

Module :

le téléphone GSM



► Diaporamas : GSM-le réseau et GSM-le mobile

► Itinéraire pédagogique

► Résumé de cours

- 1- Structure cellulaire du réseau GSM
 - 2- Le canal de transmission
 - 3- La voie balise et la voie de trafic
 - 4- Le signal radiofréquence
 - 5- Les données échangées
 - 6- Structure simplifiée du mobile
 - 7- Les circuits d'émission
 - 8- Les circuits de réception
- Annexe 1 : schéma fonctionnel d'un mobile
Annexe 2 : structure d'une salve

► Exercices

► Corrigés des exercices

► Questionnaire : le téléphone GSM

► Réponses au questionnaire

Itinéraire pédagogique : le téléphone GSM



► Diaporamas :

diapos	contenu
1-8	Réseau GSM : structure du réseau
9-15	Réseau GSM : le multiplexage temporel
16-24	Réseau GSM les évolutions
1-17	GSM-mobile : le mobile en émission
18-24	GSM-mobile : le mobile en réception

► Fondamentaux :

Le système de téléphonie GSM est un système sans fil basé sur un découpage du territoire en cellules :

- dans une cellule, un mobile communique avec la station de base sur un des canaux disponibles **(1)**
- la puissance d'émission du mobile s'adapte à la situation pour assurer une qualité correcte **(2)**

Pour la transmission, la voix est digitalisée et subit une compression de débit, puis les données binaires sont filtrées **(3)** pour limiter l'encombrement spectral **(4)**.

Le mobile est alternativement en émission et en réception, les données sont émises par salves ce qui peut élargir le spectre si on ne veille pas au profil de puissance **(5)**.

La modulation utilisée est une modulation de fréquence obtenue à l'aide d'un modulateur IQ **(6)**.

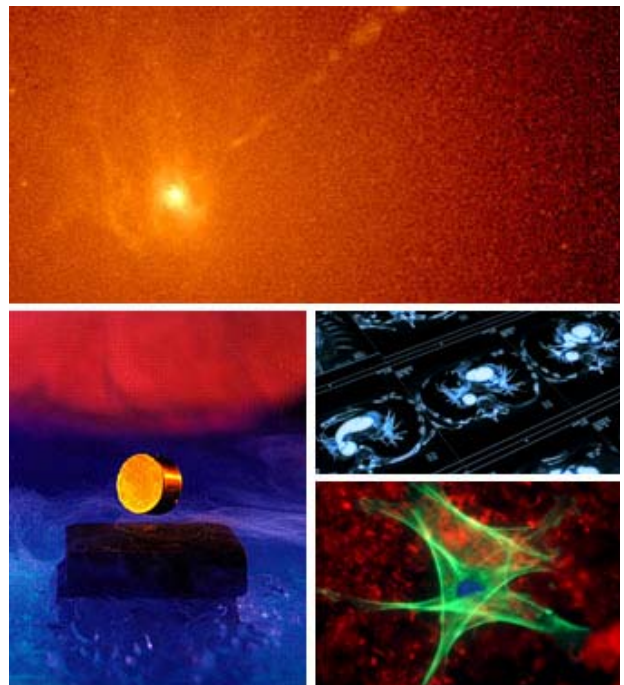
► Exercices :

- | | |
|------------------------------|---------------------------------|
| 1- les fréquences de travail | 4- spectre lié à la modulation |
| 2- la puissance émise | 5- spectre lié à la commutation |
| 3- le filtre gaussien | 6- le modulateur IQ du GSM |

► Questionnaire :

De nombreuses applications simples pour tester vos connaissances dans le domaine.

Résumé de cours



jean-philippe muller

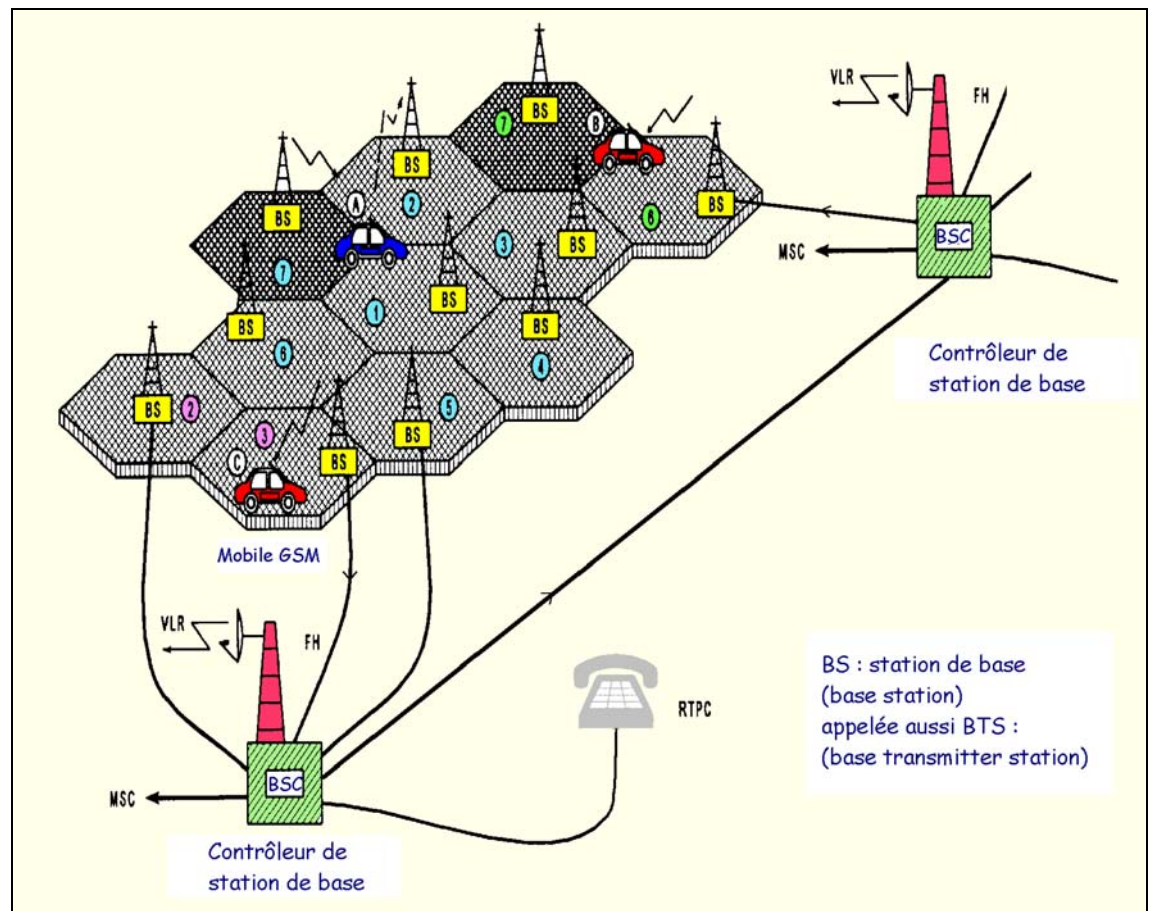
1- Structure cellulaire du réseau GSM

Le système de téléphonie GSM est un système sans fil basé sur un découpage du territoire en cellules dont la taille varie entre 100 m et 35 km.

Chaque cellule est équipée d'une **station de base** fixe munie de ses antennes installées sur un point haut (château d'eau, clocher d'église, immeuble ...).

Le fonctionnement du réseau GSM obéit à quelques règles simples :

- l'utilisateur est toujours identifié par la transmission de son numéro d'abonné **IMSI** *
- le mobile peut être identifié par transmission du numéro d'équipement **IMEI** **
- lorsqu'on appelle un mobile, seule la station de base concernée émet le signal d'appel
- la communication se fait toujours avec la station de base de sa cellule, jamais de GSM à GSM
- si on se déplace en téléphonant, il est nécessaire de changer de BS tout en maintenant la communication : c'est le **transfert intercellulaire** ou **handover**



Un contrôleur de stations de base **BSC** (Base Station Controller) gère entre 20 et 30 BTS et possède son registre d'abonnés visiteurs **VLR** stockant les informations de l'abonné liées à sa mobilité.

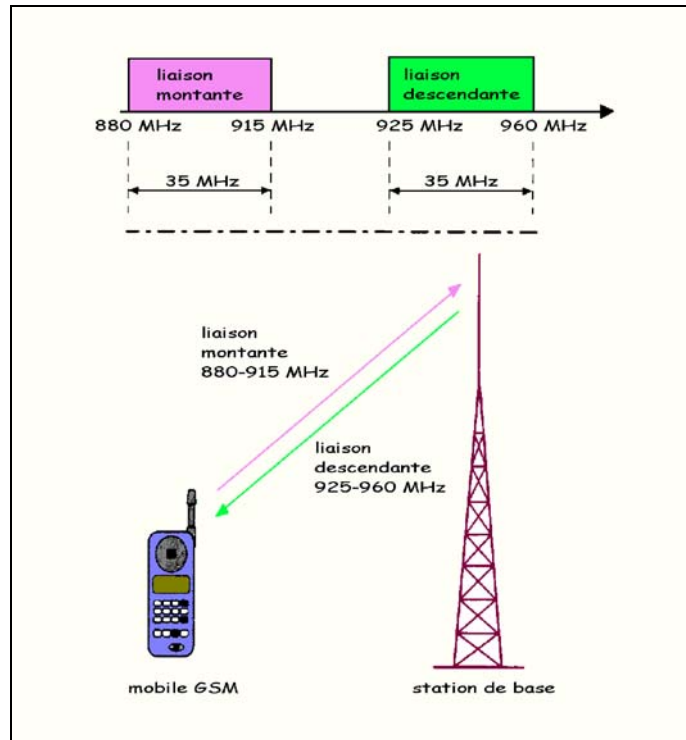
* le **numéro IMSI** (International Mobile Subscriber Identity) se trouve dans la carte **SIM** (Subscriber Identity Module). L'opérateur a tous les numéros IMSI de ses abonnés dans une base de données appelée **HLR** (Home Local Register). Chaque cellule a son registre de « visiteurs » **VLR**.

** le **numéro d'équipement IMEI** (International Mobile Equipment Identity) est mis dans la mémoire du mobile lors de sa fabrication

2- Le canal de transmission

Les échanges entre le mobile et la station de base se font sur deux fréquences distinctes appelées fréquence montante (du mobile vers la base) et descendante (de la base vers le mobile), séparées par un intervalle appelé écart duplex.

Deux bandes de fréquences sont utilisées : la bande GSM (largeur 25 MHz, parfois étendue à 35 MHz) et la bande DCS (largeur 75 MHz).



- bande GSM** (EGSM étendue)

montante : 890 (880) à 915 MHz
 descendante : 935 (925) à 960 MHz
 écart duplex 45 MHz
 124 (174) canaux de 200 kHz

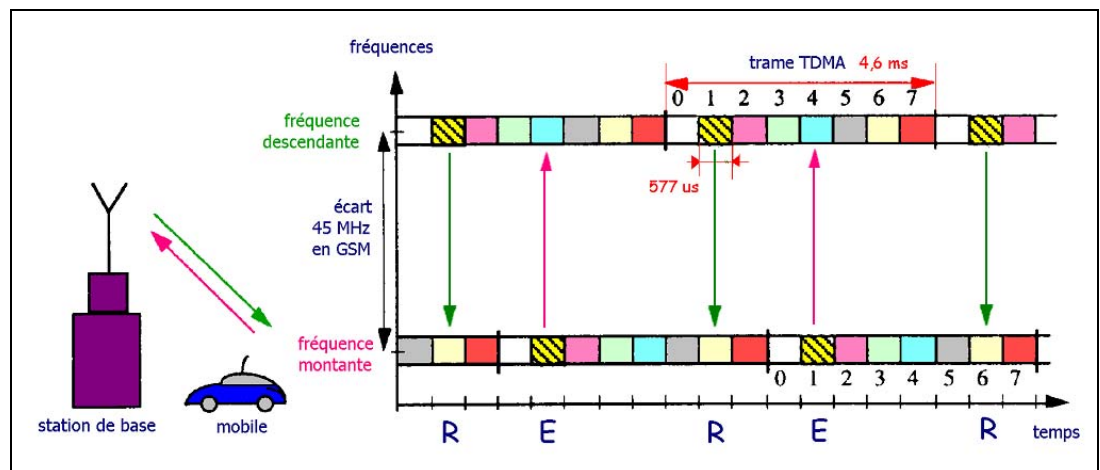
- bande DCS**

montante : 1710 à 1785 MHz
 descendante : 1805 à 1880 MHz
 écart duplex 95 MHz
 374 canaux de 200 kHz

Exemple :

voie descendante 937 MHz
 voie montante $937 - 45 = 892$ MHz

Un mobile n'ayant pas besoin de ces fréquences en permanence, il la partage avec 7 autres mobiles selon une technique appelée TDMA (Time Division Multiple Access).



Le mobile en communication utilise 1 time-slot (durée 577 µs) sur les 8 qui constituent une trame TDMA (durée 4,6 ms).

Le mobile reçoit le signal émis par la base sur la fréquence descendante durant un time slot soit 577 µs, puis 3 time-slots plus tard, émet son signal vers la station de base sur la fréquence montante.

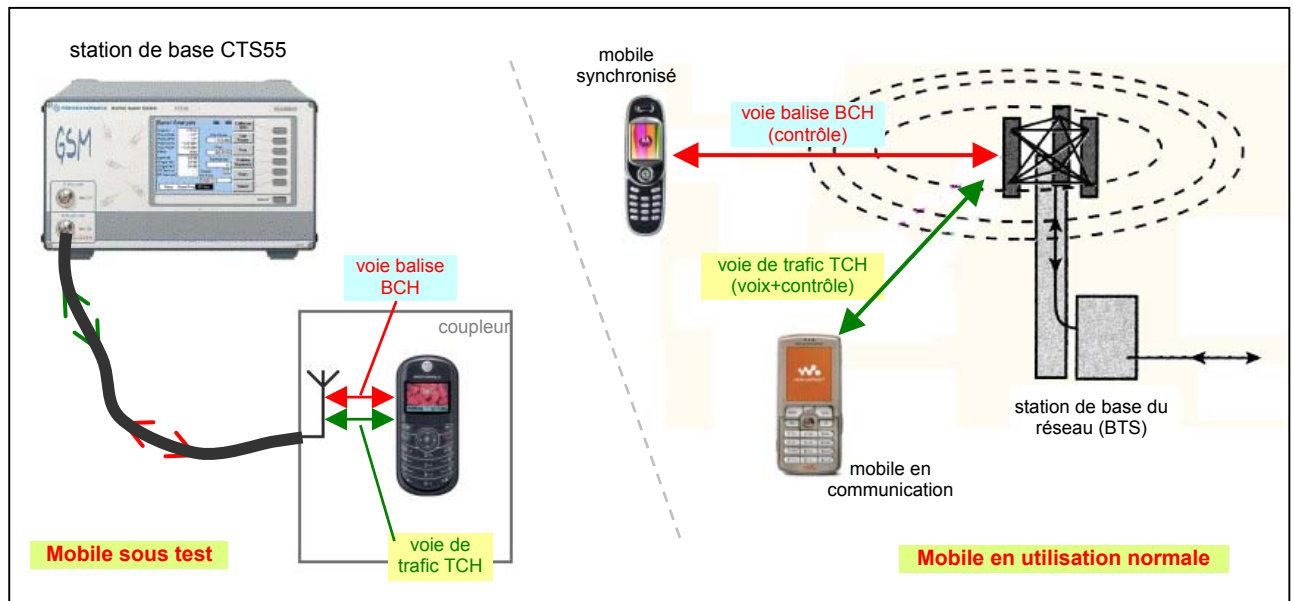
Conclusion : un canal GSM est donc constitué d'un couple de fréquences (montante et descendante) et d'un numéro de time-slot (entre 0 et 7).

3- La voie balise et la voie de trafic

Chaque BTS est équipée pour travailler sur un certain nombre de canaux, en général 5 ou 6, qui sont autant de paires de fréquences émission-réception :

- un canal est affecté à un rôle particulier : la voie balise. Sur ce canal appelé aussi **BCH** (Broadcast Channel) , la station de base émet en permanence, avec une puissance fixe, des données de service.
- les autres canaux sont affectés aux communications

Lors d'un test de mobile, le testeur assurera les même fonctions qu'une station de base.



⇒ à sa mise en route, le mobile scrute la bande GSM/DCS de son opérateur. Il reconnaît la balise de sa cellule (signal le plus fort) pour s'y raccorder, être identifié par l'opérateur et se synchroniser

⇒ hors communication téléphonique, le mobile reste relié en permanence à la base par la voie balise, on dit que **le mobile est synchronisé** (ou : en veille / attaché / avec localisation à jour) :

- le mobile échange sur cette voie des signaux de contrôle (réception/demande d'appel, qualité de la liaison...)
- toutes les 15 secondes (toutes les 5 s si le signal est faible), le récepteur mesure le niveau des balises des cellules voisines pour détecter un possible changement de cellule
- il utilise la liaison montante de la voie balise pour signaler son désir de se connecter au réseau pour une communication (RACH : random access channel).

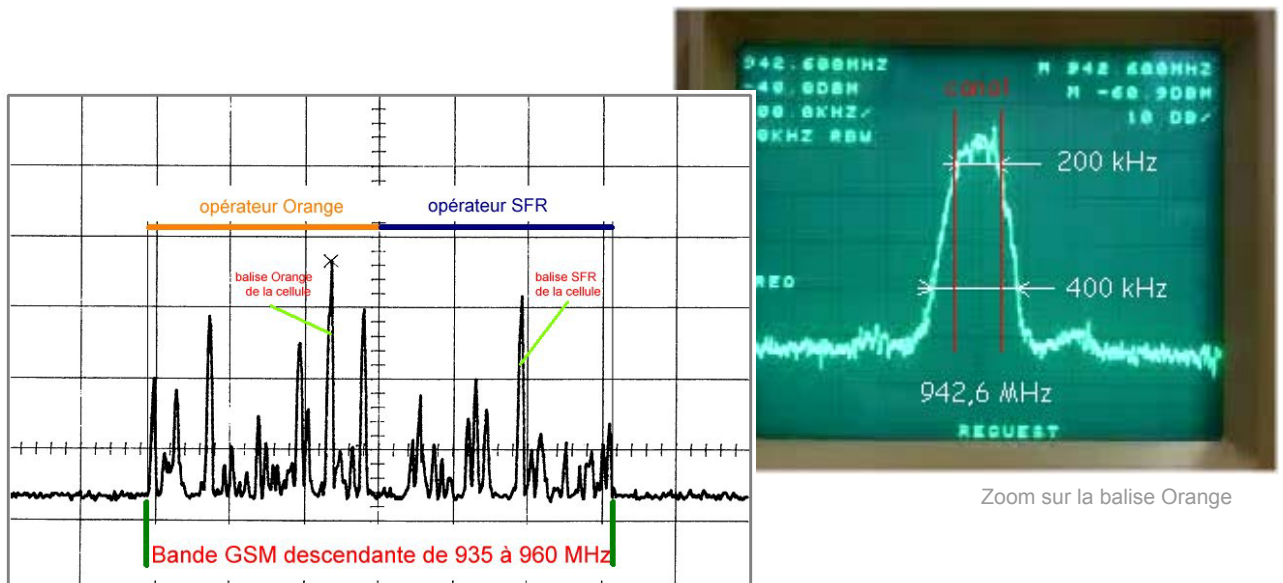
⇒ en communication, la base affecte au mobile une autre paire de fréquences que la voie balise :

- le mobile échange avec la base des signaux de parole et de contrôle sur le canal **TCH** (Traffic Channel) appelé aussi **voie de trafic**
- il continue à mesurer les balises environnantes pour détecter une variation de niveau lui indiquant un changement de cellule.

4- Le signal radiofréquence

Les bandes réservées aux liaisons descendantes sont relativement occupées puisqu'on peut y voir :

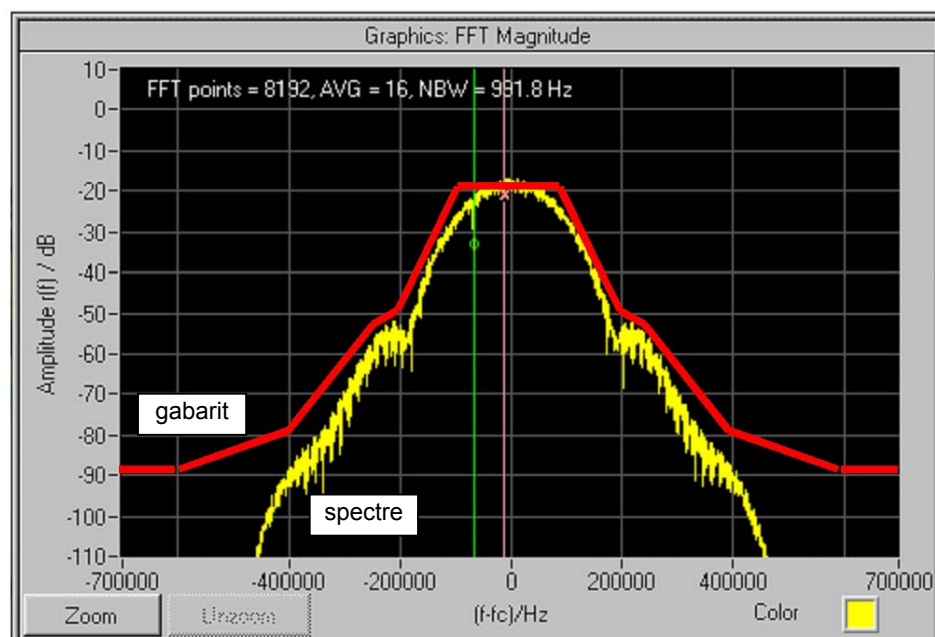
- les signaux « balise » émis en permanence par la station de base de la cellule
- les signaux « balise » émis par les stations de base des cellules adjacentes (reçus moins fort)
- les communications en cours dans la cellule (sens base-mobile)



On repère bien sur cet enregistrement les spectres des voies balises de la cellule pour les deux opérateurs qui se partagent la bande GSM sur Mulhouse.

Le signal émis par un mobile :

- a le même spectre qu'une voie balise
- est discontinu puisqu'il n'est émis que durant 577 μ s (1 time-slot sur 8)
- doit impérativement respecter le gabarit imposé par la norme GSM
















Le respect du gabarit est contrôlé pour chaque mobile GSM lors de sa fabrication, et en maintenance. Un défaut à ce niveau fera suspecter les circuits de modulation ou l'amplificateur de puissance.

5- Les données échangées

Les signaux de voix et de contrôle échangés entre le mobile et la base sont classés en plusieurs catégories, mais transitent tous sur 2 voies radio montantes et descendantes :

- la voie balise : FCCH, SCH, BCCH, PCH, RACH ...
- la voie trafic : TCH, SACCH, FACCH...

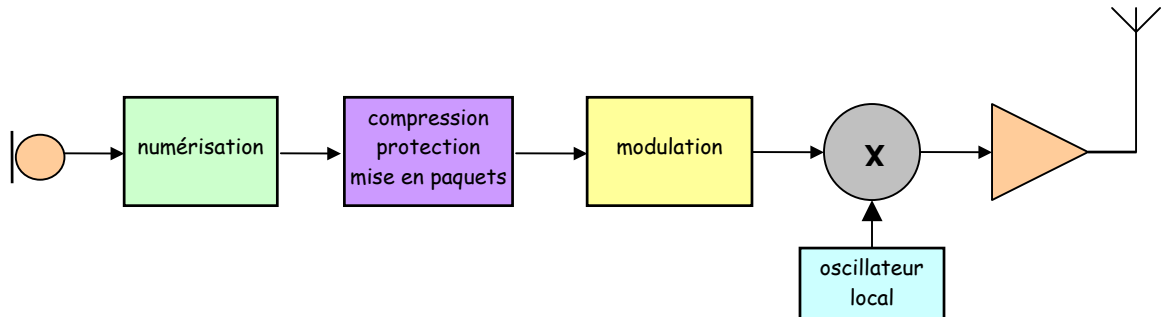
	fonction					méthode de multiplexage
Voie balise	BCH Broadcast Channel voie balise (diffusion)		FCCH	Frequency Correction Channel	Calage sur la porteuse	un burst particulier toutes les 50 ms sur le slot 0 de la voie balise.
			SCH	Synchronization Channel	Synchronisation, identification de la BTS	Un burst sur le slot 0 de la voie balise, une trame après le burst FCCH
			BCCH	Broadcast Control Channel	Informations système	4 burst "normaux" à chaque multitrame
	CCCH Common Control Channel (accès partagé)	   	PCH	Paging Cannel	Appel des mobiles	sous-blocs entrelacés sur 4 bursts "normaux".
			RACH	Random Access Channel	Accès aléatoire des mobiles	Burst court envoyé sur des slots particuliers en accès aléatoire
			AGCH	Access Grant Channel	Allocation de ressources	8 blocs entrelacés sur 4 bursts "normaux"
			CBCH	Cell Broadcast Channel	Messages courts diffusés (météo, trafic routier, etc.)	utilise certains slots de la trame à 51.C (utilisation marginale)
	Voie de trafic	Canaux de Contrôle dédiés	   	SDCCH	Stand-Alone Dedicated Control Channel	Signalisation
SACCH				Slow Associated Control Channel	<ul style="list-style-type: none">• compensation du délai de propagation• contrôle de la puissance d'émission du mobile• contrôle de la qualité de liaison• mesures sur les autres stations.	associé à TCH sur un canal physique ou à 8 SDCH sur un canal physique
FACCH				Fast Associated Control Channel	Exécution du Handover	vol du TCH lors de l'exécution du handover.
TCH Traffic Channel		   	TCH/FS TCH/HS	Traffic Channel for Coded Speech	voix plein débit/ demi débit	occupe la majeure partie d'un canal physique
				Traffic Channel for data	données utilisateur 9,6 kbit/s, 4,8 kbit/s, < 2,4 kbit/s	

Tous les trames ci-dessus n'ont pas lieu en même temps et s'articulent sur des séquences particulières orchestrées par le logiciel de la base.

6- Structure simplifiée du mobile

Emission Dans le GSM, la voix est digitalisée et traitée sous forme numérique :

- le son est capté par le microphone qui fournit un signal analogique
- il est échantillonné à 8 kHz et codé en binaire sur 13 bits par un CAN série
- le débit brut résultant est $D=8000 \times 13 = 104 \text{ kbits/s}$

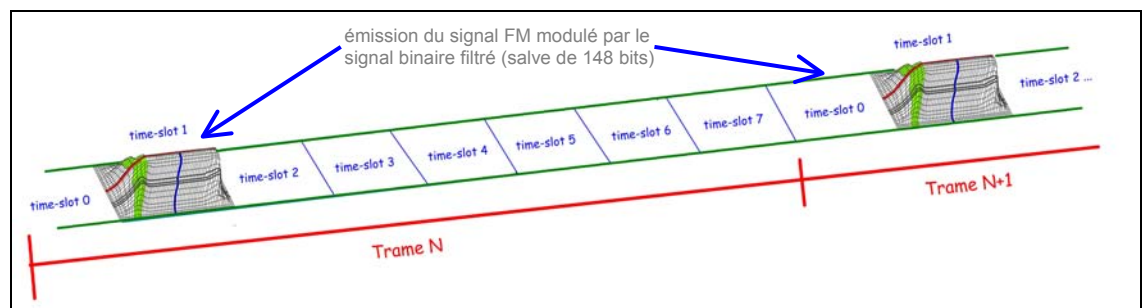


Le signal binaire a un débit trop important pour être transmis tel quel et va subir plusieurs traitements numériques effectués par un processeur de signal (DSP) :

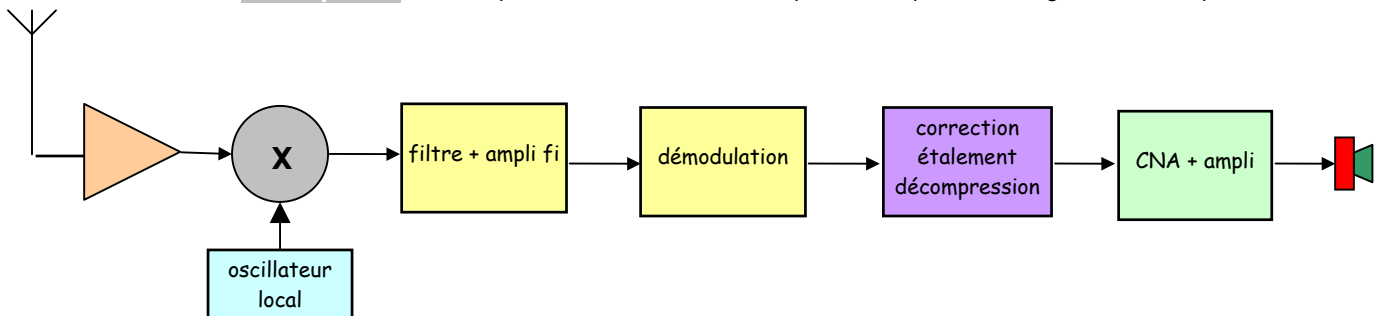
- une **compression de débit** par un vocodeur (ou codec) qui traite le signal vocal par tranches de 20 ms et abaisse le débit de 104 à 13 kbits/s avec une perte de qualité minimale
- une **protection** par des codes correcteurs d'erreurs
- un **cryptage** qui assure la confidentialité des communications (débit résultant 22,8 kbits/s)
- une **mise en paquets** de 148 bits (114 pour la voix) sur 577 μs pour former la salve TDMA

La mise en paquets (1 time-slot sur 8) augmente bien-sûr le débit qui passe à **$D = 270,8333 \text{ kbits/s}$** durant l'émission de la salve.

Ces salves de données binaires (4 salves = 20 ms de parole) pourront moduler une porteuse, qui sera ensuite transposée dans le canal d'émission grâce à un changement de fréquence.



Réception Le récepteur a une structure classique de récepteur à changement de fréquence :



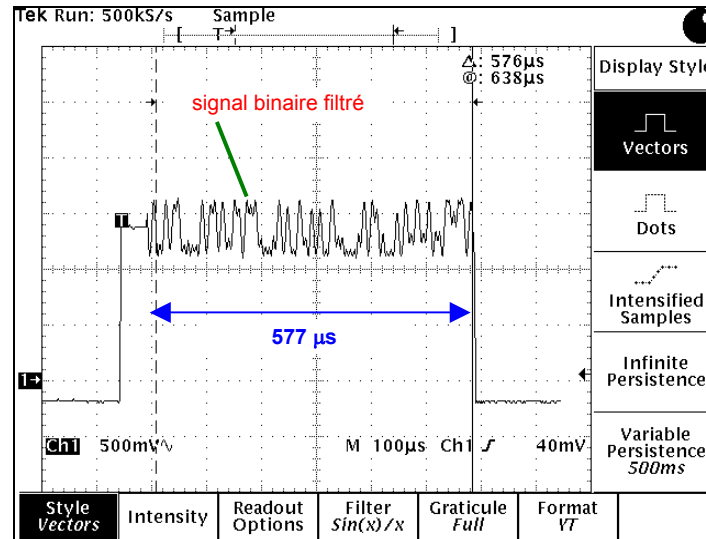
Une fois démodulées, les données sont corrigées des erreurs de transmission (quand c'est possible !), puis décompressées par le vocodeur et étalées dans le temps pour reconstituer les 20 ms de parole.

7- Les circuits d'émission

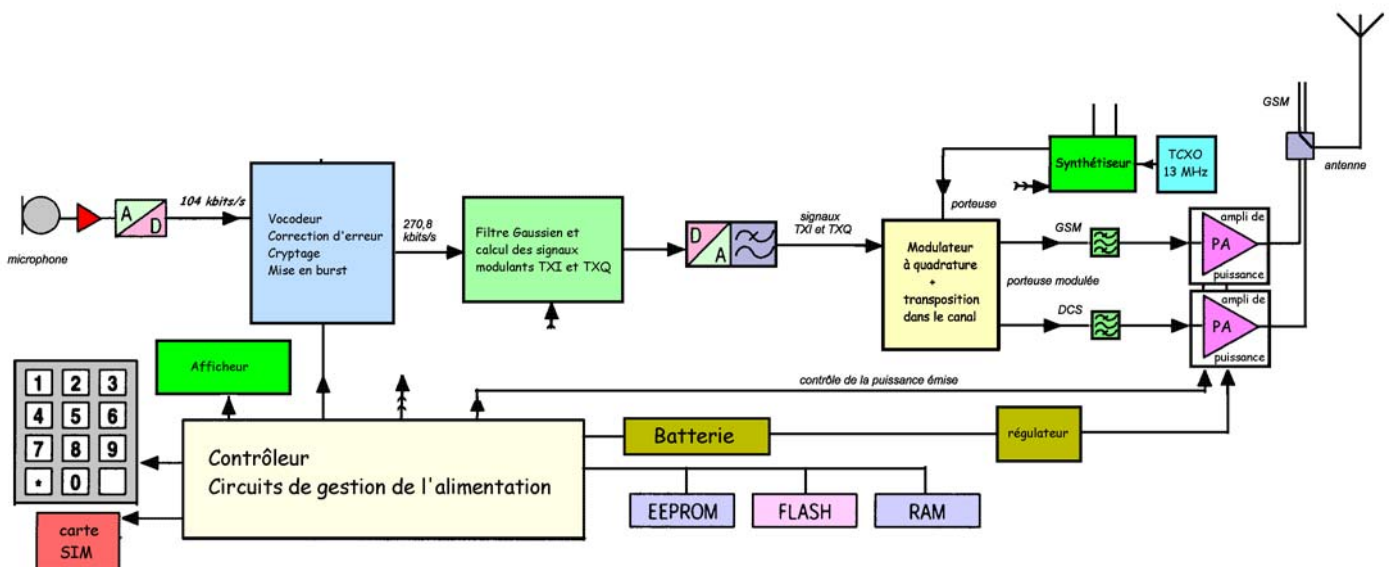
Le mobile GSM émet une porteuse modulée en fréquence ($m = 0,5$) après filtrage passe-bas des données par un **filtre gaussien**.

C'est une modulation GMSK : Gaussian (à cause du filtre) Minimum (à cause du $m=0,5$) Shift Keying

Comme dans tous les systèmes FM, la porteuse modulée est produite par un VCO. L'oscillogramme du signal commandant le VCO montre l'action du filtre gaussien sur la forme du signal binaire :



Le signal modulé est produit à une fréquence assez basse (entre 100 et 300 MHz en général), puis transposé à la fréquence d'émission.



La puissance maximale que doit fournir l'amplificateur de puissance de sortie PA est de 2W pour le GSM (33dBm) et 1W pour le DCS (30 dBm).

La puissance émise est contrôlée très soigneusement pour 2 raisons :

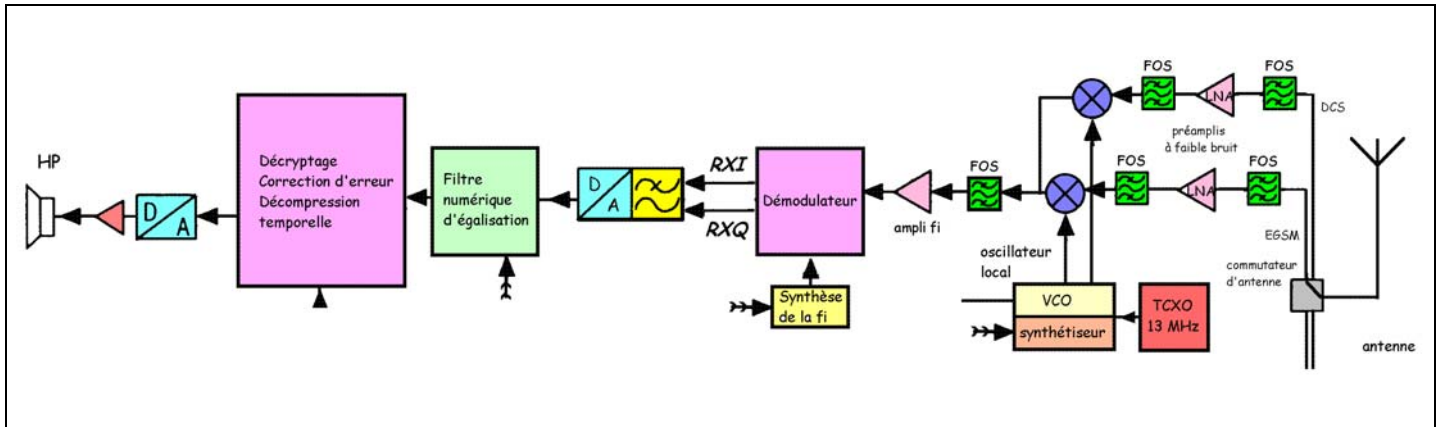
- en phase d'émission, la puissance est régulée à une valeur juste suffisante par la station de base pour une liaison sans erreurs et une consommation minimale
- en début et fin d'émission, la forme de la montée et de la descente de la puissance est contrôlée par le circuit de gestion du mobile, pour un encombrement spectral minimal

La norme prévoit un gabarit précis de variation de puissance au début et à la fin de l'émission de la salve.

8- Les circuits de réception

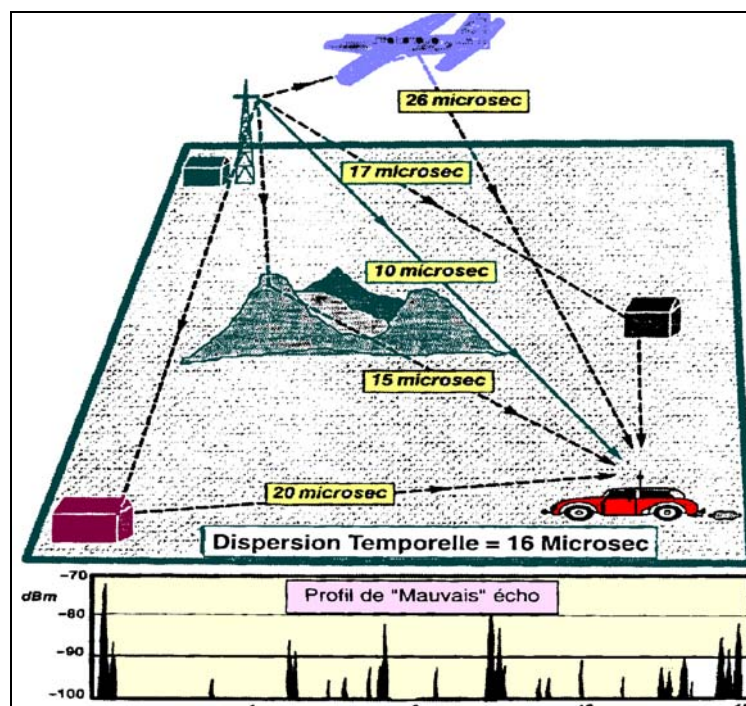
La partie « réception » du mobile GSM est classique, mais très performante, puisqu'elle doit assurer l'excellente sensibilité de -104 dBm soit $1,4 \mu\text{V}$ en GSM (-102 dBm en DCS) :

- les filtres d'entrée GSM et DCS fixent la bande reçue et éliminent les signaux indésirables (fréquence image, émissions TV, DECT et autres mobiles GSM à proximité...)
- les amplificateurs Low Noise Amplifier assurent une première amplification
- les mélangeurs du circuit RF permettent de faire la transposition en fréquence des signaux reçus vers la fréquence f_i par mélange avec le signal issu du synthétiseur.
- l'amplificateur f_i à gain réglable permet de garantir des niveaux constants pour les signaux RXI et RXQ sachant que les niveaux à l'antenne sont variables (-40 dBm à -110 dBm).
- le démodulateur récupère le signal démodulé qui est numérisé pour être traité par le DSP

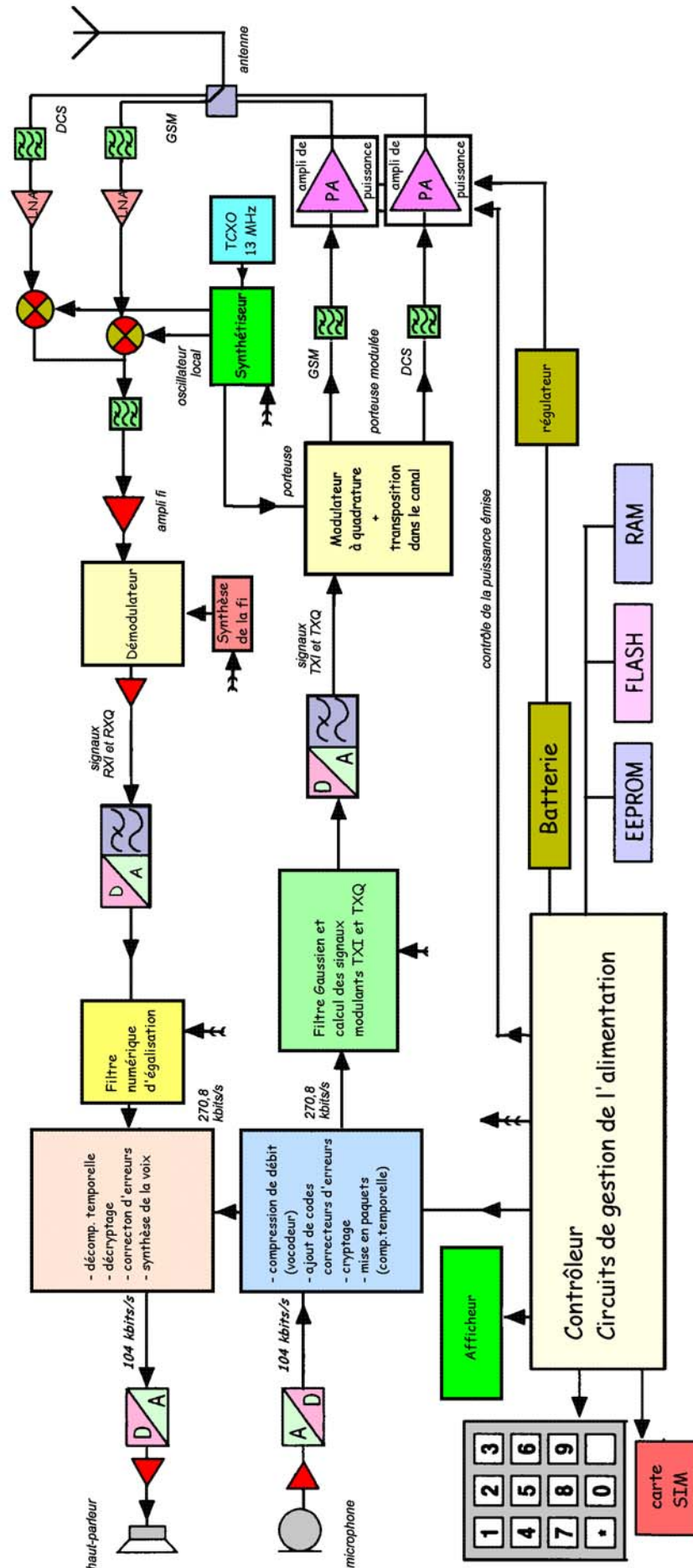


Ce traitement numérique va permettre de reconstituer le signal vocal :

- le filtre d'égalisation grâce aux mesures faites sur la séquence de formation, compense les déformations liées à la propagation dues aux échos et aux trajets multiples du signal
- les données binaires sont reconstituées par un dispositif de prise de décision logiciel
- elles sont décryptées, les erreurs corrigées, et subissent la décompression temporelle
- le vocodeur reçoit ces données et restitue le signal binaire vocal
- ce signal binaire est converti en analogique par le CNA, amplifié et envoyé sur le haut-parleur



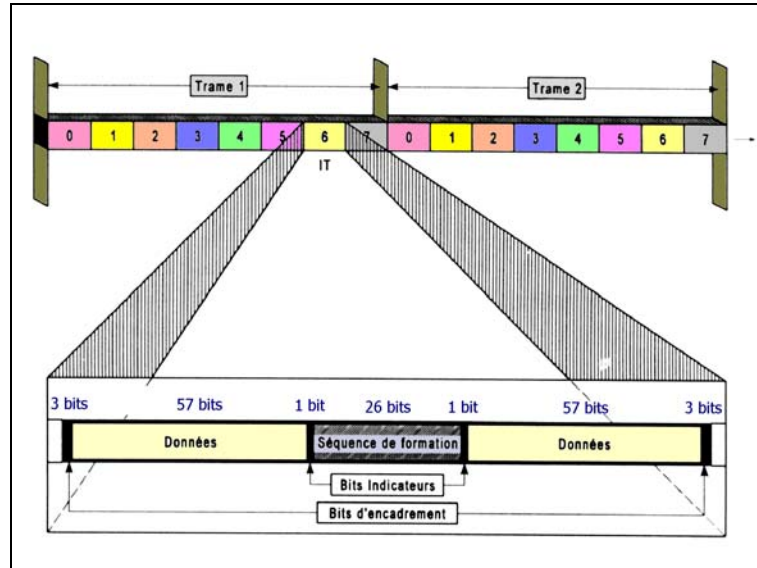
Annexe 1 - Schéma fonctionnel d'un mobile GSM



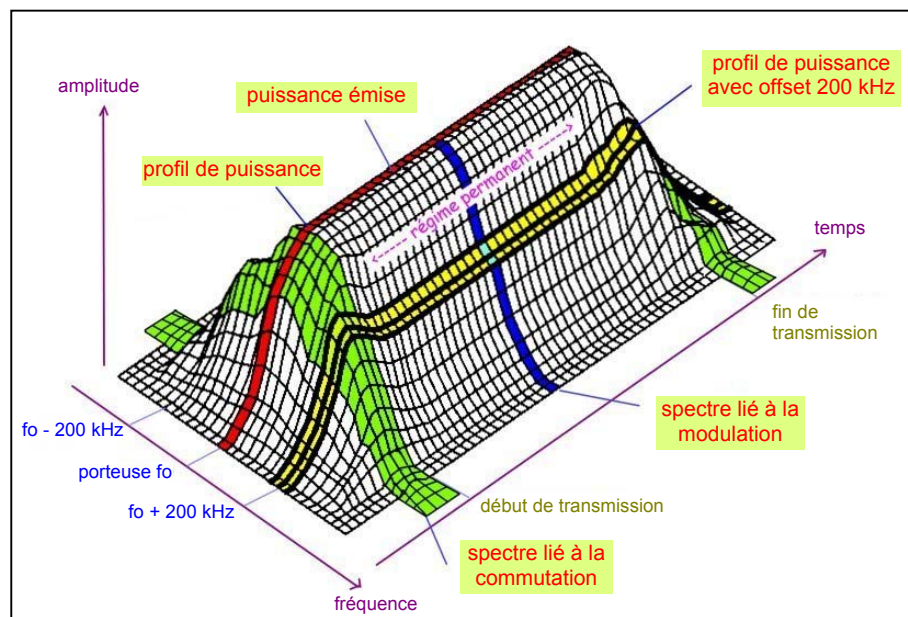
Annexe 2 – Structure d'une salve

Une salve émise dans un time-slot contient 114 bits d'information utile et a la structure suivante :

- 57 bits de données (voix ou signaux de contrôle)
- 26 bits (toujours les mêmes dans une cellule) d'une séquence de formation (training sequence), qui a pour mission de tester les propriétés du canal de transmission
- 57 bits de données (voix ou signaux de contrôle)
- quelques bits d'encadrement et indicateurs



Le signal émis peut être caractérisé par son diagramme spectre-temps :



- pendant l'émission de la salve, le spectre lié à la modulation déborde du canal
- l'émission s'établit et s'arrête progressivement, selon un profil de puissance précis
- le spectre est plus large durant les phases transitoires (spectre lié à la commutation)

Remarques :

- les montée et descente en puissance sont calibrés précisément à la production
- le résultat du calibrage est stocké dans la mémoire permanente du mobile
- si le profil de puissance n'est pas bien ajusté, le spectre lié à la commutation s'élargit, et risque de perturber les canaux voisins

Exercices d'application



jean-philippe muller

Les fréquences de travail



Savoir établir la relation entre fréquence de travail et numéro de canal

Les correspondances entre canaux du GSM et fréquences d'émission (TX) et de réception (RX) du mobile sont données dans le tableau suivant :

	numéro de canal	fréquence en MHz	propriétés de la bande
GSM-Rx	$0 \leq n \leq 124$	$f_{RX} = 935 + 0,2 \cdot n$	125 canaux de 935 à 959,8 MHz
GSM-Tx	$0 \leq n \leq 124$	$f_{TX} = 890 + 0,2 \cdot n$	125 canaux de 890 à 914,8 MHz
EGSM-Rx	$975 \leq n \leq 1023$	$f_{RX} = 935 + 0,2 \cdot (n - 1024)$	49 canaux de 925,2 à 934,8 MHz
EGSM-Tx	$975 \leq n \leq 1023$	$f_{TX} = 890 + 0,2 \cdot (n - 1024)$	49 canaux de 880,2 à 889,8 MHz
DCS-Rx	$512 \leq n \leq 885$	$f_{RX} = 1805,2 + 0,2 \cdot (n - 512)$	374 canaux de 1805,2 à 1879,8 MHz
DCS-Tx	$512 \leq n \leq 885$	$f_{TX} = 1710,2 + 0,2 \cdot (n - 512)$	374 canaux de 1710,2 à 1784,8 MHz

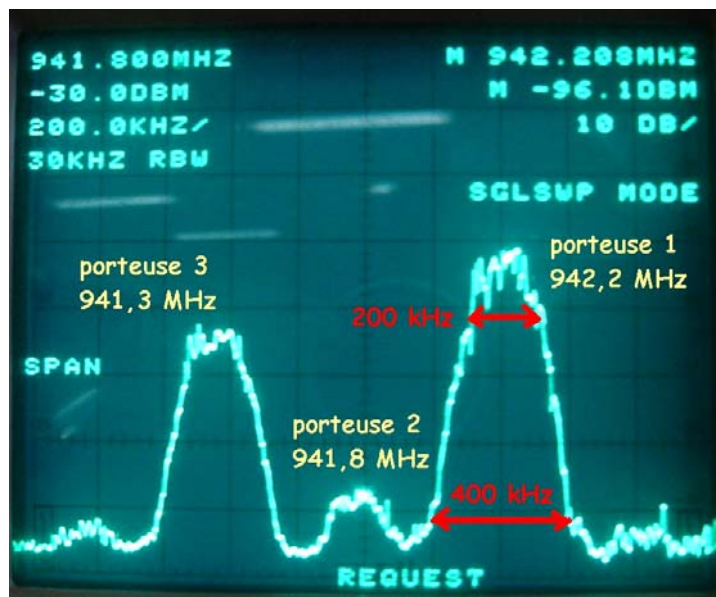
1) En vue d'établir une communication téléphonique, la station de base affecte au mobile le time-slot 3 du canal 35. Quelle sera la fréquence d'émission du mobile ? la fréquence de réception ?

2) Le filtre f_i de réception est centré sur 120 MHz et l'oscillateur est placé au-dessus de la fréquence à recevoir. Dessiner un schéma de la structure utilisée. Quelle doit être la valeur de la fréquence f_0 de l'oscillateur local que doit produire le synthétiseur du mobile ?

3) Le signal modulé est produit à 180 MHz et l'oscillateur est placé au-dessus de la fréquence d'émission. Dessiner un schéma de la structure utilisée pour déplacer le signal modulé dans le canal d'émission. Quelle doit être la valeur de la fréquence f_1 de l'oscillateur local produite par le synthétiseur du mobile ?

4) De combien de temps dispose le synthétiseur pour passer de la fréquence f_0 à la fréquence f_1 ?

5) On a enregistré une portion de spectre de la bande GSM. S'agit-il de la bande montante ou descendante ? A quels canaux correspondent ces émissions ? où est l'erreur ?



La puissance émise

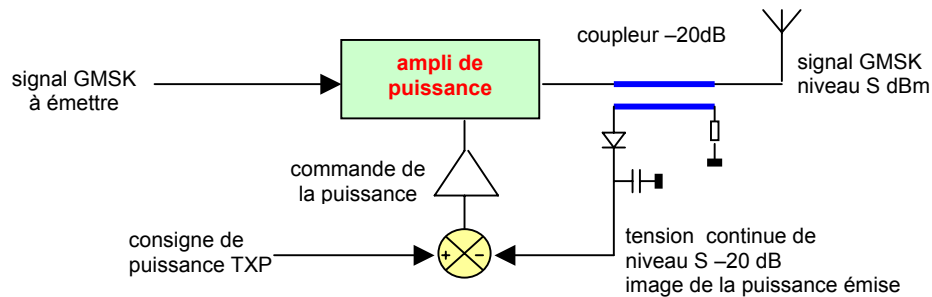


Comprendre le rôle du contrôle de la puissance émise par le mobile

C'est la station de base qui contrôle la puissance d'émission du mobile et la règle à une valeur juste suffisante pour avoir une liaison de qualité satisfaisante.

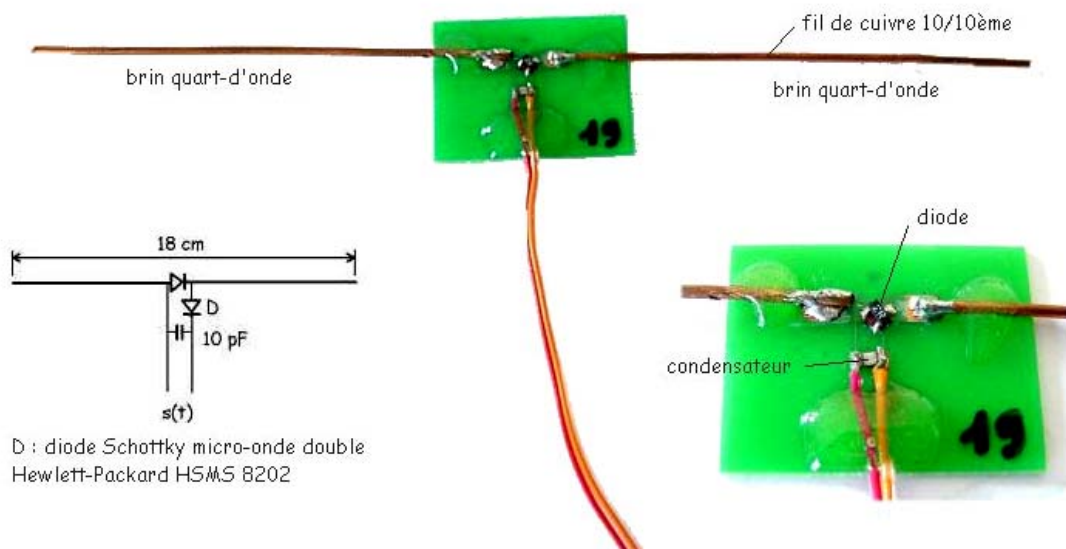
Avantages : **diminution des interférence** dans les canaux adjacents et **augmentation de l'autonomie** des mobiles

1) Dans un mobile GSM, le circuit de régulation de la puissance a la structure suivante :



Le coupleur joue le même rôle qu'un transformateur abaisseur ($m=0,1$). Quel est le rôle de la diode ? du condensateur ? Expliquer la structure et le fonctionnement du montage.

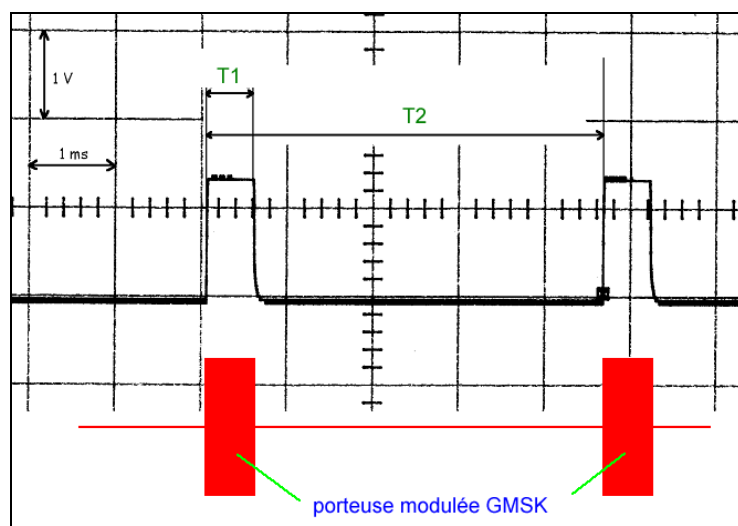
2) Pour détecter le signal émis par le mobile GSM, on utilise le dispositif simple suivant constitué par une antenne dipôle demi-onde suivie d'un détecteur crête :



La présence d'une porteuse modulée ou non à une fréquence voisine de 900 MHz se traduit par l'apparition d'une tension $s(t)$ continue proportionnelle à l'amplitude de la porteuse.

Justifier la longueur de l'antenne.

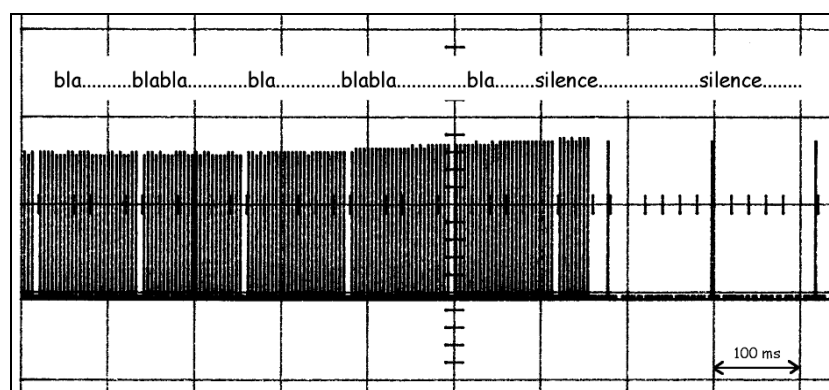
3) L'antenne placée à proximité d'un mobile en communication a fourni le signal suivant :



Estimer les durées T1 et T2

Justifier leurs valeurs.

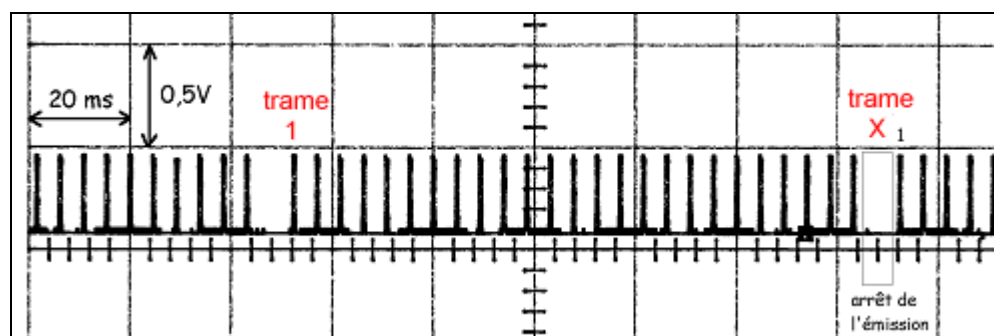
4) Le mobile est équipé d'un dispositif de détection d'activité vocale. L'enregistrement suivant montre comment le mobile réagit lorsqu'on arrête de parler dans le microphone :



Comment est modifié son fonctionnement lorsqu'on arrête de parler ? Quel est l'intérêt de ce dispositif ? Pourquoi le mobile continue-t-il à émettre de temps en temps ?

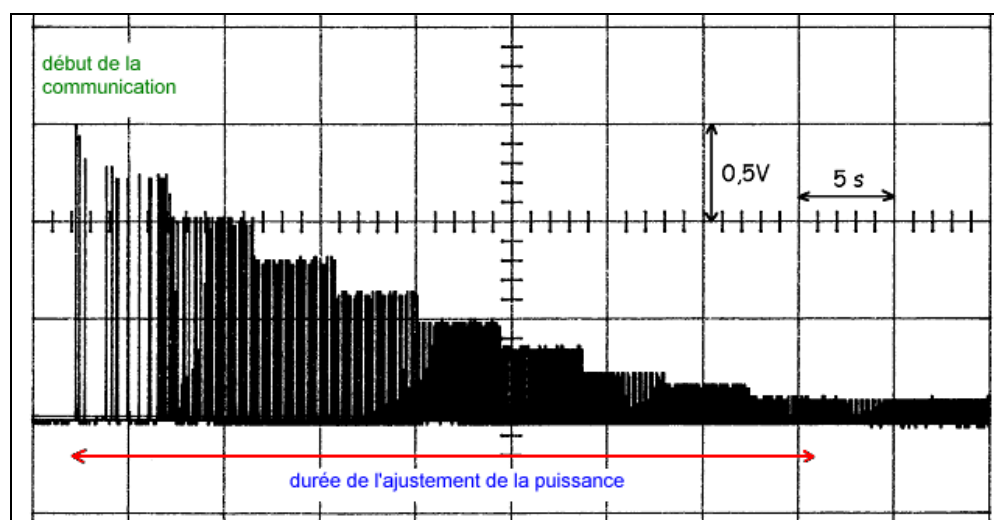
Remarque : durant un silence, le haut-parleur produit un bruit de fond standard évitant au correspondant l'impression désagréable d'une interruption de la communication.

5) Sur l'enregistrement ci-dessous, on voit que toutes les X trames, le mobile n'émet rien. Déterminer la valeur de X.



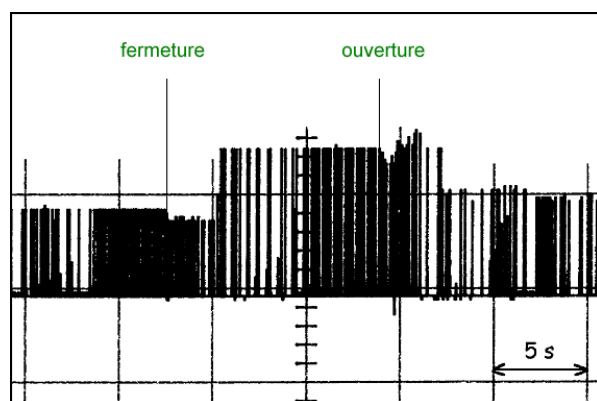
Remarque : durant cette trame X, le mobile GSM reste en réception durant 4,6 ms pour écouter et décoder la voie balise de l'une des cellules voisines en vue d'un éventuel changement de cellule.

6) En début de communication, le téléphone émet à sa puissance maximale. Dans les premières secondes, la station de base envoie des consignes PCL (Power Control Level) pour réduire progressivement la puissance d'émission



A l'aide de l'enregistrement, évaluer le temps que prend cet ajustement.

7) On rentre dans un ascenseur constituant une enceinte métallique limitant la bonne propagation des ondes. Les portes se ferment, puis s'ouvrent.



Sur l'enregistrement, évaluer le temps que met la station de base à réagir pour augmenter, puis diminuer, la puissance d'émission du mobile. Pourquoi conseille-t-on d'éviter de téléphoner dans un ascenseur, un sous-sol ou un tunnel ?

Le filtre gaussien



Comprendre les propriétés du filtre utilisé pour limiter le spectre des données numériques

Le module de la transmittance d'un filtre gaussien numérique utilisé pour filtrer un signal binaire s'écrit :

$$H(f) = \exp \left[-0,3466 \left(\frac{f}{BTD} \right)^2 \right]$$

- D représente le débit des données binaires
- BT représente le produit (bande passante x durée du bit)
- pour le GSM : BT = 0,3 et D = 270,8333 kHz
- pour le DECT et Bluetooth : BT = 0,5

Ce filtre s'appelle filtre gaussien car sa réponse impulsionnelle est une gaussienne.

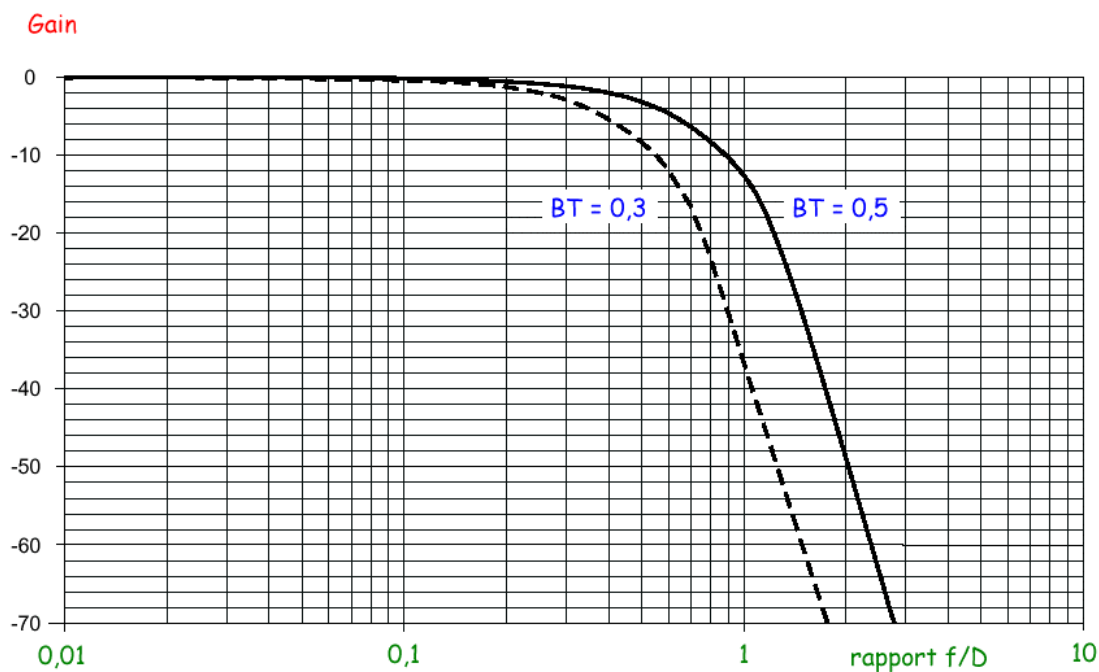
Il a été retenu pour le GSM parce qu'il ne déforme pas trop le signal binaire, minimise l'encombrement spectral de la porteuse modulée et se comporte bien vis-à-vis du bruit.

1) Montrer que pour le GSM, l'expression précédente devient :

$$H(f) = \exp \left[- \left(\frac{f_{\text{kHz}}}{138} \right)^2 \right]$$

2) Calculer le module H_1 de la transmittance à la fréquence $f = 81,2$ kHz . Que peut-on dire de cette fréquence ?

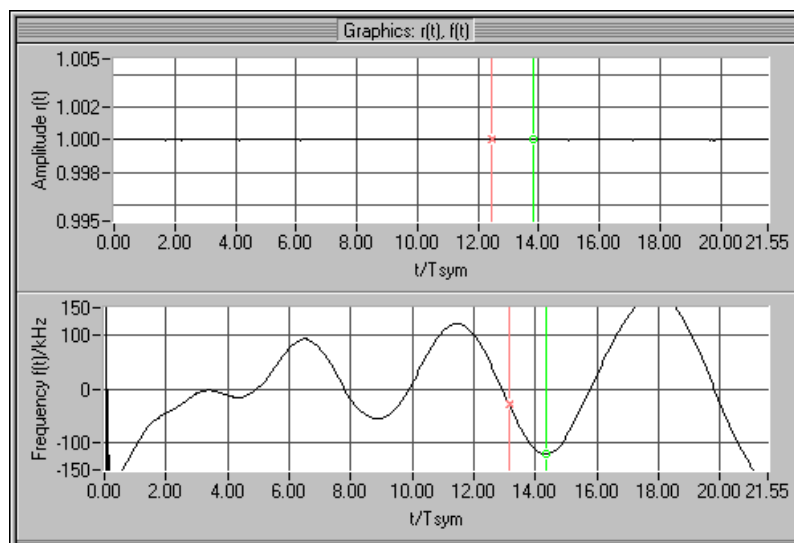
3) Les courbes suivantes représentent les courbes de gain d'un filtre gaussien pour 2 valeurs de BT utilisées en pratique. Pour le GSM, mesurer graphiquement la fréquence de coupure f_c du filtre et comparer à la fréquence précédente.



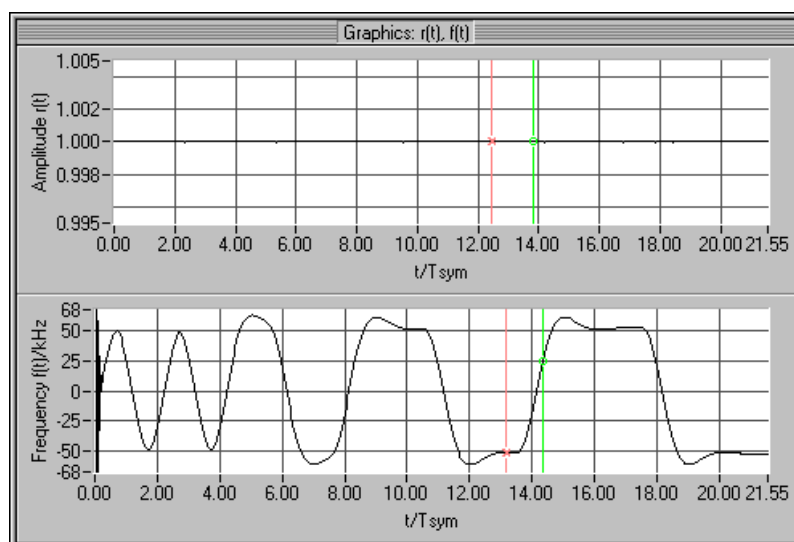
4) Toujours dans le cas du GSM, calculer la durée d'un bit et en déduire la bande passante B du filtre à partir de la valeur de BT. Comparer aux autres valeurs trouvées.

5) Les 3 simulations donnent l'amplitude et les variations de fréquence d'une porteuse modulée en FM par la séquence binaire : « 10101100110011100011110000 ».

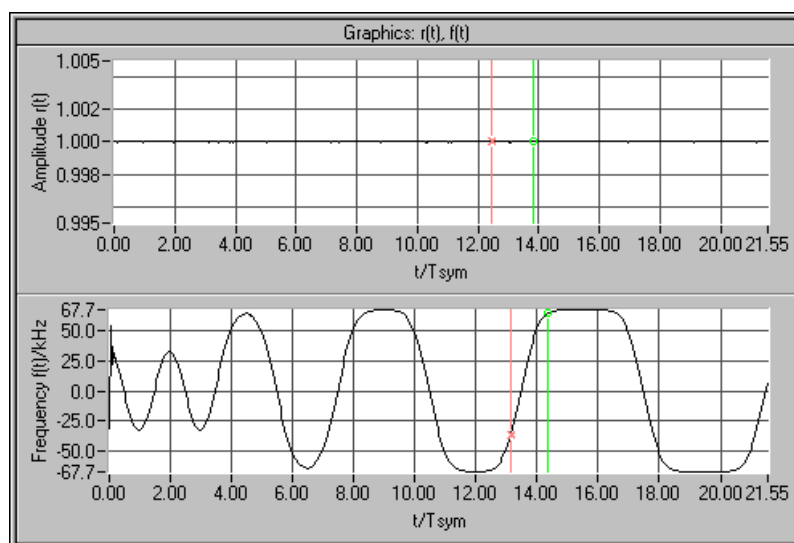
Pour ces 3 filtres, l'amplitude de la porteuse modulée est constante, et la fréquence varie, ce qui est normal. Mais lequel de ces 3 filtres offre le meilleur compromis (efficacité du filtrage / respect de la séquence binaire) ?



passé-bas du 3^{ème} ordre
coupant à 81,2 kHz



passé-bas du 3^{ème} ordre
coupant à 270 kHz



passé-bas gaussien
coupant à 81,2 kHz

Spectre lié à la modulation

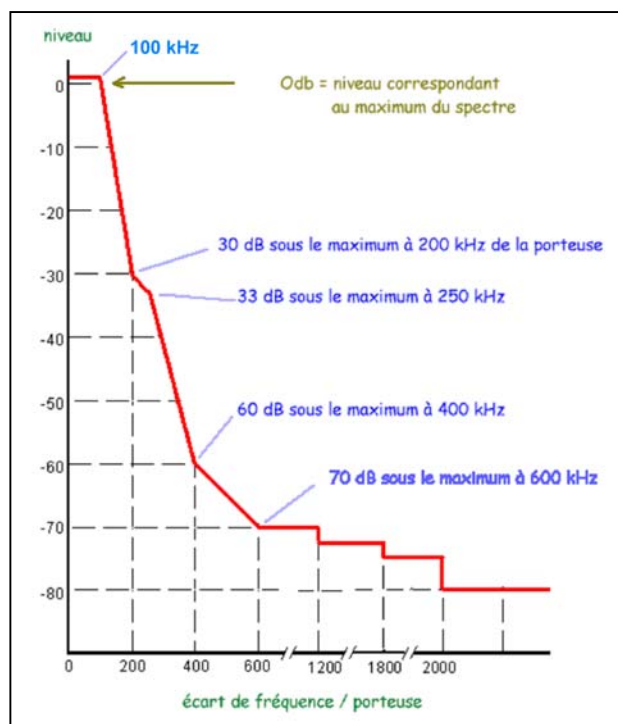


Connaître quelques aspects du spectre d'un signal GMSK

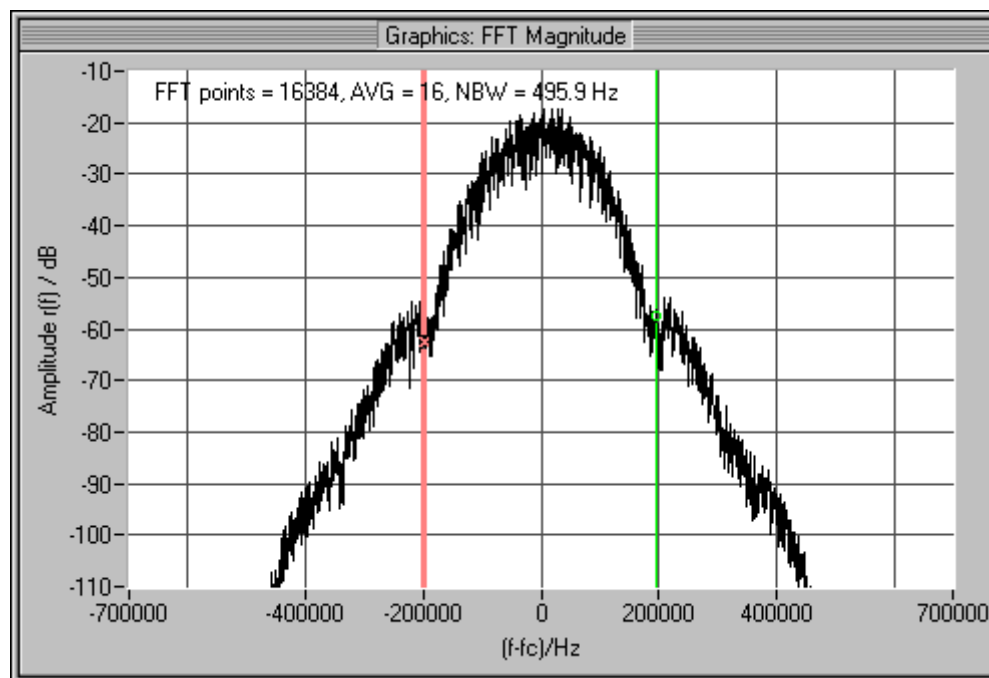
La norme GSM définit le gabarit très précis ci-contre que le spectre du signal émis par le mobile doit respecter.

1) Pour un mobile émettant 20 dBm dans le canal N, quels sont les niveaux admissibles :

- dans les canaux adjacents $N \pm 1$?
- dans les canaux $N \pm 2$?
- dans les canaux $N \pm 3$?

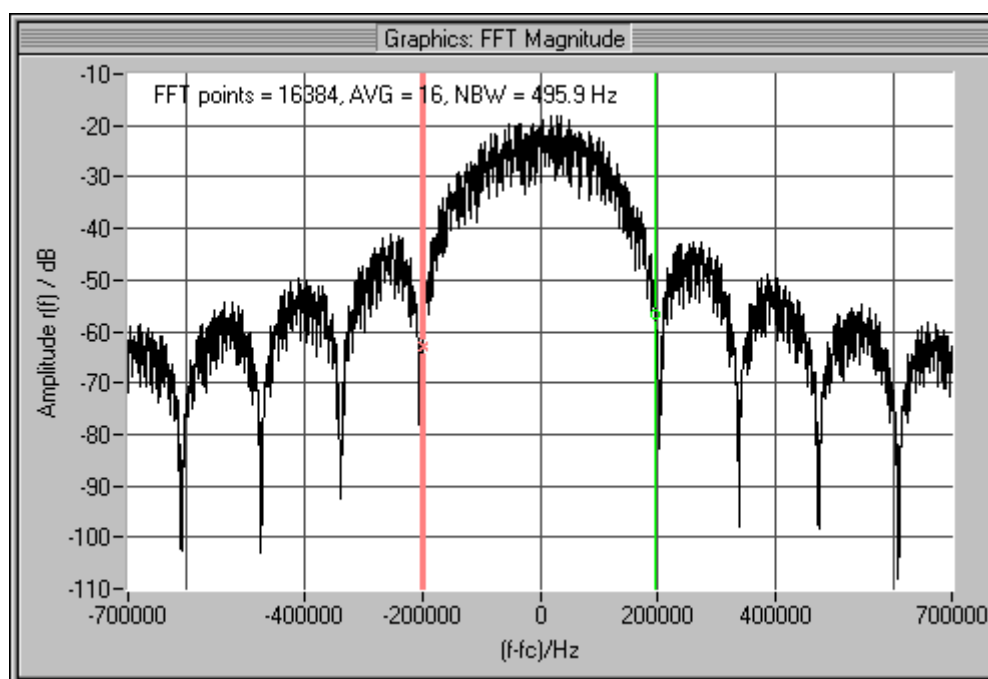


2) La simulation d'un signal modulé GMSK a donné le spectre suivant. Tracer sur ce spectre le gabarit défini par la norme et vérifier qu'il est bien respecté.

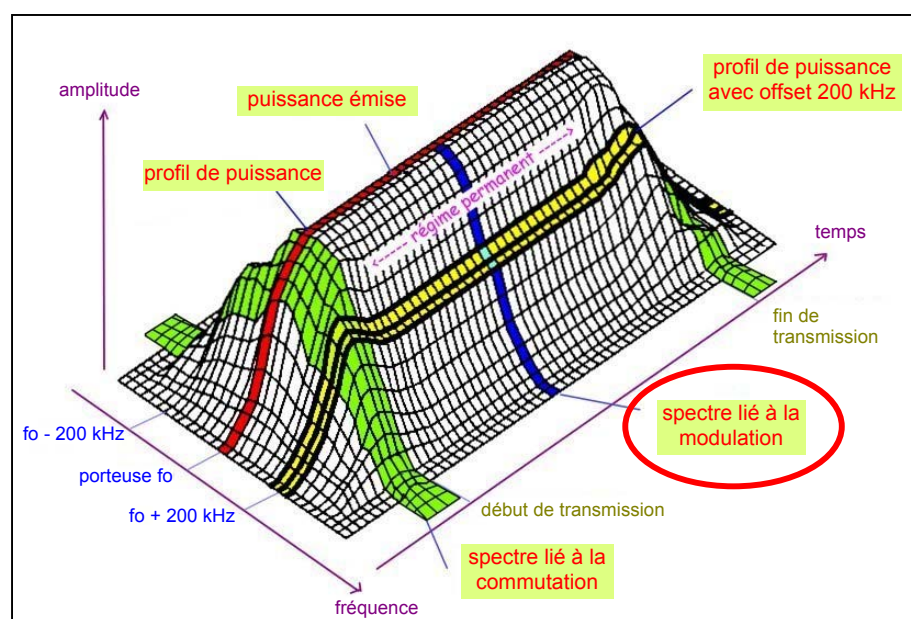


Faire apparaître sur ce dessin le canal. Le signal empiète-t-il de manière gênante sur les canaux adjacents ? sur les canaux voisins ?

3) Une nouvelle simulation **sans filtre passe-bas gaussien** a donné le spectre suivant. Tracer sur ce spectre le gabarit défini par la norme. Le gabarit est-il toujours respecté ? Conclure sur le rôle du filtre.



Remarque : ce spectre est celui lié à la modulation de la porteuse et existe durant toute la durée de la salve



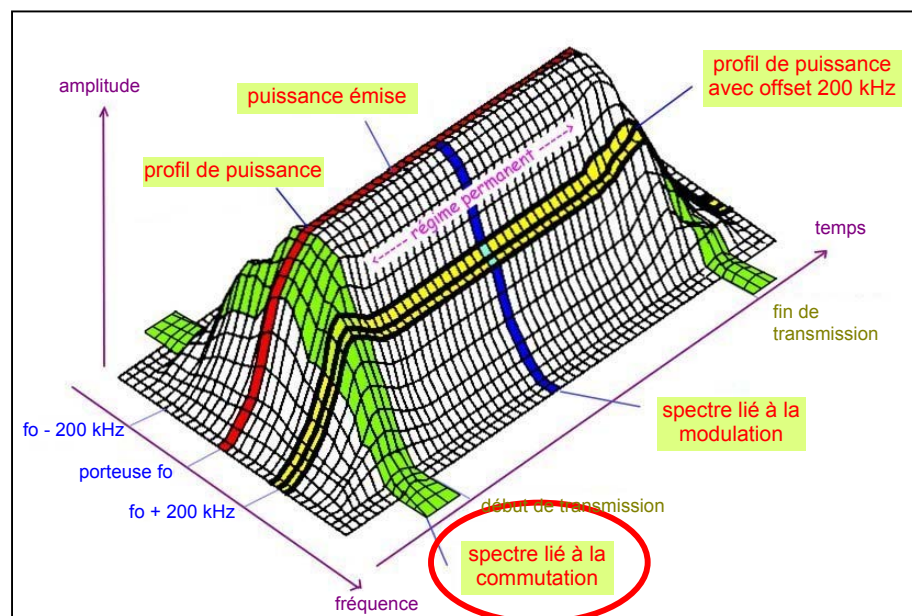
Au démarrage et à l'arrêt de l'émission, ce spectre est modifié (spectre lié à la commutation).

Spectre lié à la commutation



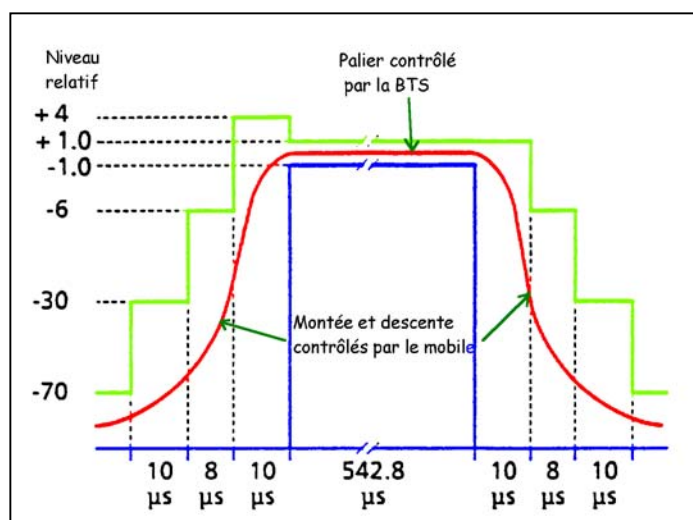
Connaître quelques aspects du spectre d'un signal GMSK

L'émission discontinue (par salves de 577 μ s) du mobile a un effet négatif sur le spectre qui s'élargit au démarrage et à l'arrêt de l'émission : c'est le spectre lié à la commutation.



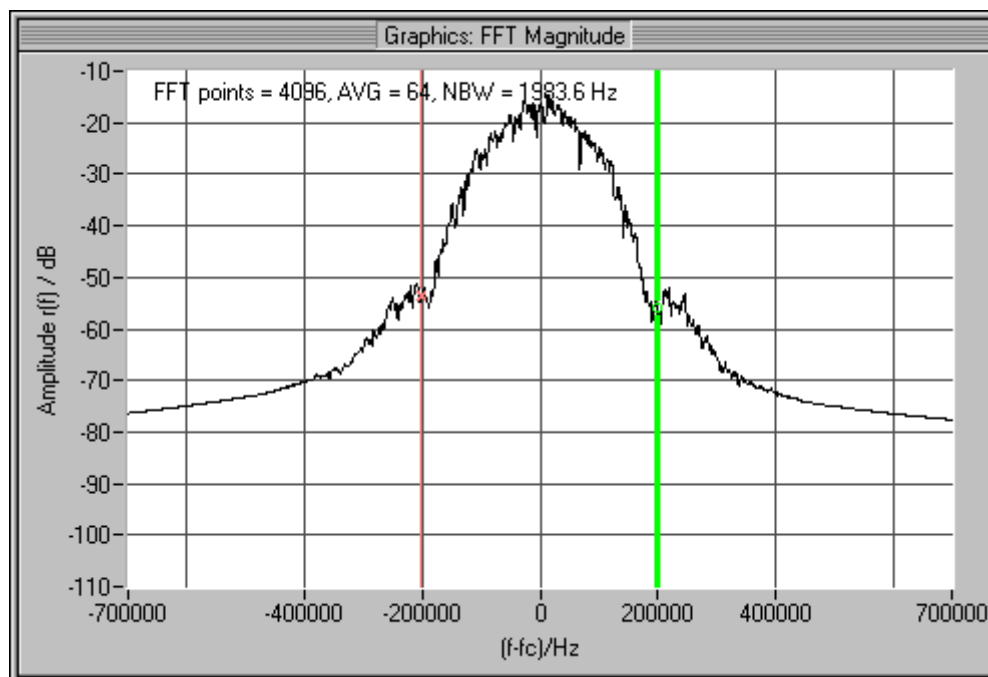
Une montée progressive de l'émission permet de limiter l'élargissement spectral du signal modulé.

La norme GSM prévoit donc un gabarit de montée en puissance lors de l'émission d'une salve.

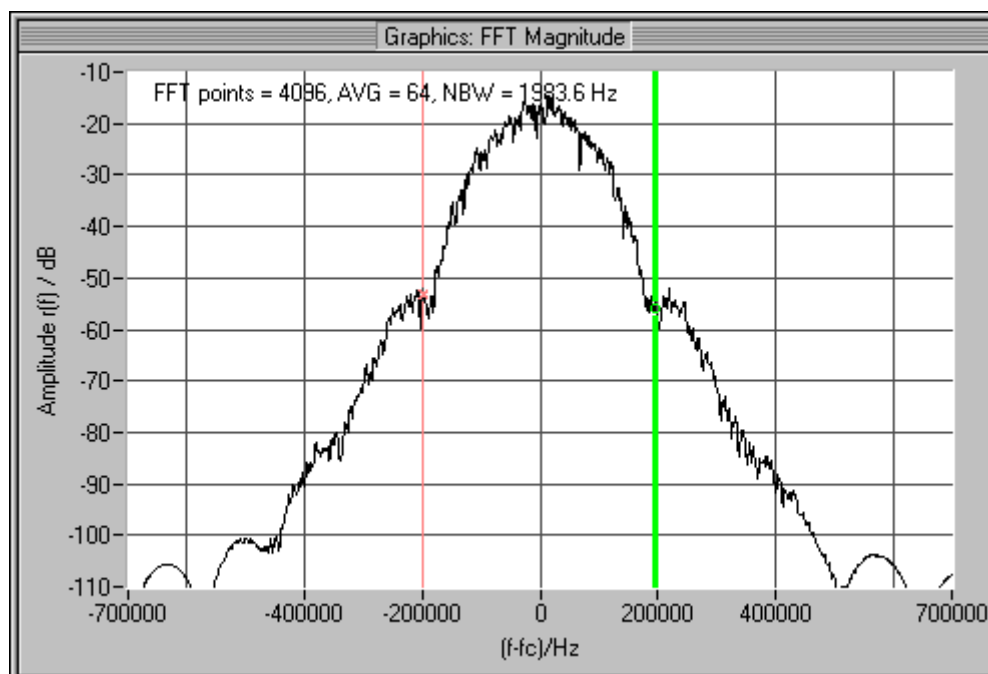


1) Sachant que la salve contient 148 bits avec un débit de 270,8333 kbits/s calculer le temps nécessaire pour la transmission de ces bits et comparer au gabarit.

2) La simulation d'un signal modulé GMSK émis en salves avec une montée et descente brutale (en moins de $1\ \mu\text{s}$) a donné le spectre suivant. Tracer sur ce spectre le gabarit défini par la norme. Est-il respecté ?



3) Une nouvelle simulation **avec montée et descente progressive** (en $6\ \mu\text{s}$ environ, comme pour un mobile GSM) a donné le spectre suivant. Tracer sur ce spectre le gabarit défini par la norme. Le gabarit est-il mieux respecté ?



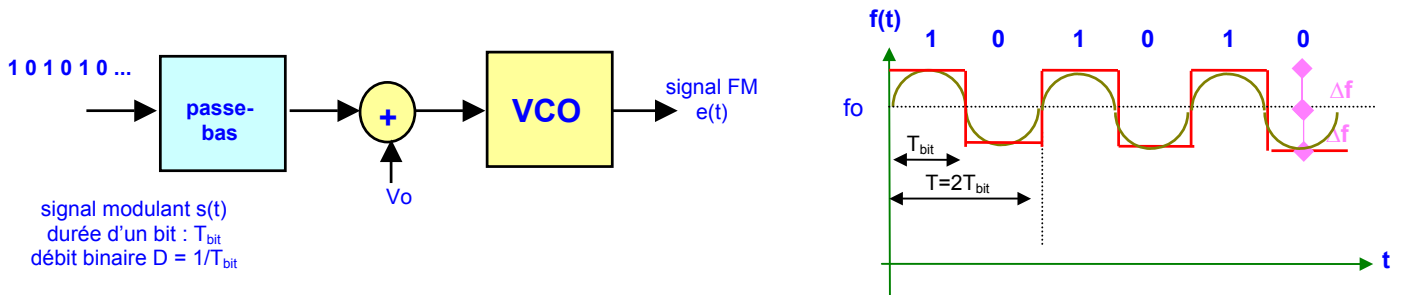
Le modulateur IQ du GSM



Comprendre comment on produit le signal FM dans un mobile GSM

A- Le signal modulé GMSK

Dans les transmissions numériques, le signal modulant binaire est d'abord filtré énergiquement avant de produire la porteuse modulée FM :



Pour définir l'indice de modulation m , on suppose que le signal modulant correspond à la séquence binaire « 101010... » et que le filtre ne garde que le fondamental de ce signal.

1) Dans le GSM, les données binaires sont transmises avec un débit binaire : $D = 270,83333 \text{ kbits/s}$. 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..." ?

2) 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). Quelle est alors l'excursion Δf du GSM ?

3) Si on enlève le filtre passe-bas, montrer que la fréquence instantanée du signal FM s'écrit : $f(t) = f_0 \pm D/4$ (le signe + correspondant à un "1" et le signe - à un "0")

4) Toujours sans le filtre passe-bas, calculer la phase instantanée $\theta(t)$ du signal modulé FM et montrer que la porteuse modulée GMSK s'écrit :

$$e(t) = E \cos(\omega_0 t + \varphi(t)) \quad \text{avec} \quad \varphi(t) = \pm \pi D t / 2$$

B- Les circuits du modulateur

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.

La porteuse modulée MSK (pour $E=1V$) s'écrit : $e(t) = \cos(\omega_0 t + \varphi(t))$ avec $\varphi(t) = \pm \pi D t / 2$

5) En utilisant la formule de trigonométrie : $\cos(a+b) = \cos(a).\cos(b) - \sin(a).\sin(b)$, développer $e(t)$.

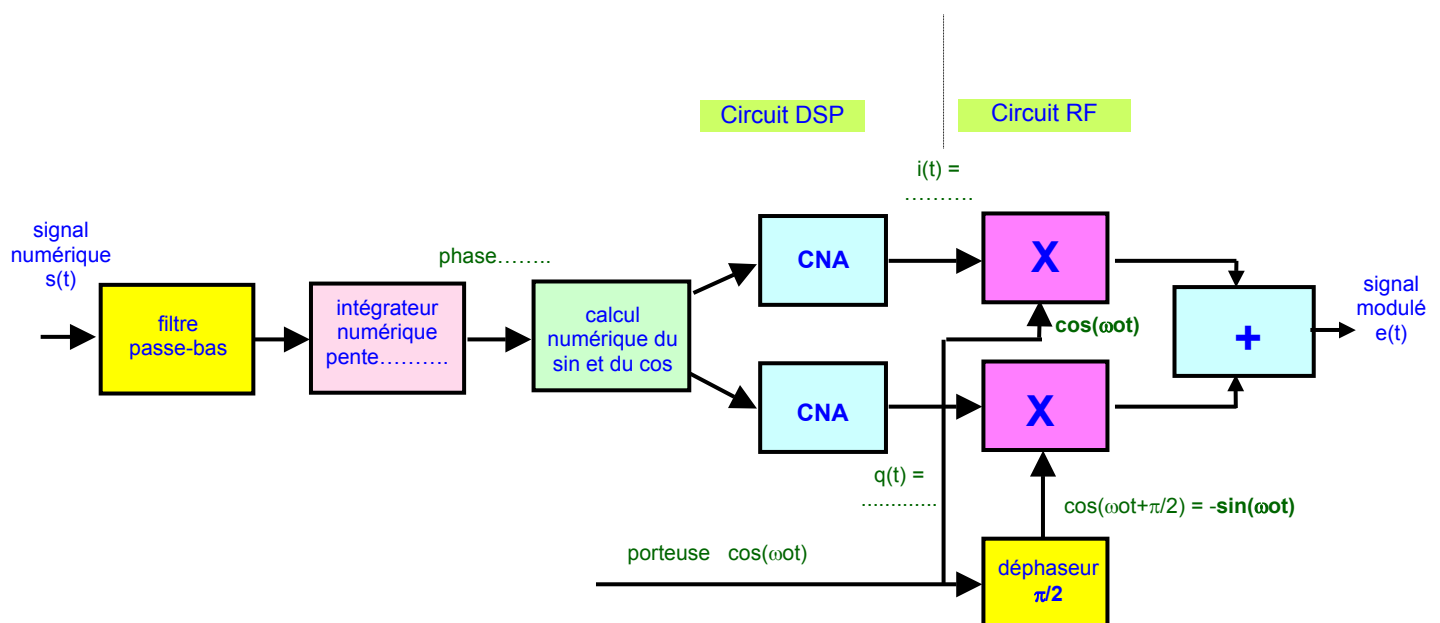
6) Sans tenir compte du filtre, détailler les opérations mathématiques à effectuer pour passer du signal binaire ± 1 à $e(t)$:

$\pm 1 \Rightarrow \varphi(t) = \pm \pi D t / 2$:

$\varphi(t) \Rightarrow \cos(\varphi(t))$ et $\sin(\varphi(t))$:

$\cos(\varphi(t))$ et $\sin(\varphi(t)) \Rightarrow e(t)$:

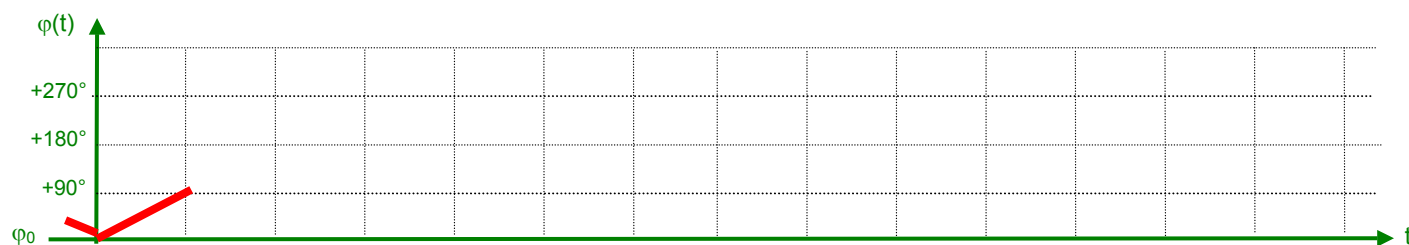
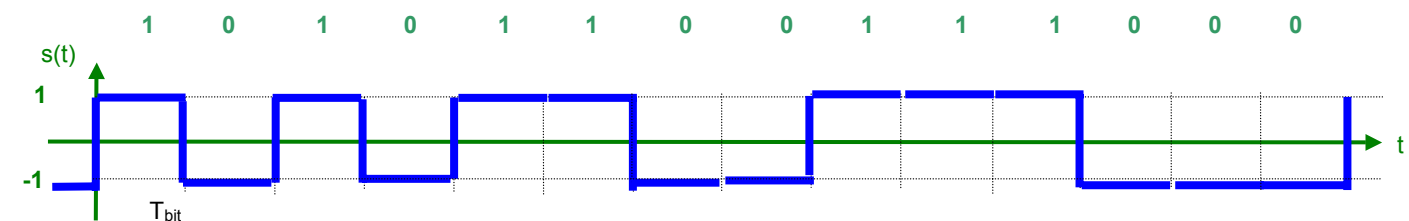
7) Repérer ces opérations sur le schéma et compléter les zones en pointillés :



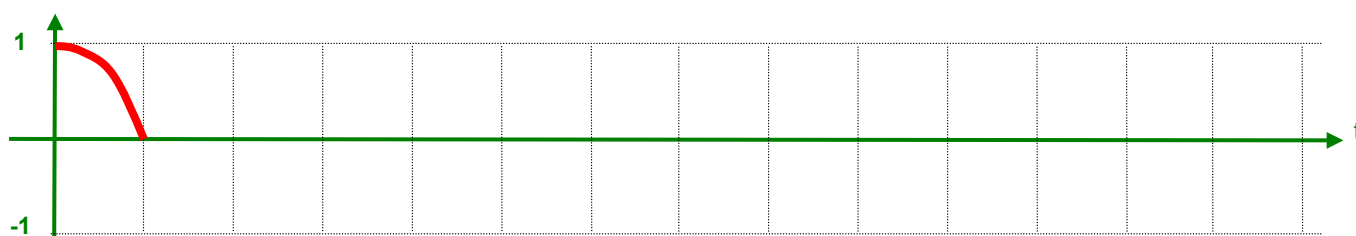
8) En partant de la séquence binaire donnée, dessiner l'évolution de la phase $\varphi(t)$ et des signaux $i(t)$ et $q(t)$ (page suivante)

9) Tenir compte du filtrage qui arrondit les angles et esquisser l'allure des signaux $\varphi(t)$, $i(t)$ et $q(t)$ filtrés.

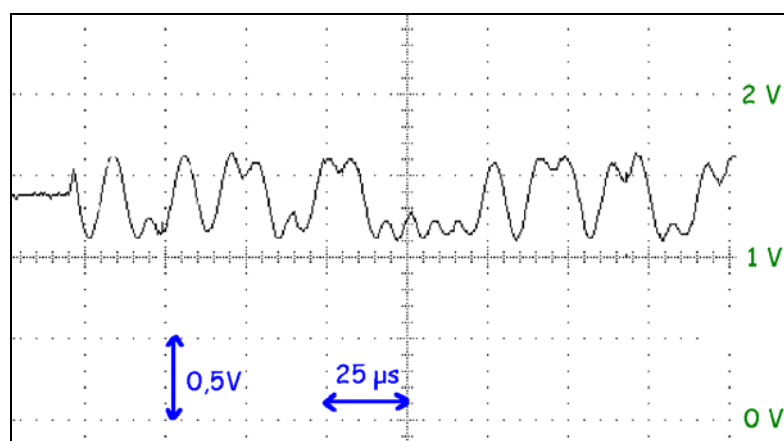
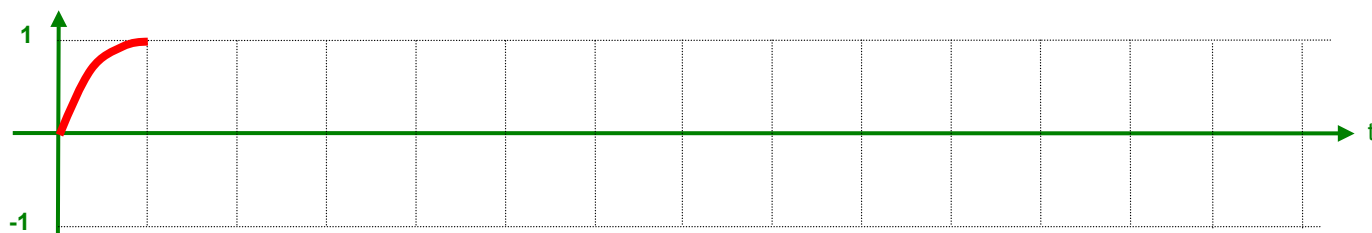
10) L'allure du signal $i(t)$ obtenu ressemble-t-il à l'oscillogramme d'un signal $i(t)$ relevé sur un mobile ?

C- Allures de $\varphi(t)$, $i(t)$ et $q(t)$ 

$$i(t) = \cos[\varphi(t)]$$



$$q(t) = \sin[\varphi(t)]$$

Signal $i(t)$ relevé sur un mobile

Les fréquences de travail

- 1) canal 35 : $f_{RX} = 942 \text{ MHz}$ $f_{TX} = 897 \text{ MHz}$
- 2) $f_0 = 942 + 120 = 1062 \text{ MHz}$ 3) $f_1 = 897 + 180 = 1077 \text{ MHz}$
- 4) la réception se fait dans le time-slot 3, l'émission 3 time-slots plus tard, le synthétiseur a donc 2 time-slots pour changer de fréquence soit $2 \times 577 \mu\text{s} \approx 1,1 \text{ ms}$
- 5) les fréquences des signaux montrent qu'il s'agit de la bande descendante :
 - porteuse 1 : 942,2 MHz, canal 36
 - porteuse 1 : 941,8 MHz, canal 34
 - porteuse 1 : 941,3 MHz (plutôt 941,4), canal 32

La puissance émise

- 1) D+C constituent un détecteur crête qui mesure le niveau émis en donnant une tension continue proportionnelle à l'amplitude de la porteuse.
Le dispositif est un asservissement de niveau qui asservit le niveau de sortie à la consigne TXP
- 2) $l = \lambda/2 = c/2f \approx 17 \text{ cm}$ à 900 MHz (18 cm est donc un peu trop long, 17 cm serait mieux!)
- 3) $T_1 \approx 0,6 \text{ ms}$ (en réalité $577 \mu\text{s}$) $T_2 = 4,6 \text{ ms}$
- 4) si on arrête de parler, l'émission s'arrête, ce qui permet d'économiser la batterie
le téléphone continue à émettre de temps en temps des signaux de contrôle (qualité du signal reçu par ex)
- 5) $X = 26$
- 6) la puissance est ajustée par la base en 40 s environ
- 7) le temps de réaction de la base est de l'ordre de 3s
dans un tunnel, ascenseur, sous-sol, la puissance émise augmente sensiblement

Le filtre gaussien

$$1) H(f) = \exp \left[-0,3466 \left(\frac{f_{\text{kHz}}}{0,3 \times 270,83333 \text{ kHz}} \right)^2 \right] = \exp \left[- \left(\frac{f_{\text{kHz}}}{138} \right)^2 \right]$$

- 2) $H(0) = 1$ et $H(81,2 \text{ kHz}) = 0,707$ 81,2 kHz est donc la fréquence de coupure f_c du filtre
- 3) graphiquement, à la coupure on a $f_c/D = 0,3$ soit $f_c = 81,2 \text{ kHz}$
- 4) $T_{\text{bit}} = 1/D = 3,7 \mu\text{s}$ d'où $B = 0,3/T_{\text{bit}} = 81,2 \text{ kHz}$

5)

	filtrage	excursion	séquence reconnaissable
3 ^{ème} ordre, coupure 81,2 KHz	bon	pas bon	non
3 ^{ème} ordre, coupure 270 KHz	pas bon	bon	oui
gaussien	bon	moyen	oui

Spectre lié à la modulation

- 1) canal N+1 : 30 dB en-dessous, soit -10 dBm
canal N+2 : 60 dB en-dessous, soit -40 dBm
canal N+3 : 70 dB en-dessous, soit -50 dBm
- 2) avec filtre, le gabarit est respecté et le spectre déborde largement du canal
- 3) sans filtre, le gabarit n'est pas respecté : le filtre sert donc à limiter l'encombrement spectral du signal

Spectre lié à la commutation

1) $T_{\text{bit}} = 1/D = 3,7 \mu\text{s}$ pour la transmission des 148 bits il faut donc $T = 148/D = 546 \mu\text{s}$

Cette durée correspond à la durée du palier à moins d'un bit près (écart $3,2 \mu\text{s}$).

Si le profil de puissance respecte le gabarit, la salve pourra être transmise correctement.

2) avec une montée et descente rapide ($< 1 \mu\text{s}$), le gabarit n'est pas respecté

3) avec une montée et descente progressive ($6 \mu\text{s}$), le gabarit est respecté

Le modulateur IQ du GSM

1) pour une séquence « 10101010 ... », la fréquence est $F = 1/2T_{\text{bit}} = D/2 = 135 \text{ kHz}$

2) $m = 0,5 = \Delta f/F$ soit $\Delta f = 0,5.F = 67,7 \text{ kHz} = D/4$

3) $f(t) = f_0 \pm \Delta f = f_0 \pm D/4$

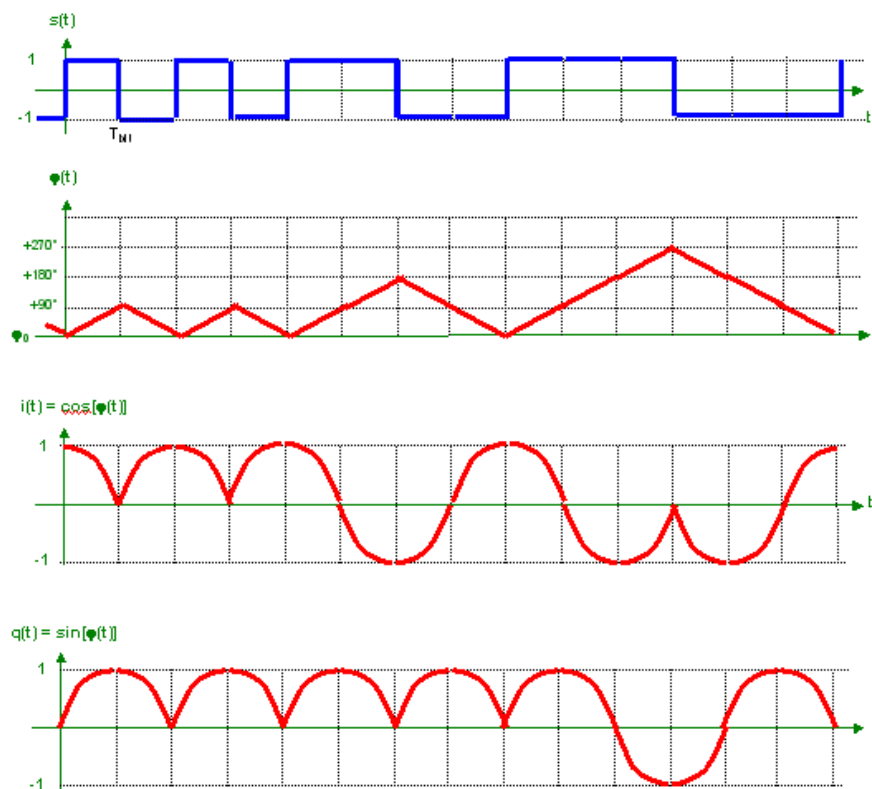
4) $\omega(t) = \omega_0 \pm \pi D/2$ $\theta(t) = \int \omega(t) dt = \omega_0 t \pm \pi D t/2$
 et $e(t) = E \cos(\theta(t)) = E \cos(\omega_0 t \pm \pi D t/2) = e(t) = E \cos(\omega_0 t + \varphi(t))$

5) $e(t) = \cos(\omega_0 t + \varphi(t)) = \cos(\omega_0 t) \cdot \cos(\varphi(t)) - \sin(\omega_0 t) \cdot \sin(\varphi(t))$

6)

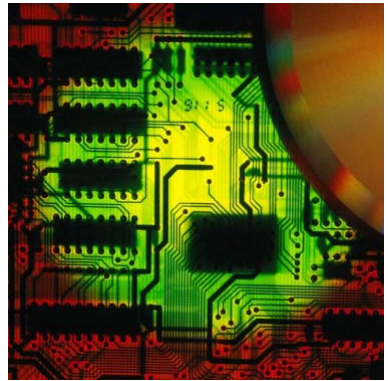
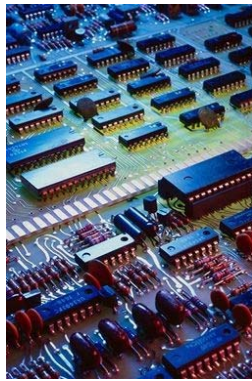
- $1 \Rightarrow \varphi(t) = \pm \pi D t/2$: on passe du symbole binaire à la phase par un intégrateur de pente $\pi D/2$
- $\varphi(t) \Rightarrow \cos(\varphi(t))$ et $\sin(\varphi(t))$: un DSP calcule les cosinus et sinus de l'angle $\varphi(t)$
- $\cos(\varphi(t))$ et $\sin(\varphi(t)) \Rightarrow e(t)$: ils sont multipliés par la porteuse $\cos(\omega_0 t)$ et la porteuse déphasée de 90° : $\sin(\omega_0 t)$

8)



10) le signal $i(t)$ obtenu a la même allure que celui relevé sur un mobile

Questionnaire



jean-philippe muller



1

- | Vrai | Faux |
|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

2

$$f_{RX} = 935 + 0,2.n \quad \text{pour} \quad 0 \leq n \leq 124$$

- [illegible]

3

- | Vrai | Faux |
|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

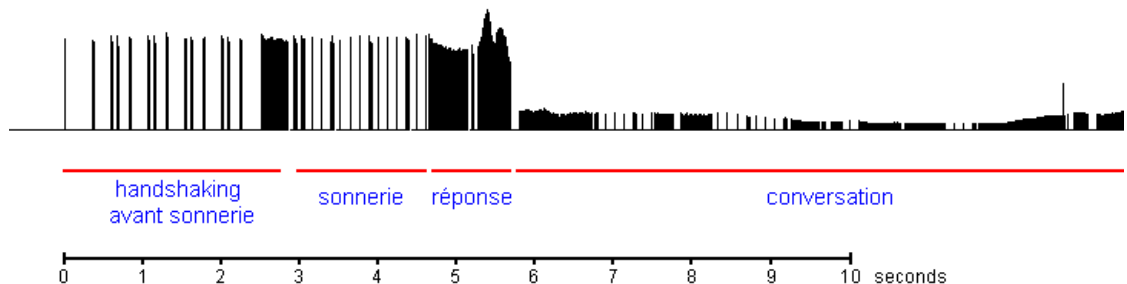
4

- [illegible]

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

	Vrai	Faux
a) le signal est modulé en AM 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, l'amplitude est constante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d) le signal binaire est filtré par un filtre gaussien pour améliorer la qualité audio	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e) le spectre du signal modulé tient entièrement dans le canal de 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"/>

6 L'enregistrement ci-dessous montre les salves émises par un mobile lors de l'établissement d'une communication téléphonique :

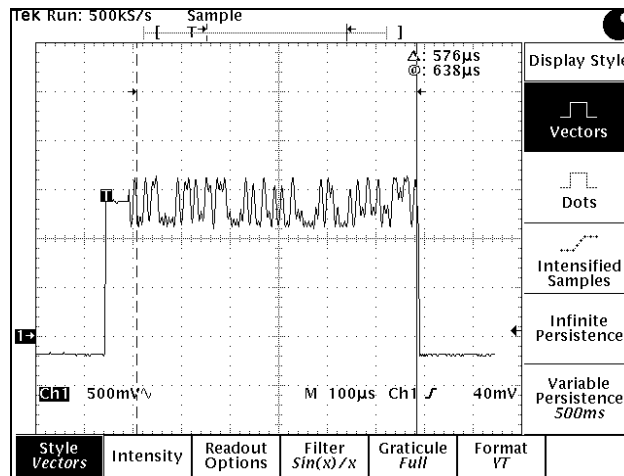


	Vrai	Faux
a) les échanges de signaux de contrôle se font à puissance élevée	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b) les émissions liées à la conversation se font toujours à puissance faible	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c) la puissance d'émission pour la conversation est ajustée par la base toutes les 30 mn	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d) le spectre ci-dessus est un spectre de raies	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e) on peut voir sur l'enregistrement les phases de parole et d'écoute de l'utilisateur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

7 Au cours d'une conversation téléphonique :

	Vrai	Faux
a) le mobile reçoit et émet simultanément les données vocales	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b) le mobile émet les données binaires durant 20% du temps	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c) le mobile passe alternativement en émission et en réception durant 1 time-slot	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d) la durée d'un time-slot d'émission est d'environ 570 μ s	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e) en réception, les circuits d'émission sont au repos pour minimiser sa consommation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
f) la puissance émise par le mobile est toujours la même, elle est fixée par le mobile	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
g) la courant que doit fournir la batterie est loin d'être constant	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
h) en-dehors des phases d'émission et de réception, le mobile est au repos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

8 L'enregistrement suivant montre le signal de commande du VCO produisant la porteuse modulée dans le mobile :



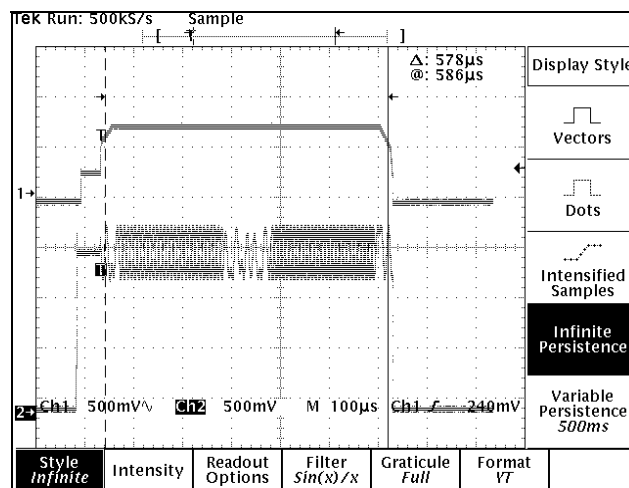
- a) ce signal correspond à une conversation d'environ 1 minute
- b) ce signal correspond à une salve transmise dans un time-slot
- c) ce signal est analogique car le mobile transmet la voix sous forme analogique
- d) ce signal est numérique, mais dégradé par les performances limitées du VCO
- e) ce signal est numérique, mais filtré volontairement pour améliorer la qualité audio

Vrai Faux

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

9 L'enregistrement suivant montre la superposition des signaux de commande du VCO pour un grand nombre de salves. On y distingue :

- une zone centrale, donc la composition en bits ne varie pas
- deux zones (avant et après) contenant des données variables



- a) les données vocales correspondent à la zone centrale
- b) la zone centrale est la « signature » de la station de base
- c) les bits de la zone centrale servent à tester la propagation entre base et mobile
- d) ce test sert au mobile pour définir le filtre d'égalisation

Vrai Faux

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

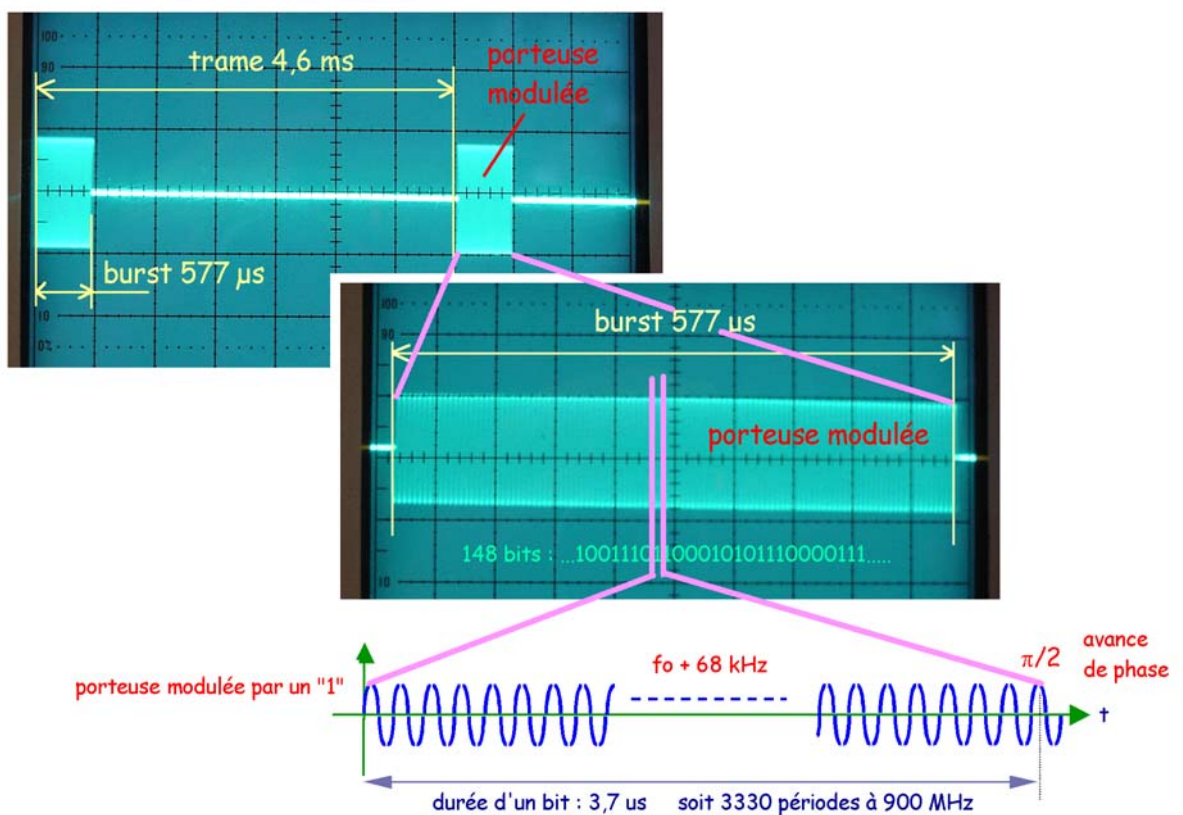
10 En début et fin d'émission de la salve, les propriétés du spectre du signal sont les suivantes :

- a) le spectre est plus large qu'au milieu de la salve
- b) la forme du spectre doit être maîtrisée pour une bonne réception du signal
- c) la montée en puissance se fait selon une courbe la plus linéaire possible
- d) la forme du profil de commande de la puissance est en mémoire dans le mobile
- e) le spectre en régime transitoire s'appelle « Spectrum due to switching »

Vrai Faux

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

11 L'oscillogramme d'une porteuse GSM de fréquence 900 MHz modulée par un flux de données numériques de durée $T_{\text{bit}} = 3,7 \mu\text{s}$ est donné ci-dessous. Les affirmations présentées par ce dessin sont elles justes ?



- a) cette émission pourrait être celle d'une voie balise
- b) l'émission est pulsée à 220 Hz environ
- c) un « 1 » correspond à la transmission de 3330,25 périodes de porteuse
- d) un « 0 » correspond à la transmission de 3329,75 périodes de porteuse
- e) pendant la transmission d'un bit, la phase glisse pour atteindre $\pm 90^\circ$ à la fin du bit

Vrai Faux

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



Réponses

N°	Réponses justes	Commentaires
1	a, e	b) Les cellules n'ont pas de forme précise et se recouvrent partiellement. Leur forme est floue, car liée à la portée du signal émis par la base. c) chaque cellule a obligatoirement sa station de base d) ce n'est pas une option, l'opérateur doit obligatoirement savoir dans quelle cellule se trouve l'utilisateur
2	b, e, f	a) les 124 fréquences sont à répartir entre la cellule et au moins 6 cellules voisines. Comme les cellules se recouvrent partiellement, il est impossible d'utiliser la même fréquence dans 2 cellules qui se touchent. c) d) une fréquence est réservée à la voie balise, il reste donc 9 fréquences à 8 time-slots, soit 72 conversations simultanées possibles
3	b, d	a) M mesure le niveau de la base pour détecter un éventuel changement de cellule c) ce n'est pas le mobile qui décide du changement de station de base, mais la base A
4	a, c, f	b) la com se fait toujours entre mobile et base, jamais de mobile à mobile d) la base ajuste la puissance du mobile pour bien le recevoir e) le mobile ne peut pas agir sur la puissance d'émission de la base. Simplement il informe la base de la qualité du signal qu'il reçoit de la base, et c'est le soft de la base qui décide d'ajuster sa puissance d'émission
5	b, f, g, h	a) la modulation du GSM est une modulation de fréquence c) le filtrage du signal binaire supprimant les fronts, la variation de fréquence ne peut pas se faire par sauts, mais elle est progressive d) le filtrage gaussien des données binaires permet de limiter l'encombrement spectral de la porteuse modulée, et n'agit pas sur la qualité e) malgré le filtrage, le spectre déborde largement du canal
6	a, e	b) la puissance est ajustée pour une bonne réception par la base, et peut atteindre la puissance max de 2W c) le temps de réponse de l'ajustement de puissance est de l'ordre de 5s d) ce n'est pas un spectre, mais un oscillogramme !
7	c, d, e, g	a) b) le mobile est alternativement en réception durant 1 time-slot, puis (3 time-slots plus tard) en émission durant 1 time-slot. Il émet donc 1/8 du temps soit 12,5% du temps. f) la puissance du mobile est ajustée par la base en permanence h) dans la trame, il y a 1 time-slot d'émission, 1 de réception mais aussi 1 de mesure de puissance des balises des cellules voisines (pour un éventuel changement de cellule si l'utilisateur du mobile se déplace).
8	b	a) la durée du signal est d'environ 576 μ s, il correspond donc à une salve émise durant 1 time-slot c) d) e) le signal est numérique, mais filtré volontairement pour limiter l'encombrement spectral
9	b, c, d	a) la zone centrale est la séquence de formation (26 bits) qui sert à tester la propagation (détection des échos) et à définir le filtre d'égalisation qui va supprimer ces échos à la sortie de l'étage de réception du mobile. Cela permet de diminuer le taux d'erreur lié aux trajets multiples.
10	a, b, d, e	c) la montée et la descente suivent un profil arrondi et pas linéaire
11	b, c, d, e	a) la voie balise émet en continu, et pas de manière pulsée