



Processus de transmission de la voix en GSM

Réalisé par les élèves ingénieurs

AHOLOUKPE Horace & AHOUANDJINOU Bill Dieumène Michaël

Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi – Université d'Abomey-Calavi

EPAC – UAC

Département de Génie Informatique et Télécommunications

25/05/2022

Table des matières

Introduction	1
A Les différents modes de fonctionnement du mobile	2
B Processus de transmission de la voix	3
B.1 La numérisation de la parole : échantillonnage, quantification et codage	3
B.2 La compression du signal numérisé	5
B.3 La modulation du signal compressé	6
B.4 La protection contre les erreurs	6
B.5 Cryptage	7
B.6 Multiplexage par TDMA statique	7
B.7 Multiplexage par FDMA dynamique	9
Conclusion	12
Liste des figures	13
Liste des tableaux	14
Références	15

Introduction

L'objectif premier des réseaux mobiles est de permettre et garantir au mieux l'échange d'informations entre interlocuteurs, que ce soit la voix, des images, des vidéos, et même l'accès à internet. Nous détaillons dans la suite le processus de transmission de la voix dans un réseau GSM.

A Les différents modes de fonctionnement du mobile

Lorsqu'un appel est en cours, le mobile est dit « connecté » au réseau via un canal bi-directionnel point à point appelé canal de trafic. Pour réduire le nombre de porteuses radios nécessaires à satisfaire un nombre donné d'abonnés, un canal de trafic n'est attribué à un mobile que pour la durée d'une communication. Il est relâché dès que la communication est terminée¹. Lorsqu'un canal de trafic est alloué à un mobile, celui-ci est dit être en mode dédié (Dedicated Mode). Lorsque le mobile est allumé mais qu'il n'est pas en communication, aucun canal de trafic ne lui est attribué et le mobile est dit être en mode veille (Idle Mode). En mode veille, le mobile doit rester en contact avec le réseau pour pouvoir être appelé. Le passage du mobile de l'état « Idle » à l'état « Dedicated » fait l'objet d'une certaine procédure d'accès. [2]

Lorsqu'il est en Idle Mode le mobile doit faire connaître constamment sa position (cellule actuelle) au réseau pour pouvoir être joignable. A intervalle de temps régulier la base de données VLR de la cellule où se retrouve le mobile est mise à jour. Lors d'un appel entrant un message de « Paging » est envoyé dans la cellule ou la LAC dans laquelle le mobile a été localisé dernièrement. En effet lorsqu'un MSC reçoit un appel pour un mobile dont il a la responsabilité, il envoie un message de « Paging » à tout les BSCs contrôlant la région concernée. Les BTS associées à ce BSC font alors suivre la commande de « Paging » vers les mobiles via le canal PAGCH. [2] Lorsque le mobile est en Dedicated Mode il est en communication et cela signifie qu'il exploite déjà les ressources du réseau. En raison de la mobilité, le mobile est aussi susceptible de devoir changer de cellule en cours d'appel². Le transfert du mobile d'une cellule à une autre en cours d'appel est assuré par l'algorithme de Handover. Ce dernier détecte la nécessité de devoir changer de cellule et ordonne le basculement de la communication d'un canal dans une cellule vers un autre canal dans l'autre cellule et ce, de manière non perceptible par le mobile.[2]

Présentation de l'interface Radio Les systèmes de téléphonie mobile GSM 900 et DCS 1800 fonctionnent respectivement à des fréquences voisines de 900 et 1800 MHz. Dans le cas du réseau GSM 900, la bande de fréquences comprise entre 890 et 915 MHz est utilisée pour la transmission du téléphone mobile vers l'antenne-relais, tandis que la bande comprise

1. Ce n'est pas le cas des réseaux de téléphonie fixe pour lesquels chaque terminal est connecté en permanence à un commutateur téléphonique, qu'il y ait un appel en cours ou pas

2. à 60 km/h par exemple, dans un réseau dont les cellules ont 1 km de diamètre, le changement de cellule se fait toutes les minutes

entre 935 et 960 MHz est utilisée dans le sens inverse. Dans la terminologie GSM, la transmission du téléphone mobile vers l'antenne-relais est appelée **voie montante** ou *up-link* et la transmission de l'antenne-relais vers le téléphone mobile est, quant à elle, appelée **voie descendante** ou *down-link* ». La communication entre le mobile et la BTS s'effectue toujours sur deux fréquences séparées de 45 MHz. Autrement dit, si la BTS envoie ses données à la fréquence f_1 , le mobile enverra ses données vers la BTS à la fréquence $f_1 - 45 MHz$.

TABLE 1 : Paramètres généraux de transmission en GSM

Paramètres	GSM	DSC
Bande Montante	890 à 915 MHz	1710 à 1785 MHz
Bande Descendante	935 à 960 MHz	1805 à 1880 MHz
TDMA	8 slots	8 slots
Ecart duplex	45 MHz 3 slots	95 MHz 3 slots
Rapidité de modulation	271 kbauds	271 kbauds
Débit parole / Débit info	13 kb/s/9.6 kb/s	13kb/s/9.6kb/s

Par ailleurs, on décale de 3 slots la voie montante de la voie descendante d'une communication. Ainsi, l'émission et la réception pour le même mobile, se fait ni à la même fréquence, ni en même temps. [4]

B Processus de transmission de la voix

B.1 La numérisation de la parole

Lorsque l'abonné parle, un microphone au niveau de son équipement mobile reçoit le signal analogique de sa voix. Le spectre vocal est compris entre 300 Hz et 3400 Hz . Ainsi nous sommes toujours dans les basses fréquences et donc ce signal ne peut être directement acheminé par le canal radio entre l'antenne du bloc émetteur-récepteur du téléphone mobile et l'antenne relai situé au niveau de la BTS. Ce signal subit donc une modulation qui a pour objectif d'adapter le signal à envoyer au canal de transmission. Cependant la modulation analogique ne garantissait pas une bonne qualité de voix à la réception et était beaucoup trop affectée par les perturbations. Ce problème a été résolu au niveau du GSM grâce à la numérisation du signal analogique issu de la parole, son codage et sa compression. Mais le

signal reçu au niveau du microphone ne comportant pas essentiellement le signal vocal on procède avant tout à un filtrage.

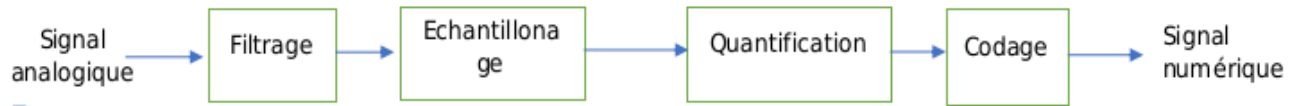


FIGURE 1 : Principe de numérisation

- **Le filtrage**

Afin de respecter le théorème de Shannon³, la fréquence d'entrée de l'échantillonneur est limitée à $3,1\text{ kHz}$. Limite permettant de transmettre la parole avec une distorsion assez faible.

- **Echantillonnage**

Il consiste à prélever, à des instants précis, les valeurs prises par le signal audio. On obtient ainsi un ensemble de valeurs discrètes. Les prélèvements se font généralement à des intervalles de temps constants. Cet intervalle de temps est alors appelé période d'échantillonnage. Son inverse est appelé fréquence d'échantillonnage. La parole est échantillonnée à 8 kHz .

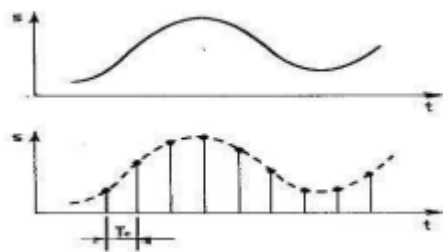


FIGURE 2 : Echantillonnage d'un signal continu

- **Quantification**

Elle est effectuée à la suite de l'échantillonnage et consiste à faire une approximation des valeurs des échantillons par des nombres choisis dans un ensemble fini. La gamme dynamique du signal d'entrée est décomposée en intervalles juxtaposés. Toutes les valeurs d'une plage d'entrée k donne une même sortie. La quantification introduit une

3. Fréquence d'échantillonnage au moins deux fois supérieure à la fréquence maximale du signal

perte d'information. C'est pour cela qu'on dit que tous les codeurs du signal de parole et audio font partie de codeur avec pertes. Du fait de la perte d'information introduite par la quantification, il est nécessaire d'évaluer sa performance. Cela se fait en calculant le rapport signal sur bruit. Le bruit étant la différence entre le signal quantifié et le signal original. La quantification est donc une opération consistant à représenter les amplitudes des échantillons par une valeur choisie parmi un ensemble fini. Outre la nécessité de la quantification pour numériser les données, elle est aussi un moyen de compression.

B.2 La compression du signal numérisé

[4] L'algorithme de compression de la parole est de type prédictif linéaire. La méthode utilisée est très complexe. Elle consiste à faire l'acquisition de 20 *ms* de parole, ce qui permet d'obtenir 160 échantillons ($8\text{ kHz} = 8000\text{ Hz}$ échantillons par seconde soit 160 échantillons en 20 *ms*). La norme GSM utilise un codeur dit **LPC-RPE** (Linear Predictive Coding and Regular Pulse Excitation). Les échantillons sont stockés en mémoire par blocs de 160 échantillons de 13 bits qui sont codés différemment. L'opération suivante consiste à fabriquer 4 blocs de 40 échantillons à partir des 160 de départ, en les entrelaçant : le premier bloc contient les échantillons 1, 5, 9, 13..., le deuxième, les échantillons 2, 6, 10... et ainsi de suite. Le bloc ayant le plus d'énergie est le seul à être conservé par le codeur. C'est la première compression effective. Une autre technique est ensuite appliquée pour finalement n'émettre que 260 bits par 20 *ms*, soit un débit binaire de 13 *kbps*, huit fois moindre qu'au début. Un tel type de compression n'agit pas échantillon par échantillon. Un échantillon de 13 bits n'est donc pas directement transformé en un message ayant moins de 13 bits. L'ensemble des 160 échantillons correspondant à 20 *ms* de parole sont transformés en un ensemble de paramètres, coefficients et signaux. Sans la connaissance de l'ensemble de ces données, il est impossible de retrouver un seul des 160 échantillons. Selon la signification de ces bits, le taux d'erreurs acceptable est différent. On définit alors trois classes de bits. Pour un bloc de 260 bits, on compte :

- 50 bits de classe Ia, bits très importants ne devant pas être erronés. En cas d'erreur, il ne faut surtout pas les utiliser au risque d'entraîner d'autres erreurs dans les blocs suivants. Il faut donc les sécuriser impérativement.
- 132 bits de classe Ib, devant avoir le moins d'erreurs possibles.
- 78 bits de classe II, ayant moins d'importance.

B.3 La modulation du signal compressé

L'émission d'une onde électromagnétique de forme purement sinusoïdale ne permet la transmission d'aucune information. Pour que l'information soit réellement transmise, il faut faire varier un des paramètres caractérisant la sinusoïde également appelée **porteuse**. Les trois paramètres sur lesquels il est possible d'agir sont : **l'amplitude, la fréquence ou la phase**. La modification de l'un de ces paramètres de la porteuse est effectuée à partir d'un signal appelé **modulant** qui est l'information à transmettre. Dans notre cas, il s'agit de la voix. Ce processus est appelé la **modulation**.

Le réseau GSM utilise la modulation **GMSK** (Gaussian Minimum Shift Keying) qui est une forme évoluée de la modulation **FSK** (Frequency Shift Keying). Elle est réalisée en faisant passer le signal binaire, avant modulation, au travers d'un filtre passe-bas. Ce filtre remplace les fronts montants et descendants par une transition progressive, ce qui diminue la largeur spectrale du signal modulé. Il en résulte que, pour un même débit binaire, la modulation **GMSK** a comme avantage d'occuper une largeur de bande moins importante que la modulation **FSK** classique. Une porteuse GSM modulée occupe une largeur de bande de 200 kHz et une rapidité de modulation de 271 kbauds . [4]

B.4 La protection contre les erreurs

La protection apportée aux bits d'un paquet va dépendre de leur classe. On ajoute un code à redondance cyclique (CRC) de 3 bits aux 50 bits de classe Ia afin de détecter d'éventuelles erreurs. Puis on ajoute les 132 bits de classe Ib auxquels on ajoute encore 4 bits de protection (*tail bits*). On obtient alors 189 bits. On applique, au tout, un codage convolutionnel, de type Viterbi $\frac{1}{2}$. Ce codage ajoute de la redondance au signal. Dans ce cas le taux $\frac{1}{2}$ indique que pour chaque bit à transmettre, on en transmettra deux. Le nombre de bits à transmettre est donc doublé, soit 378. La redondance, ici de 100%, permet de corriger jusqu'à trois erreurs par paquet. On ajoute alors les 78 bits de classe II, pour obtenir un total de 456 bits pour 20 ms . Le débit d'information comprimée et protégée devient alors 22.8 kbps . La redondance insérée par le codage de Viterbi est telle que deux bits qui se suivent, portent la même information. Sachant que les erreurs arrivent en général par paquet, il est fort probable que si un bit est erroné, le bit redondant le sera également. En conséquence, le codage de Viterbi n'a que peu d'intérêt tel qu'il est. Il serait intéressant alors, de séparer les bits redondants les uns des autres. Pour cela, on entrelace le paquet en utilisant une matrice de taille 8×57 (8 en

entrée, 57 en sortie). Cet entrelacement permet d'étaler la redondance insérée par le codage de Viterbi. Il y a alors 57 bits entre deux bits redondants. On obtient ainsi 8 paquets de 57 bits pour 20 ms de parole, soit un débit de 22.8 kbps.

B.5 Cryptage

Il est bien sûr nécessaire de garantir un certain niveau de confidentialité et d'authentifier l'abonné. Toutefois il ne peut pas être envisagé d'utiliser les techniques à clef publique comme RSA, dont la mise en œuvre serait bien trop coûteuse. Les techniques nécessitant donc des échanges de clefs et ne sont pas explicitées par les constructeurs de réseaux.

B.6 Multiplexage par TDMA statique

Une liaison entre un téléphone mobile et une antenne-relais utilise deux canaux de transmission : un pour la voie montante et un pour la voie descendante. Un canal est constitué d'une onde radio (la porteuse) dont la fréquence varie dans une plage de 200 kHz de largeur et pendant un huitième du temps. La figure 3 illustre le principe utilisé : une antenne-relais transmet vers 3 téléphones mobiles, notés P1, P2 et P3, au moyen d'une porteuse dont la fréquence nominale est comprise entre 935 et 960 MHz (cas du GSM 900). Cette fréquence nominale est de 950 MHz dans l'exemple de la figure 3. Le message binaire module la fréquence instantanée de la porteuse dans une plage étroite centrée autour de la fréquence nominale. La porteuse ainsi modulée occupe une largeur de 200 kHz comprise entre 949,9 et 950,1 MHz. Durant un premier intervalle de temps T1, d'une durée de 577 s, la porteuse est utilisée pour transmettre vers le téléphone P1 ; cet intervalle de temps est appelé « time slot » dans la terminologie GSM. Ensuite, le téléphone P2 reçoit pendant le second « time slot » T2. De la même manière, le téléphone P3 recevra les informations qui lui sont destinées pendant le troisième « time slot » T3, et ainsi de suite s'il y a d'autres téléphones mobiles dans la cellule. Une porteuse peut ainsi être partagée par 8 téléphones mobiles. A la fin du « time slot » T1, le téléphone P1 devra attendre pendant 7 « time slots » avant de recevoir à nouveau. La transmission d'un canal (c'est-à-dire une conversation) se fait donc de manière discontinue. Ce procédé est appelé **multiplexage temporel** ou encore *time division multiple access* (TDMA). Il est à noter que cette transmission « saccadée » n'est pas perceptible pour l'utilisateur, car la transmission pendant un « time slot » s'effectue à un débit 8 fois supérieur à celui correspondant à la restitution du signal, autrement dit, la transmission vers

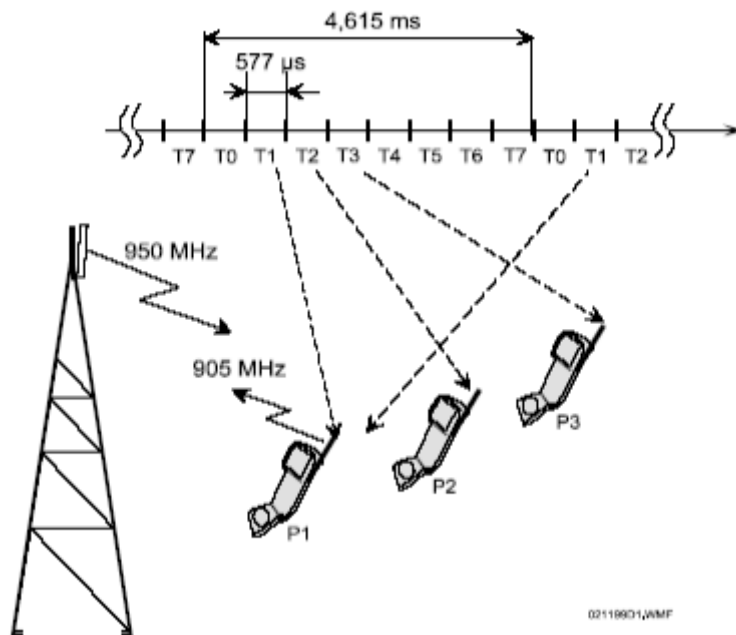


FIGURE 3 : Principe du TDMA statique

le téléphone P1 s'effectue pendant le « time slot » T1 et la restitution du signal vocal occupe 8 « time slots » (c'est-à-dire 4,615 ms). La figure 4 illustre ce processus. Nous présentons

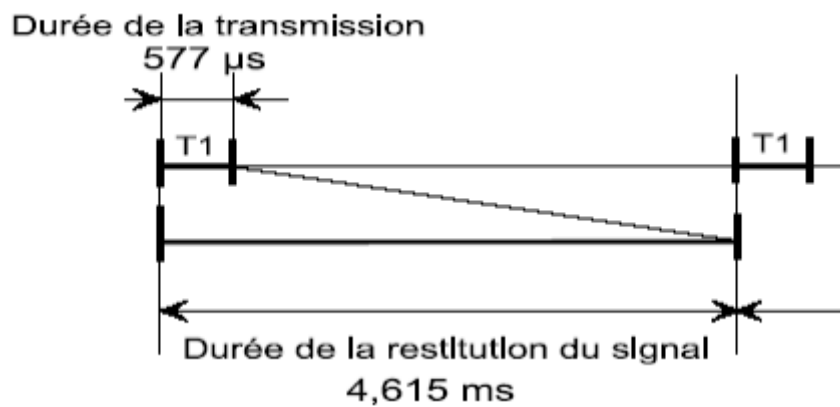


FIGURE 4 : Comparaison de la durée d'un time slot à la durée de restitution

ci-dessous le format des bits transmis pendant un « time slot ». Il comprend un train de 148 bits d'une durée de $3,7 \mu\text{s}$, ce qui correspond à $547,6 \mu\text{s}$. Ce train de 148 bits est appelé « burst » ; il comporte :

- 3 bits d'en-tête et de queue : permettent d'« entourer » le burst
- Au centre, 26 bits : une séquence d'apprentissage pseudo-aléatoire. Par un calcul d'intercorrelation, cette séquence permet de retrouver le centre du burst et de synchroniser la lecture des données à la réception.
- Temps mort de 8,25 bits. Pendant cette durée, aucune information n'est réellement transmise. Sachant qu'un mobile peut être à 70km d'une BTS, le retard de propagation varie. Ce temps mort permet de prendre en compte le retard d'arrivée du burst du fait de la distance
- Deux paquets de données de 57 bits, suivis ou précédés par 1 bit de préemption. L'utilité de ce bit sera vue dans le paragraphe sur les canaux logiques

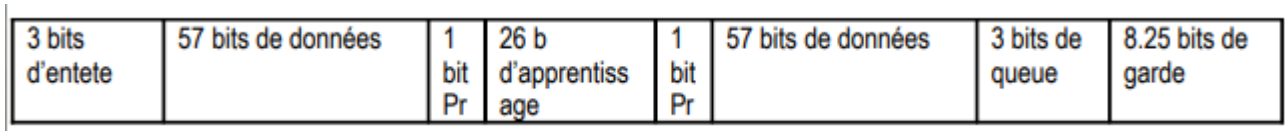


FIGURE 5 : Illustration des bits transmis pendant un Time Slot

B.7 Multiplexage par FDMA dynamique

Face au fading de Rayleigh, le FDMA dynamique a été mis en place. Ce saut en fréquence permet de ne pas rester sur un noeud pour deux intervalles de temps successifs. De plus, il assure un début de confidentialité de la communication. La fréquence de transmission, entre un téléphone mobile et une BTS, est modifiée à chaque « burst ». La figure 6 correspond au cas où la BTS utilise 3 porteuses de fréquence f_1 , f_2 et f_3 . Chaque porteuse comporte 8 « time slots » c'est-à-dire 8 bursts numérotés de 0 à 7. Le 1er « burst » est transmis à la fréquence f_1 , le 2ème (c'est-à-dire 8 « time slots » plus tard) à la fréquence f_2 , le 3ème à la fréquence f_3 . Pour les 4ème, 5ème et 6ème « bursts », on recommence le cycle f_1 , f_2 , f_3 , et ainsi de suite.

Le procédé est appelé « frequency hopping » en anglais ; il a comme avantage d'offrir une transmission dont la qualité moyenne est améliorée. En effet, en pratique, la qualité d'une liaison radio (mesurée par le taux d'erreurs) peut varier avec la fréquence de la porteuse. Dans l'exemple de la figure 8, il se pourrait que la réception sur f_3 soit de moins bonne qualité que sur f_1 et f_2 et cela pour deux raisons :

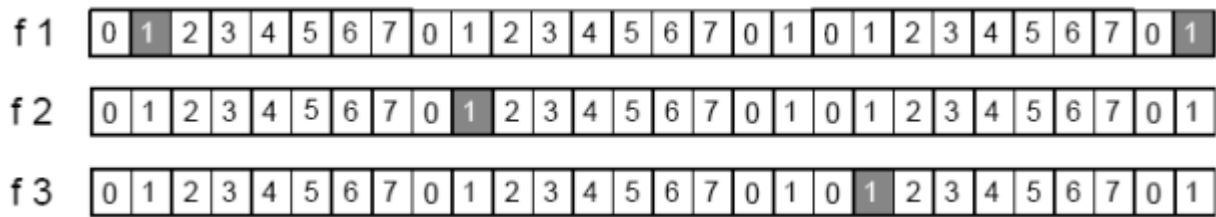


FIGURE 6 : Illustration des bits transmis pendant un Time Slot

- Il est possible qu'une autre BTS (ou tout autre émetteur) situé à bonne distance, utilise également cette fréquence f3, ce qui a pour effet que tous les téléphones mobiles recevant la fréquence f3 captent, à la fois, les signaux de la BTS la plus proche et ceux de la BTS éloignée émettant à cette fréquence f3... En cas de perturbations importantes, la fréquence f3 pourrait même devenir inutilisable.
- Les réflexions sur le sol et sur les bâtiments donnent lieu à un régime d'ondes stationnaires (ou quasi stationnaires) caractérisé par des ventres de vibrations (l'amplitude du champ y est maximale) et des noeuds de vibrations où le champ est nul dans le cas d'un régime purement stationnaire. Rappelons également que la distance séparant un ventre d'un noeud est égale à un quart de la longueur d'onde, soit environ 8 cm à la fréquence de 900 MHz; cette distance dépend donc de la fréquence de la porteuse et il en découle que la position des ventres et des noeuds varie avec la fréquence. Il est donc possible que le téléphone mobile se trouve, précisément, en un point P correspondant à un noeud de vibrations pour la fréquence f3; si c'est le cas, il peu probable que ce point P soit également un noeud aux fréquences f1 et f2.

Une communication utilisant des fréquences différentes pour la transmission des « bursts » successifs bénéficiera d'une qualité moyenne nettement plus constante que si la fréquence de la porteuse était fixe. Dans notre exemple, la qualité moyenne d'une communication utilisant successivement les fréquences f1, f2 et f3 sera forcément moins bonne que si seulement f1 ou f2 étaient utilisées; par contre elle sera supérieure à la qualité de la transmission à la fréquence f3. Ajoutons également que les algorithmes de détection et de correction d'erreurs sont très performants lorsque le taux d'erreurs reste faible. A l'inverse, au-delà d'un certain seuil, aucune correction n'est plus possible est les bit reçus sont perdus. L'utilisation du saut de fréquence apporte donc un gain en performance substantiel, pour autant, bien sûr, que la qualité moyenne ne tombe pas sous le seuil où l'algorithme de correction d'erreurs n'est plus

en mesure de fonctionner efficacement. Le saut de fréquence est utilisé, à la fois, pour les voies montantes et descendantes. Par exemple, avec le GSM 900, si la BTS transmet le 1er « burst » à la fréquence f_1 , la réponse du téléphone mobile sera transmise à la fréquence $f_1 - 45$ MHz. Pour le 2ème « burst » transmis à la fréquence f_2 , la réponse du téléphone mobile sera transmise à la fréquence $f_2 - 45$ MHz, et ainsi de suite pour les « bursts » suivants.

La figure 7 résume le processus de transmission de la voix en GSM.

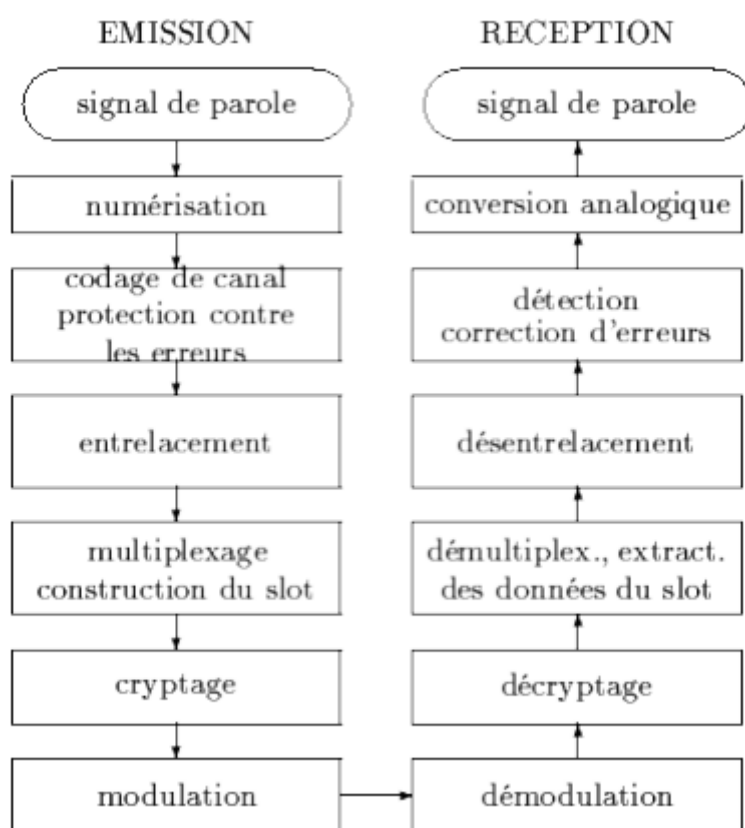


FIGURE 7 : Echantillonnage d'un signal continu

Conclusion

Pour transmettre la voix en GSM, une suite d'opérations est effectuée, à partir de la numérisation du signal, sa modulation puis son envoi. Pour ce qui est de la dernière opération, plusieurs protocoles sont utilisés pour permettre l'utilisation de la même ressource par les abonnés.

Table des figures

1	Principe de numérisation	4
2	Echantillonnage d'un signal continu	4
3	Principe du TDMA statique	8
4	Compraison de la durée d'un time slot à la durée de restitution	8
5	Illustration des bits transmis pendant un Time Slot	9
6	Illustration des bits transmis pendant un Time Slot	10
7	Echantillonnage d'un signal continu	11

Liste des tableaux

1	Paramètres généraux de transmission en GSM	3
---	--	---

Références bibliographiques

- 1 RATSIMBAZAFY Samoela Fitahianjanahary, Le codage de la parole en GSM et les Schémas de codage en GPRS, Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur, 11 Décembre 2007
- 2 thierry.jesupret@thalesaleniaspace.com, Le système GSM
- 3 TONYE Emmanuel & EWOUSSOUA Landry, PLANIFICATION ET INGENIEURIE DES RESEAUX DE TELECOMS, Séquence 3 : Gestion de l'itinérance, de la sécurité et des appels,
- 4 Chatellerault, Principes de fonctionnement des réseaux mobiles : Application au GSM, I.U.T.de Poitiers, Département de Réseau Télécom, 2010-2011