit}}$.
- les 1250 bits correspondent à une trame, soit environ 4,6 ms
- cette trame est divisée en 8 intervalles de temps ou time-slots
- ce signal correspond donc à une émission dans le time-slot 1

14) Visualiser l'allure de $r(t)$ en zoomant sur la montée en puissance de l'émission (t/T_{sym} allant de 150 à 160) et mesurer l'instant t_1 où le niveau nominal d'émission est atteint. De la même façon, mesurer l'instant t_2 où le niveau d'émission commence à décroître. La durée $t_2 - t_1$ est elle suffisante pour transmettre les 148 bits utiles ?



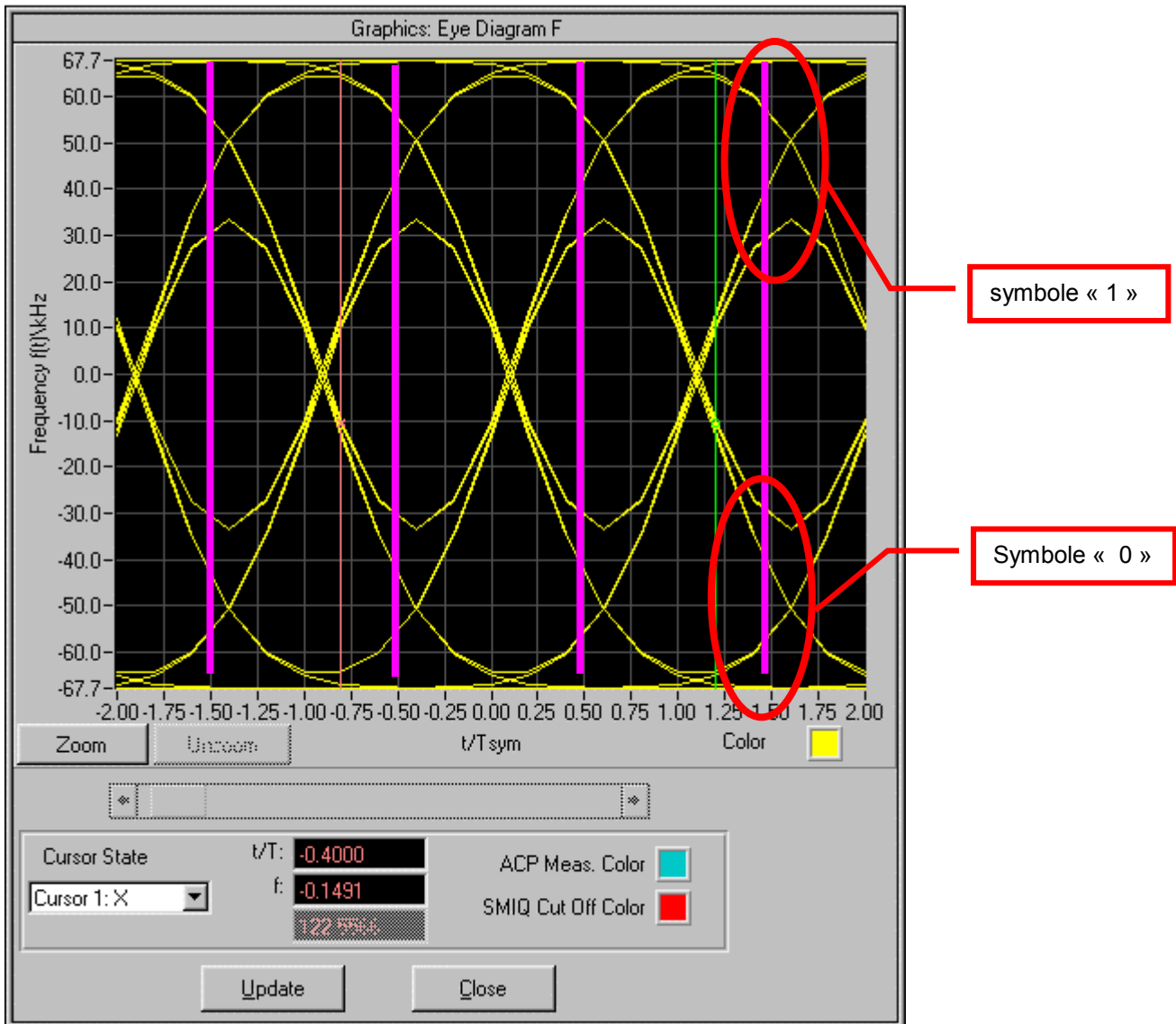
- $t_1 = 156.T_{\text{bit}}$ $t_2 = 305.T_{\text{bit}}$ $t_2 - t_1 = 149.T_{\text{bit}}$
- suffisant pour transmettre les 148 bits utiles
- la montée et la descente en puissance se font dans une durée égale à T_{bit}

15) Pour la durée du time-slot (t/T_{sym} allant de 150 à 320), visualiser d'abord les signaux $r(t)$ et $\varphi(t)$, puis les signaux $r(t)$ et $f(t)$. Vérifier les caractéristiques de l'amplitude $r(t)$ et de la fréquence $f(t)$ correspondent à ce qui est attendu.



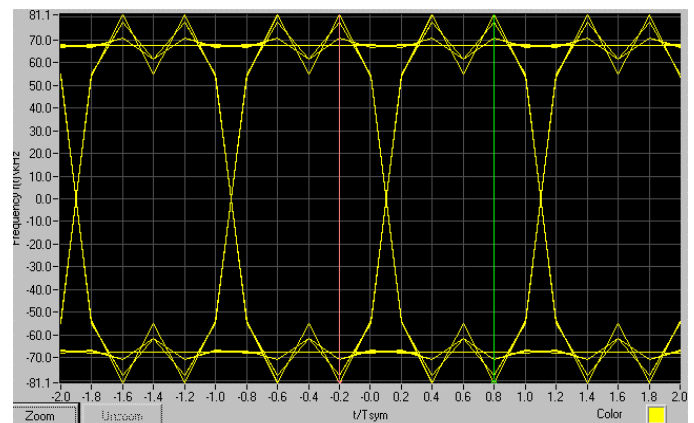
On retrouve l'excursion en fréquence attendue de $\pm 67,7$ kHz

16) On supprime maintenant le début et la fin du time-slot (t/T_{sym} allant de 160 à 300) et on visualise le diagramme de l'oeil courbe obtenu en superposant les variations de $f(t)$ sur 4 symboles. Faire apparaître sur le tracé les instants de décision (au milieu du symbole). Le récepteur pourra-t-il facilement reconnaître un "1" d'un "0" ?



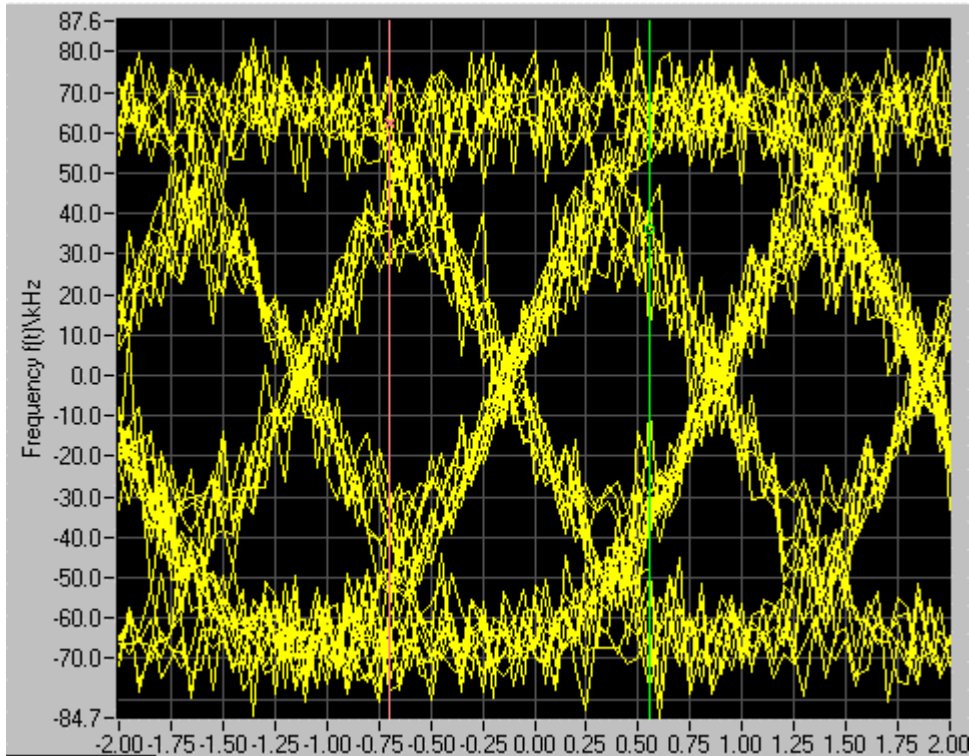
Le diagramme de l'oeil de $f(t)$ montre que :

- aux instants de décision on reconnaît bien un niveau "1" d'un niveau "0"
- on dit que "l'oeil est bien ouvert"
- la reconnaissance d'un symbole est moins nette qu'en l'absence de filtre (voir ci-contre)
- mais le spectre est beaucoup moins encombrant qu'en l'absence de filtre

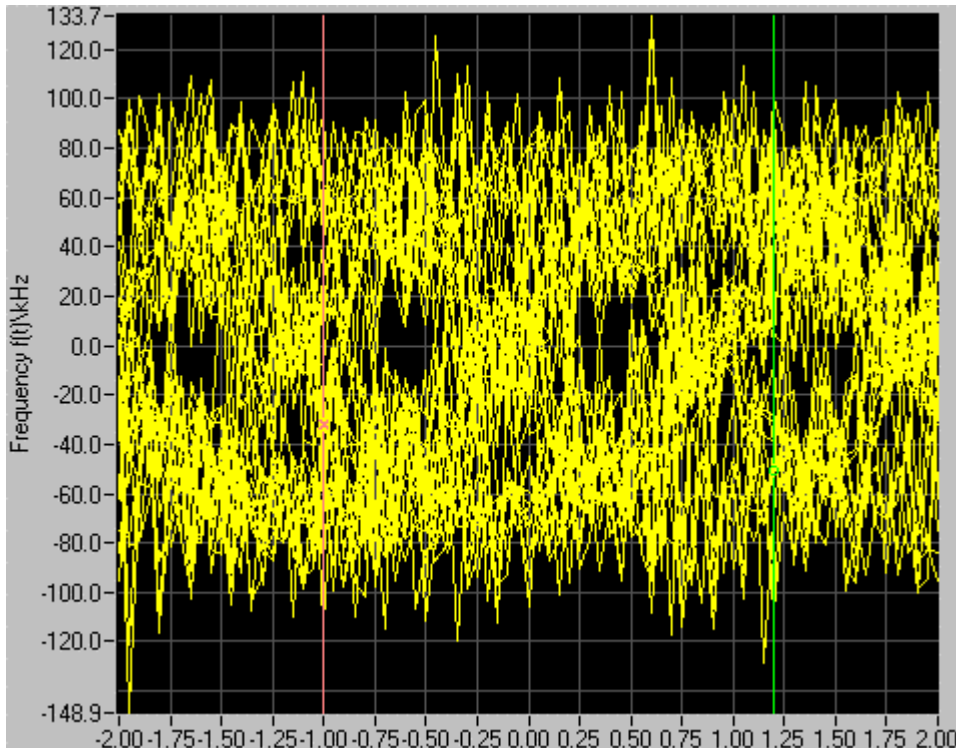


17) Même question après avoir rajouté du bruit (case **Noise**) lors de la transmission :

- avec un rapport porteuse/bruit $E_b/N_0 = 55$ dB et un bruit dans toute la bande (Bandwith = full)



- avec un rapport porteuse/bruit $E_b/N_0 = 45$ dB et un bruit dans toute la bande (Bandwith = full)

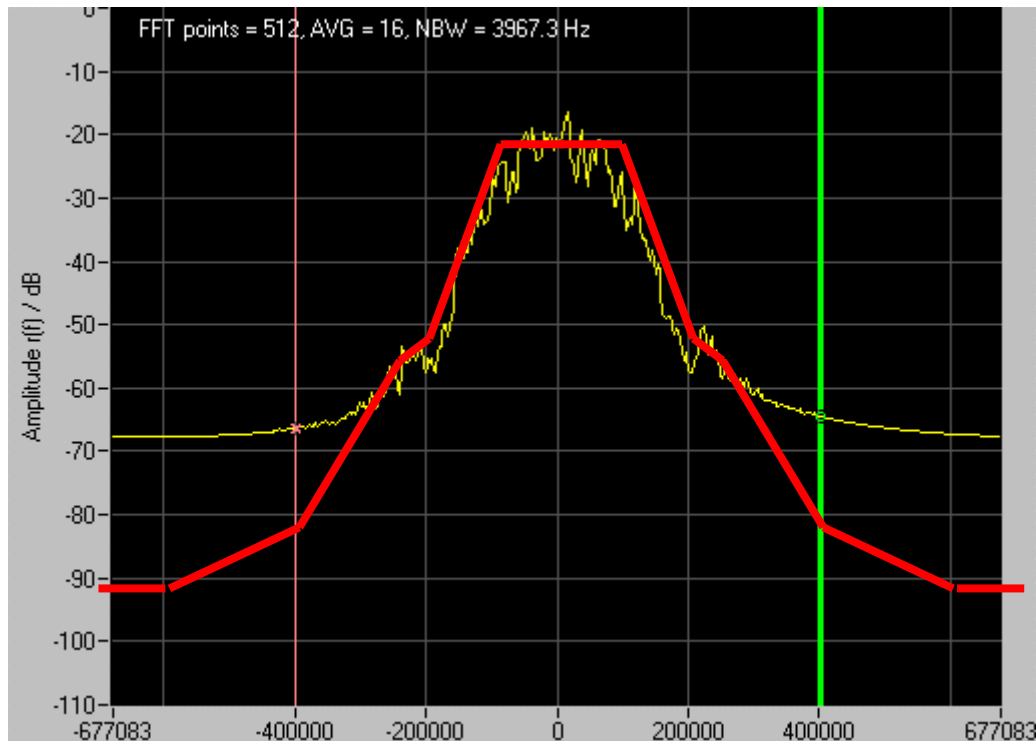


Si le rapport S/B à la réception diminue, la reconnaissance des symboles devient de plus en plus difficile.

VII) La commande de puissance :

18) Vérifier l'allure de $r(t)$ en zoomant sur la montée en puissance de l'émission (t/T_{sym} allant de 150 à 160) et relever les spectres dans les cas suivants :

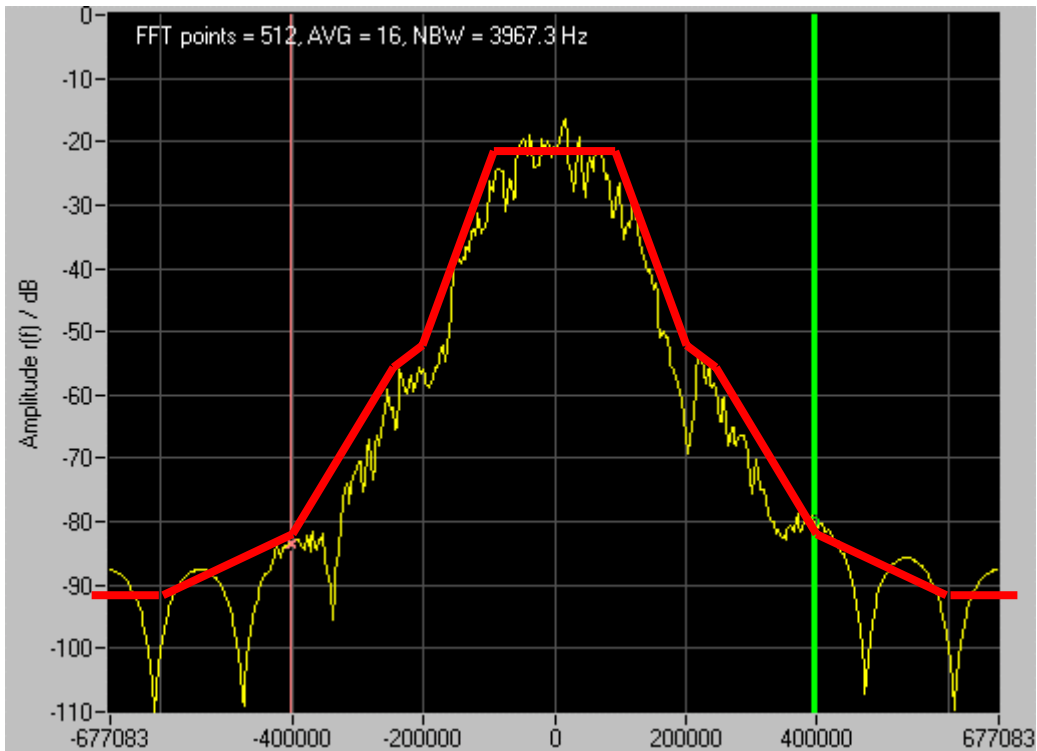
- montée linéaire : **Ramp function = linear**, de durée **Ramp time = 0,2**



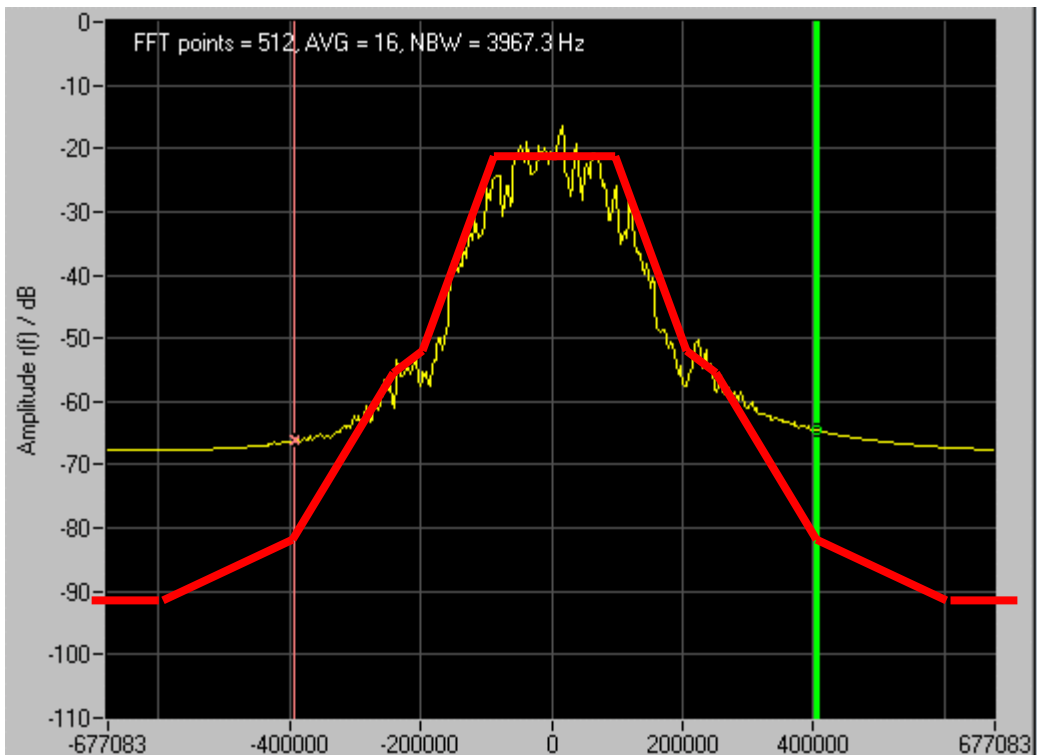
- montée linéaire : **Ramp function = linear**, de durée **Ramp time = 1**



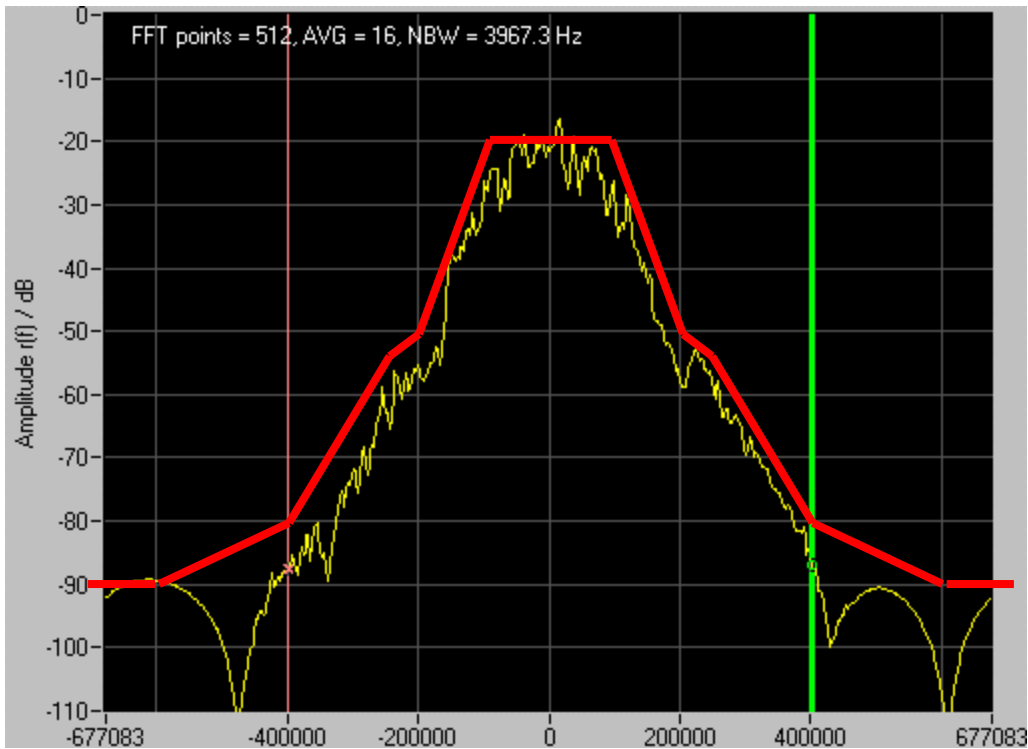
- montée linéaire : **Ramp function = linear**, de durée **Ramp time = 2**



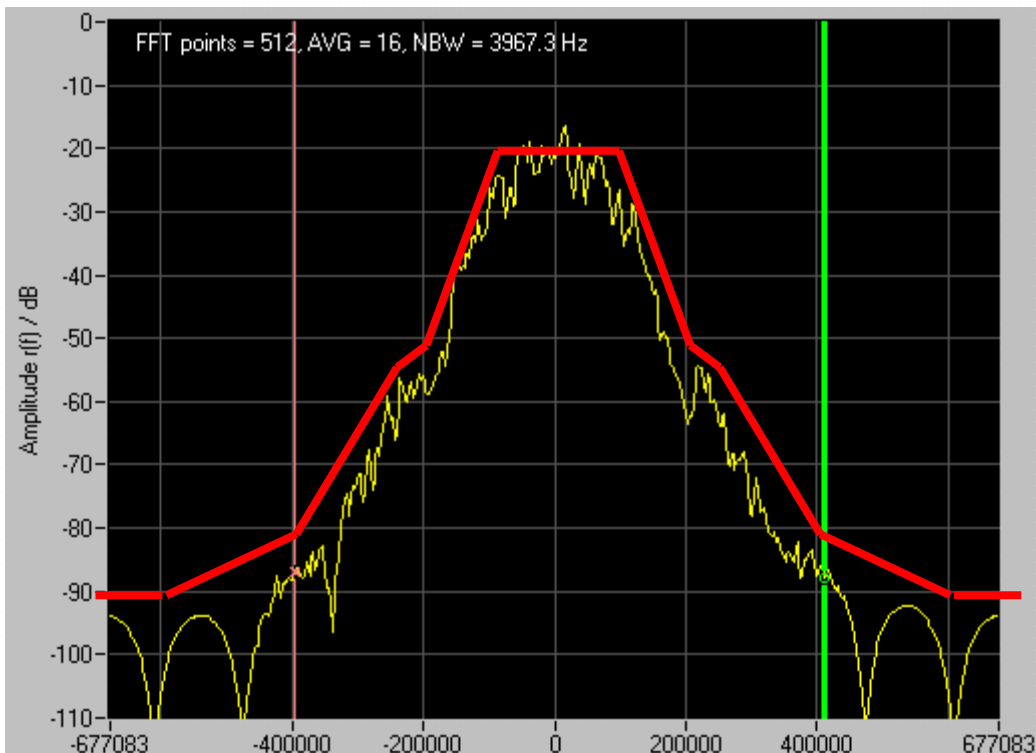
- montée en \cos^2 : **Ramp function = \cos^2** , de durées **Ramp time = 0,2**, **Ramp time = 1** et **Ramp time = 2**



- montée en \cos^2 : **Ramp function = \cos^2** , de durée **Ramp time = 1**



- montée en \cos^2 : **Ramp function = \cos^2** , de durée **Ramp time = 2**



On constate qu'un profil en \cos^2 permet de monter et descendre en puissance très rapidement (avec une durée aussi courte que T_{bit}) sans trop élargir le spectre qui reste dans le gabarit.

C'est cette solution qui est mise en oeuvre dans le GSM et dans d'autres systèmes de communications numériques utilisant la technique du multiplexage temporel (TDMA : time division multiple access).

VII) Conclusion :

19) Conclure quant aux résultats mis en évidence par cette simulation en remplissant la feuille réponse 4

N°	Réponses justes	Commentaires
1	b, f, g, h	a) le GSM utilise la modulation de fréquence, évidemment ! c) à cause du filtrage passe-bas, la fréquence varie aussi continûment d) le filtrage gaussien est là pour diminuer l'encombrement spectral, pas pour améliorer la qualité e) le spectre déborde largement du canal i) c'est un peu plus compliqué ! la porteuse s'écrit : $e(t) = i(t).\cos(\omega_0 t) + q(t).\cos(\omega_0 t + \pi/2)$
2	a, d, e	b) le spectre doit être maîtrisé pour éviter de perturber les canaux voisins c) la montée est une courbe arrondie en \cos^2 et pas une droite f) l'excursion de ± 75 kHz utilisée en FM est qualifiée de moyenne
3	c, e	a) le mobile émet durant 1 time-slot, soit pendant $1/8 = 0,125^{\text{ème}}$ du temps ou 12,5 % b) dans la trame, il y a 1 time-slot d'émission, mais aussi 1 de réception et 1 de mesure de puissance des balises des cellules voisines (pour un éventuel changement de cellule si l'utilisateur du mobile se déplace). Le mobile n'est donc pas inactif entre deux phases d'émission. d) si le profil de montée en puissance est fixé par le mobile, le niveau de puissance est fixé par la station de base qui commande la puissance d'émission du mobile pour que le taux d'erreurs reste acceptable