

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES RESEAUX DE TELEPHONIE MOBILE GSM

ir. Willy PIRARD (*)

1. SCHEMA GENERAL D'UN RESEAU DE TELEPHONIE MOBILE - OBJET DE L'EXPOSE

La figure 1 représente le schéma général d'une communication entre un téléphone mobile GSM et un téléphone fixe ; cette communication repose sur :

- une liaison radio entre le téléphone mobile et une antenne-relais généralement installée sur un pylône ou un bâtiment ;
- une liaison entre l'antenne-relais et le téléphone fixe, essentiellement via des câbles et différents équipements faisant partie du réseau de téléphonie mobile GSM (ci-après « le réseau GSM ») et du réseau fixe.

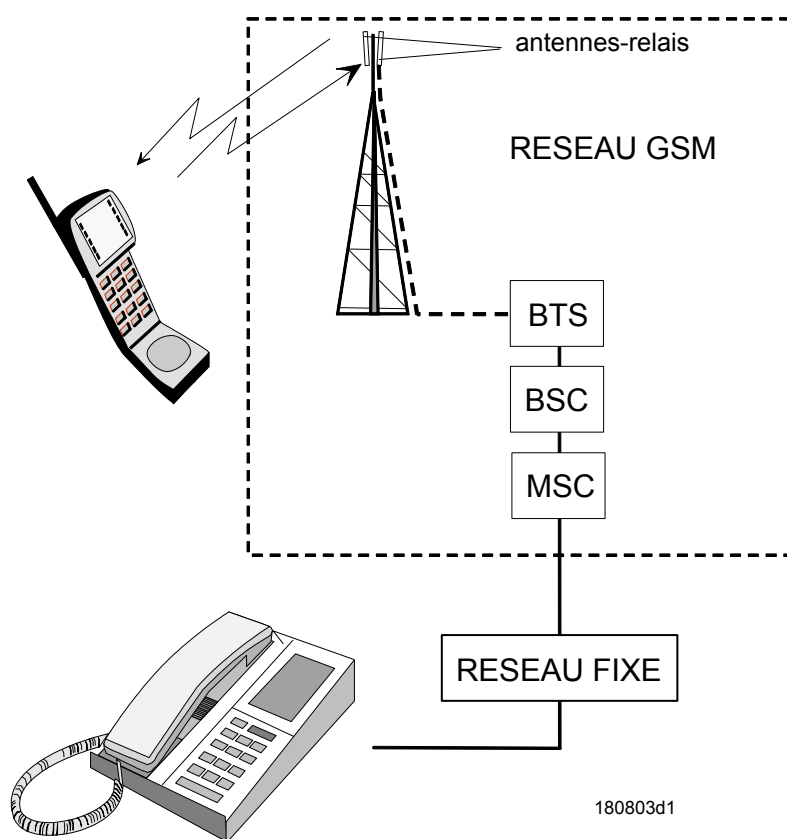


Figure 1 : Schéma général d'une liaison entre un téléphone mobile GSM et un téléphone fixe

(*) Institut Scientifique de Service Public (ISSEP) - 200, rue du Chéra, B-4000 Liège
 Tél : 04/229 82 35 Fax : 04/252 46 65 e-mail : w.pirard@issep.be

Les équipements du réseau GSM comprennent :

a) Des BTS (Base Transceiver System)

Il s'agit des antennes et des équipements électroniques (amplificateurs, alimentations, ...) installés à proximité de celles-ci. Chaque BTS réalise la couverture radio d'un certain territoire (appelé « cellule ») dont le rayon varie entre quelques centaines de mètres et quelques kilomètres. La couverture du territoire de la Belgique nécessite plusieurs milliers de BTS pour chaque opérateur.

b) Des BSC (Base Station Controlers)

Chaque BSC contrôle un certain nombre de BTS ; il constitue un nœud de communications vers et en provenance de ces BTS. La connexion entre les BTS et le BSC est une liaison à haut débit (2 Mbit/s) qui peut être réalisée par un câble (ligne louée) ou par un faisceau hertzien consistant en une transmission par ondes radio à une fréquence très élevée (supérieure à 15 GHz dans le cas des opérateurs de téléphonie mobile).

c) Un MSC (Mobile Switching Center)

Il n'y a qu'un MSC par réseau GSM ; il s'agit essentiellement d'un commutateur qui constitue le nœud central du réseau de téléphonie mobile ; il est connecté au réseau de téléphonie fixe, ainsi qu'aux réseaux GSM des opérateurs concurrents. Le MSC comporte des équipements informatiques qui gèrent l'acheminement des informations à travers le réseau GSM. C'est également le MSC qui permet de connaître, à tout moment, la localisation d'un téléphone mobile dans le réseau. En principe, la connexion entre le MSC et le BSC est réalisée au moyen de câbles.

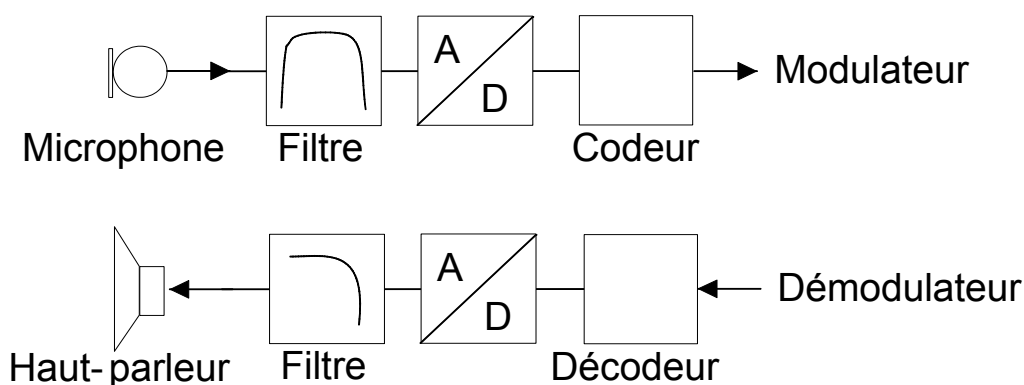
Une communication entre un téléphone mobile GSM et un téléphone fixe transite donc via une BTS, un BSC, le MSC et le réseau fixe. De même, une communication entre deux téléphones mobiles X et Y passera par la BTS la plus proche du téléphone X, un BSC, le MSC, un second BSC, la BTS la plus proche du téléphone Y (le second BSC étant celui auquel la seconde BTS est reliée). Il est à noter qu'une communication entre deux téléphones mobiles très proches (abonnés d'un même opérateur) ne s'effectue jamais en « ligne directe », mais remonte toujours jusqu'à la BTS, le BSC et le MSC.

Le présent exposé se limite au principe général de fonctionnement du réseau GSM et décrit plus particulièrement la liaison radio entre le téléphone mobile et la BTS, laquelle fait appel à des techniques relativement complexes. On trouvera, notamment dans [1], une information plus complète sur le sujet.

N.B. : Dans la suite de l'exposé, l'appellation « Réseau GSM » concerne ses deux variantes GSM 900 et DCS 1800 (cette dernière est également appelée « GSM 1800 »). Les deux variantes fonctionnent sur le même principe et offrent les mêmes fonctions. La seule différence est la bande de fréquences qui se situe autour de 900 MHz pour le GSM 900 et 1800 MHz pour le DCS 1800. Dans la plupart des pays, chaque opérateur a reçu une licence pour émettre dans les deux bandes, celle du DCS 1800 n'étant utilisée que dans les zones à forte concentration d'abonnés où le réseau GSM 900 est saturé.

2. NUMERISATION DE LA VOIX

Les informations véhiculées via le réseau GSM sont transmises sous forme numérique, qu'il s'agisse d'une conversation téléphonique ou de données (SMS, accès au réseau Internet, ...). Le signal délivré par le microphone d'un téléphone mobile est un signal analogique qui est converti en un signal numérique constitué d'un « train » d'impulsions valant 0 ou 1. De même, le signal analogique fourni aux bornes de l'écouteur a été transmis sous forme numérique et a été retransformé en signal analogique par un convertisseur numérique-analogique.



200803d2

Figure 2 : Numérisation de la voix

La figure 2 décrit le processus de numérisation. Le signal de sortie du microphone subit un filtrage par un « passe-bande » 300 Hz–3,4 KHz et est ensuite échantillonné par un convertisseur analogique – numérique 13 bit à la cadence de 8.000 échantillons par seconde, ce qui donne un débit numérique de 104 kbit/s. La transmission d'un tel débit nécessiterait une bande passante beaucoup trop large. Les données binaires passent donc dans un codeur qui réalise deux fonctions :

- éliminer des données redondantes de manière à réduire le débit à transmettre ;
- ajouter des codes permettant la détection et la correction d'erreurs apparaissant lors de la transmission.

A la sortie du codeur, le débit binaire n'est plus que de 22,8 kbit/s, soit près de cinq fois moins ; la description du fonctionnement de ce codeur sort du cadre de cet exposé.

Un principe inverse est utilisé à la réception. Le signal binaire à 22,8 kbit/s provenant du démodulateur (récepteur radio) est décodé pour reconstituer un signal numérique à 104 kbit/s, lequel est transformé en un signal analogique par un convertisseur numérique – analogique ; ce signal subit un filtrage par un « passe-bas » dont la fréquence de coupure est de 4 kHz ; il alimente l'écouteur du téléphone mobile.

3. TRANSMISSION PAR ONDES RADIO

La transmission entre le téléphone mobile et la BTS utilise une onde radio ; comme toute onde électromagnétique, elle comprend un champ électrique et un champ magnétique orientés perpendiculairement entre eux, ainsi qu'à la direction de propagation, comme illustré à la figure 3 ; ces champs varient sinusoïdalement dans l'espace et dans le temps. Les deux composantes de l'onde sont liées entre elles par la relation de proportionnalité suivante :

$$\frac{E}{H} = Z \quad (1)$$

où :

- E : intensité du champ électrique en volts/mètre (V/m)
- H : intensité du champ magnétique ampères par mètre (A/m)
- Z : impédance caractéristique du milieu où l'onde se propage en ohms (Ω)

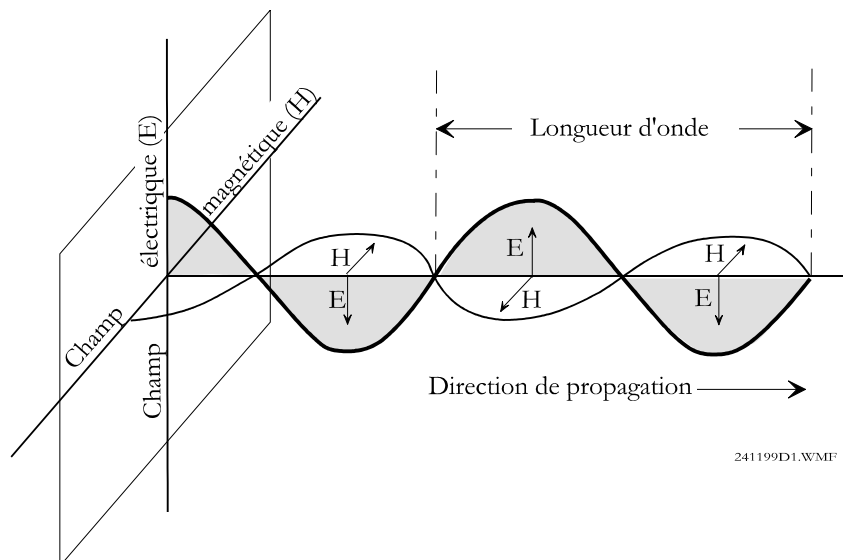


Figure 3 : Onde électromagnétique plane

L'impédance caractéristique vaut 377 Ω dans l'air, d'où :

$$\frac{E}{H} = 377 \Omega \quad (2)$$

Comme le montre la figure 3, l'intensité des champs électrique et magnétique présente une périodicité spatiale dont la longueur d'onde (c'est-à-dire la distance minimale entre deux points vibrant en phase) est liée à la fréquence du signal par la relation :

$$\lambda = \text{Erreur !} \quad (3)$$

où :

λ : longueur d'onde (en m)

f : fréquence (en MHz)

La densité de puissance S d'une onde plane (en W/m²) est définie comme étant la puissance qui traverse une surface de 1 m² perpendiculaire à la direction de propagation ; elle est donnée par :

$$S = E \cdot H \quad (4)$$

Compte tenu de la relation (2), lorsque l'onde se propage dans l'air, on peut écrire que :

$$S = \frac{E^2}{377} = 377 H^2 \quad (5)$$

Comme la puissance est transportée dans la direction de propagation, on peut représenter le flux de puissance par un vecteur **S** pointant dans cette direction : il est appelé vecteur de Poynting.

En principe, les relations (1), (2) et (5) ne sont valables que pour une onde plane, c'est-à-dire lorsqu'on est suffisamment loin de la source d'émission. Dans cette zone, la connaissance d'une des trois grandeurs (E, H ou S) permet, par simple calcul, de déterminer les autres grandeurs.

4. BANDES DE FREQUENCES

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 880 et 915 MHz est utilisée pour la transmission du téléphone mobile vers l'antenne-relais, tandis que la bande comprise entre 925 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 » ; la transmission de l'antenne-relais vers le téléphone mobile est, quant à elle, appelée « voie descendante » ou « down-link ».

Il faut signaler que les deux bandes de 10 MHz comprises entre 880 et 890 MHz, d'une part, et entre 925 et 935 MHz, d'autre part, sont souvent appelées « extended bands » pour des raisons historiques, car attribuées, à la téléphonie mobile, dans un second temps.

De manière similaire, les voies montantes et descendantes du DCS 1800 utilisent les bandes comprises entre 1710 et 1785 MHz, d'une part, et entre 1805 et 1880 MHz, d'autre part. L'affectation des différentes bandes est résumée dans le tableau 1.

Les fréquences utilisables, ainsi que les bandes passantes associées, sont normalisées au niveau international ; elles sont en nombre strictement limité et sont allouées, en Belgique, par l'IBPT (Institut Belge des Postes et des Télécommunications).

Tableau 1
Bandes de fréquences des réseaux GSM 900 et DCS 1800

Normes	Voies	Bandes de fréquences (MHz)
GSM	Montante	890 - 915
	Descendante	935 - 960
GSM (« extended bands »)	Montante	880 - 890
	Descendante	925 - 935
DCS 1800	Montante	1.710 - 1.785
	Descendante	1.805 - 1.880

5. MODULATION

L'émission d'une onde électromagnétique de forme purement sinusoïdale ne permet la transmission d'aucune information ; pour que ce soit possible, il faut faire varier un des paramètres caractérisant la sinusoïde ; cette sinusoïde est appelée « fréquence porteuse » ou simplement « porteuse ». Les trois paramètres sur lesquels il est possible d'agir sont : l'amplitude, la fréquence ou la phase ; ce processus est appelé « modulation ».

La figure 4 représente les trois types de modulation dans le cas de signaux binaires (c'est-à-dire 1 ou 0) ; le diagramme A de la figure 4 est une modulation d'amplitude de type « tout ou rien ». La transmission du bit 0 correspond à l'absence de porteuse. Inversement, le bit 1 correspond à la présence de la porteuse.

N.B. : La modulation d'amplitude est utilisée, depuis très longtemps, pour la transmission de signaux analogiques ; dans ce cas, l'amplitude de la porteuse varie en fonction de l'amplitude du signal à transmettre.

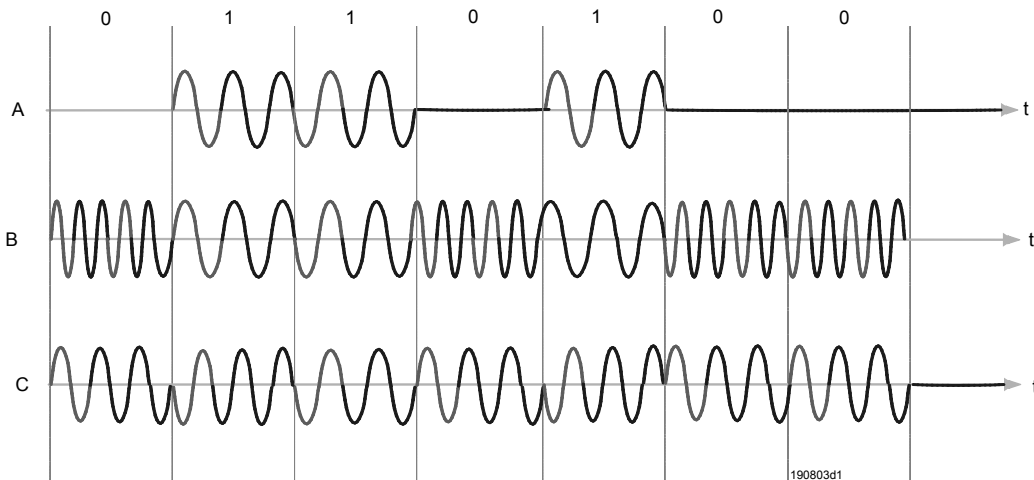


Figure 4 : Modulations d'amplitude, de fréquence et de phase

Le diagramme B de la figure 4 décrit le principe de la modulation de fréquence de type « tout ou rien » ; elle est désignée par l'abréviation FSK pour « frequency shift keying ». La transmission des bits 0 et 1 correspond à l'émission de deux fréquences différentes. Le réseau GSM utilise la modulation GMSK (pour « gaussian minimum shift keying ») qui est une forme évoluée de la modulation FSK ; elle est réalisée en faisant passer le signal binaire, avant modulation, au travers d'un filtre passe-bas ; ce filtre passe-bas 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 200 kHz (100 kHz de chaque côté de la fréquence de la porteuse non modulée).

Le diagramme C de la figure 4 correspond à la modulation de phase, donnée ici pour information. Les bit 0 et 1 sont transmis en faisant varier la phase de la porteuse.

6. MULTIPLEXAGE TEMPOREL - CANAUX DE TRANSMISSION

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 5 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 925 et 960 MHz (cas du GSM 900). Cette fréquence nominale est de 950 MHz dans l'exemple de la figure 5. Le message binaire (constitué de 0 et de 1) 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.

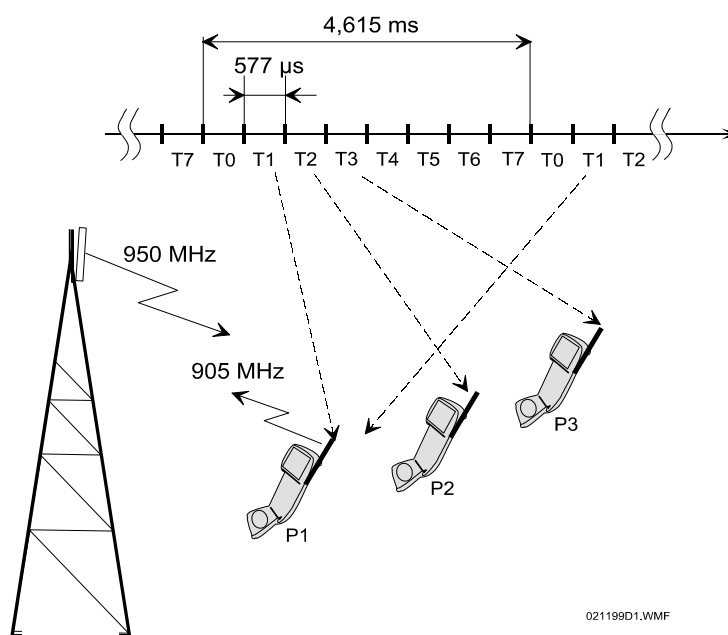


Figure 5 : Canal de transmission GSM

Durant un premier intervalle de temps T1, d'une durée de 577 µs, 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 téléphone mobiles dans la cellule. Une porteuse peut ainsi être partagée par 8 téléphone 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 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 6 illustre ce processus.

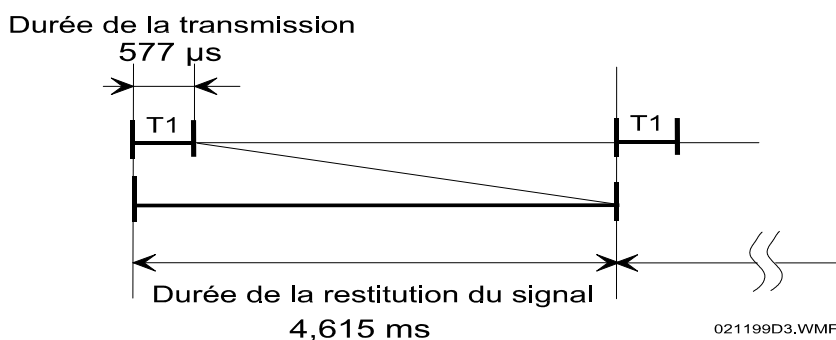


Figure 6 : Durées de transmission et de restitution

La figure 7 présente le format des bit transmis pendant un « time slot ». Il comprend un train de 148 bit d'une durée de 3,7 μ s, ce qui correspond à 547,6 μ s. Ce train de 148 bit est appelé « burst » ; il comporte :

- 2 séries de 58 bit contenant l'information utile (voix numérisée ou données) ;
- 2 séries de 3 bit de synchronisation en début et en fin de « time slot » ;
- 1 séquence de 26 bit fixes (connus du téléphone mobile et de la BTS) sont utilisés pour corriger l'altération des signaux due aux trajets multiples (voir § 13).

La durée d'un « time slot » étant de 577 μ s, le train de 148 bit est en fait suivi d'une interruption de la transmission (appelée « Guard period »), d'une durée de 29,4 μ s, et dont le but est de séparer le contenu de 2 « time slots » successifs.

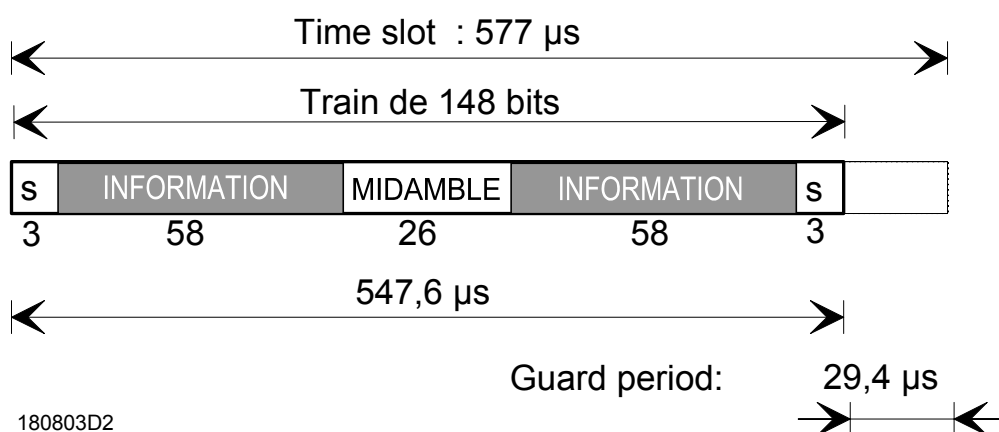


Figure 7 : Structure d'un « burst GSM »

7. SAUT DE FREQUENCE

La fréquence de transmission, entre un téléphone mobile et une BTS, est modifiée à chaque « burst ». La figure 8 correspond au cas où la BTS utilise 3 porteuses de fréquence f1, f2 et f3. Chaque porteuse comporte 8 « time slots » numérotés de 0 à 7. Le 1^{er} « burst » est transmis à la fréquence f1, le 2^{ème} (c'est-à-dire 8 « time slots » plus tard) à la fréquence f2, le 3^{ème} à la fréquence f3. Pour les 4^{ème}, 5^{ème} et 6^{ème} « bursts », on recommence le cycle f1, f2, f3, et ainsi de suite.

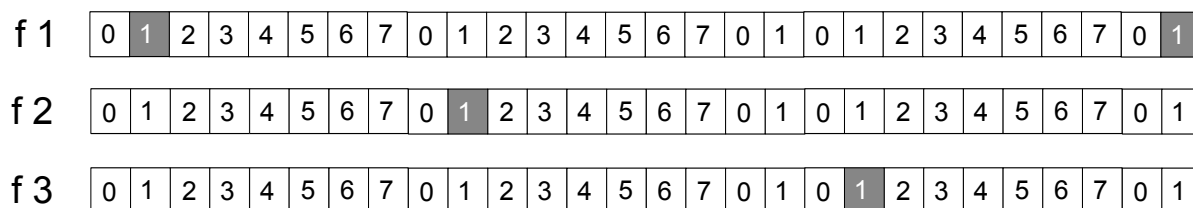


Figure 8 : Saut de fréquence

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 :

- a) Il est possible qu'une autre BTS (ou tout autre émetteur) situé à bonne distance, utilise également cette fréquence f_3 , ce qui a pour effet que tous les téléphones mobiles recevant la fréquence f_3 captent, à la fois, les signaux de la BTS la plus proche et ceux de la BTS éloignée émettant à cette fréquence f_3 . Si la transmission entre BTS s'effectuait à une fréquence fixe (f_1 , f_2 ou f_3 dans notre exemple), les téléphones mobiles utilisant la fréquence f_1 ou f_2 bénéficieraient d'une communication de bonne qualité, alors que ceux fonctionnant à la fréquence f_3 seraient perturbés. En cas de perturbations importantes, la fréquence f_3 pourrait même devenir inutilisable.
- b) 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 nœuds 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 nœud 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 nœuds varie avec la fréquence. Il est donc possible que le téléphone mobile se trouve, précisément, en un point P correspondant à un nœud de vibrations pour la fréquence f_3 ; si c'est le cas, il est peu probable que ce point P soit également un nœud aux fréquences f_1 et f_2 .

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 f_1 , f_2 et f_3 sera forcément moins bonne que si seulement f_1 ou f_2 étaient utilisées ; par contre elle sera supérieure à la qualité de la transmission à la fréquence f_3 .

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 et les bits 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 montante et descendante. Par exemple, avec le GSM 900, si la BTS transmet le 1^{er} « burst » à la fréquence f_1 , la réponse du téléphone mobile sera transmise à la fréquence $f_1 - 45$ MHz. Pour le 2^{ème} « 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.

En pratique, une BTS GSM utilise au moins trois ou quatre fréquences sur lesquelles les sauts peuvent être effectués. Il existe même des réseaux GSM dans lesquels la porteuse réalise des sauts sur 20 fréquences différentes.

Le saut de fréquence est en fait une option qui n'était guère utilisée lors de la mise en service des premiers réseaux GSM (au début des années 90) ; aujourd'hui, elle est largement employée, car ses avantages sont appréciables lorsque les réseaux se densifient, ce qui accroît la probabilité d'être perturbé par une BTS voisine.

N.B. : *Le saut de fréquence est une technique connue depuis de nombreuses années, mais dont l'usage était réservé aux applications militaires où elle rendait très difficile, à la fois l'écoute et le brouillage d'une communication par l'ennemi. En ce qui concerne l'écoute, elle n'était possible que si la fréquence d'accord du récepteur réalisait des sauts identiques et en synchronisme avec ceux de l'émetteur. Pour le brouillage, la bande de fréquences à perturber pouvait être tellement large que cela devenait techniquement impossible.*

8. ARCHITECTURE CELLULAIRE

La couverture de la zone pour laquelle un opérateur a obtenu une licence est réalisée à partir d'un maillage constitué de cellules de forme hexagonale (figure 9) au centre desquelles est installée une seule antenne si celle-ci est du type omnidirectionnelle. L'élément hexagonal peut être subdivisé en trois cellules si l'antenne omnidirectionnelle est remplacée par trois antennes directives (figure 10). On obtient ainsi des cellules dont la forme théorique est celle d'un losange ; cette solution permet de tripler la capacité du réseau tout en conservant le même nombre de sites d'antennes.

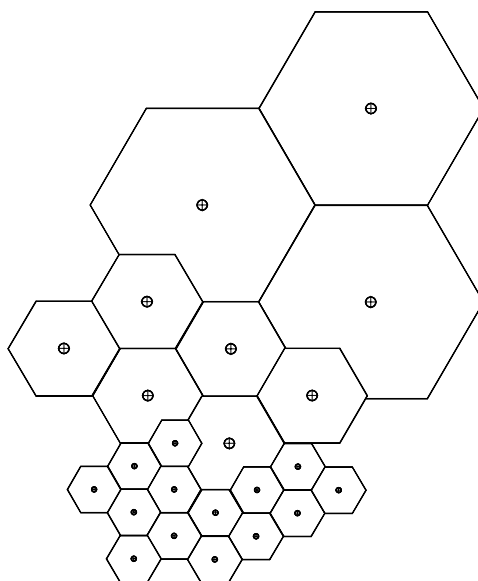


Figure 9 : Architecture cellulaire

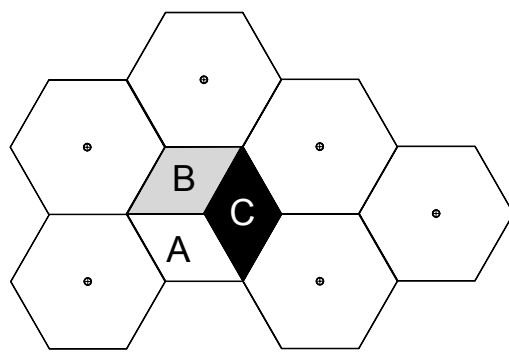


Figure 10 : Site équipé de trois antennes directives

Comme le montre la figure 9, la taille des cellules varie considérablement ; elle dépend du relief, et surtout de la densité de trafic. En zone urbaine, le rayon des cellules peut être de quelques centaines de mètres (et même moins pour les micro-cellules) ; en zone peu peuplée, il est de quelques kilomètres.

9. CANAUX DE CONTROLE ET TRAFIC - « HANDOVER »

Chaque antenne-relais d'un réseau GSM transmet un canal de contrôle, appelé BCCH (« broadcast control channel »); il s'agit d'un « time slot » d'une porteuse qui diffuse en permanence diverses informations ; celles-ci comprennent, notamment, un code d'identification de l'opérateur et le numéro de la cellule, ce qui permet aux téléphones mobiles de se localiser. Même en l'absence de toute communication dans la cellule, le BCCH est émis en permanence. Généralement, c'est le « time slot » T0 d'une des porteuses qui lui est alloué. Le BCCH transmet aussi le numéro des téléphones mobiles que le réseau est en train d'appeler.

Lors de la mise sous tension d'un téléphone mobile, il commence par scruter les différents canaux dans les bandes GSM¹ afin de déterminer ceux qui sont effectivement des BCCH (par décodage de certains bit). Ensuite, le téléphone détermine, parmi les BCCH captés, celui dont l'intensité est la plus élevée. En principe, il s'agit du BCCH émis par l'antenne-relais la plus proche ou, du moins, celle dont le signal présente la meilleure qualité. Le téléphone mobile signale alors au réseau qu'il se trouve dans la cellule correspondant à ce BCCH ; ce numéro de cellule est mémorisé dans la base de données du MSC ; lorsque ce téléphone mobile est appelé, le MSC dirige l'appel vers la BTS de cette cellule. Tant qu'il est allumé (c'est-à-dire en communication ou en veille), le téléphone mobile reste en permanence à l'écoute du BCCH de la cellule. Lorsque le téléphone détecte une détérioration du niveau (ou de la qualité) de la réception du BCCH sur lequel il est « accroché », il se met à l'écoute du BCCH des cellules voisines ; lorsque l'intensité de l'un de ceux-ci est plus élevée, la communication est transférée vers la BTS de la cellule correspondante. Ce mécanisme est appelé « handover » ; il s'effectue aussi bien lorsque le mobile est en veille que lorsqu'il est en communication.

¹ Il scrutera éventuellement les bandes GSM 900 et DCS 1800 s'il s'agit d'un téléphone « dual band ».

En général, une antenne-relais émet, par cellule, un nombre de porteuses GSM compris entre 2 et 6. Il est à noter que le nombre de 6 porteuses ne se rencontre que dans les cellules où il peut y avoir une forte concentration d'abonnés (par exemple : en zone urbaine ou à proximité de lieux où se produisent des manifestations culturelles, sportives, ...). Une porteuse ayant une capacité de 8 canaux et 1 canal étant réservé pour le canal de contrôle, 1 cellule à 2 porteuses aura donc une capacité maximale de 15 conversations simultanées ($2 \times 8 - 1$). De même, une cellule à 4 porteuses a une capacité de 31 conversations simultanées ($4 \times 8 - 1$). Dans la terminologie GSM, un canal alloué à la transmission de la voix, ou de données, est appelé « canal de trafic » (TCH pour « traffic channel »).

Dans le cas des cellules nécessitant une capacité très élevée, il est possible de recourir à des installations « Dual band » ; il s'agit d'installations émettant à la fois dans les bandes GSM 900 et DCS 1800 ; dans de tels cas, le nombre total de porteuses peut être supérieur aux chiffres indiqués ci-dessus.

Le nombre de canaux actifs dans une cellule, à un moment donné, dépend du nombre de communications en cours ; lorsqu'il n'y en a aucune, seul le canal de contrôle est réellement utile, c'est-à-dire un huitième de porteuse. Toutefois, pour des raisons techniques, les 7 canaux inutilisés de la porteuse qui transmet le canal de contrôle sont « artificiellement » occupés par ce qui est appelé des « dummy bursts ». La figure 11 représente l'affectation des « time slots » de la porteuse qui transmet le canal de contrôle.

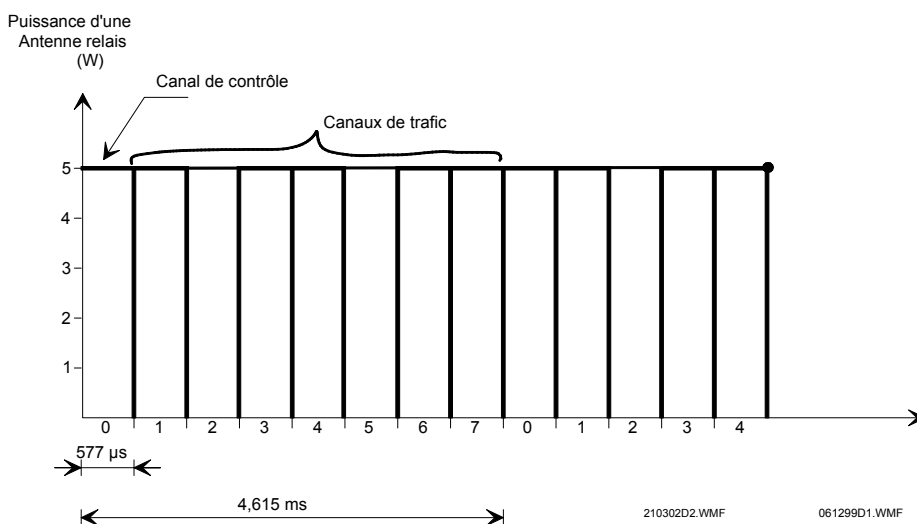


Figure 11 : Emission par une antenne-relais - Porteuse émettant le canal de contrôle et 7 canaux de trafic

Par contre, dans le cas des porteuses qui ne sont utilisées que pour transmettre des canaux de trafic, seuls les canaux utiles sont effectivement transmis. La figure 12 est un exemple de porteuse pour laquelle 6 « time slots » sont occupés.

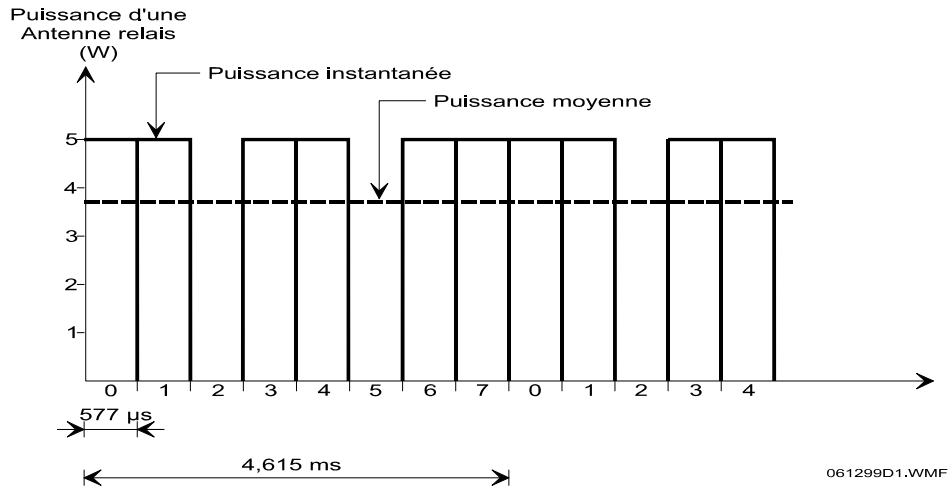
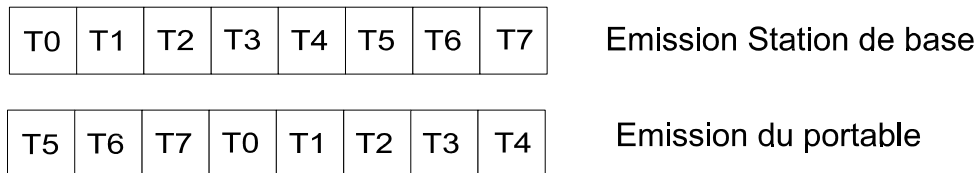


Figure 12 : Emission par une antenne-relais - Porteuse n'émettant que des canaux de trafic (exemple)

La transmission du téléphone mobile vers l'antenne-relais fonctionne selon un principe similaire, mais dans le cas du réseau GSM 900, l'émission se fait à une fréquence inférieure de 45 MHz à celle utilisée par la voie descendante (c'est-à-dire à 905 MHz dans notre exemple de la figure 5). Pour le réseau DCS 1800, l'écart entre la fréquence des voies montante et descendante est de 95 MHz. Afin que le téléphone ne doive pas recevoir et émettre simultanément, il y a un décalage de 3 « time slots » entre le début de la réception et le début de l'émission (figure 13).



021199D2.WMF

Figure 13 : Décalage entre émission par la BTS et émission par le mobile

10. PUISSANCES INSTANTANEE ET MOYENNE - CONTROLE AUTOMATIQUE DE LA PUISSANCE

Les normes GSM 900 et DCS 1800 fixent les puissances de sorties des téléphones mobiles et des BTS. Il existe toutefois plusieurs classes d'équipements auxquelles correspond une puissance nominale.

Dans le cas des téléphones GSM 900, la classe 4 est la plus courante; sa puissance instantanée maximale est de 2 W pendant la durée d'un « time slot ». Comme le mobile n'émet que pendant 1 « time slot » sur 8 (figure 14), la puissance moyenne maximale est donc de 0,25 W (2 W divisés par 8).

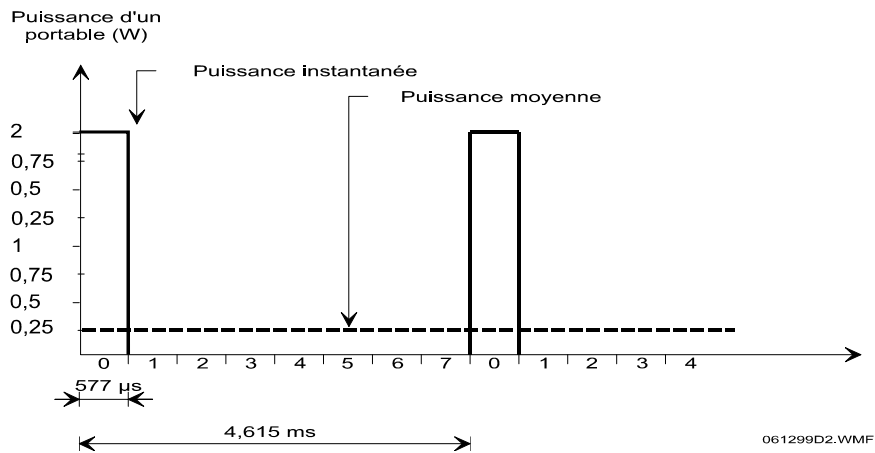


Figure 14 : Puissances instantanée et moyenne d'un mobile

Il faut également préciser qu'il s'agit de valeurs maximales (pour la classe 4), car le mobile règle automatiquement sa puissance en fonction de la qualité de la liaison avec la BTS. Par exemple, si le mobile est proche, une puissance nettement inférieure à 2 W sera suffisante pour assurer une transmission de qualité. Inversement, s'il est très éloigné, ou s'il se trouve dans un milieu clos (dans un bâtiment, en sous-sol, dans un véhicule, ...), le téléphone augmentera progressivement sa puissance pour atteindre, si nécessaire, la valeur instantanée de 2 W. La plage de variation de la puissance instantanée d'un téléphone de classe 4 s'étend de 20 mW à 2 W ; ce mécanisme est appelé « contrôle automatique de la puissance » ou « power control ».

D'autre part, l'arrêt de la transmission pendant les périodes de silence (fonction « discontinuous transmission » décrite au § 11) contribue également à réduire la puissance moyenne qu'émet un téléphone mobile.

Les téléphones GSM 900 et DCS 1800 fonctionnent de manière identique, mais les puissances sont inférieures dans le second cas. Pour les téléphones DCS 1800 de classe 1, qui sont les plus répandus, la puissance instantanée maximale est de 1 W.

La puissance instantanée maximale des BTS GSM 900 et DCS 1800 est généralement d'une dizaine de W par porteuse, mais à cause des pertes dans les coupleurs et les câbles de liaison, la puissance à l'entrée de l'antenne peut être significativement plus faible (parfois 50 %). On trouve aussi des BTS qui délivrent une puissance de 20 W par porteuse. Compte tenu des pertes dans les câbles et les coupleurs, la puissance à l'entrée de l'antenne n'est plus que d'une dizaine de W par porteuse. Comme dans le cas des téléphones mobiles, les puissances données ci-dessus sont des valeurs instantanées pendant la durée d'un « time slot ». Pour déterminer la puissance moyenne, il faut tenir compte du nombre de « time slots » occupés pour les différentes porteuses. Par exemple, dans le cas où la puissance instantanée à l'entrée de l'antenne est de 5 W, 1 « time slot » correspondra en fait à une puissance moyenne de 0,625 W (c'est-à-dire 5 W divisés par 8). La puissance moyenne n'atteindra 5 W que lorsque les 8 « time slots » seront utilisés. La figure 12 illustre le cas où 6 « time slots » sont occupés ; dans ce cas, la puissance moyenne est de 3,75 W.

Un contrôle automatique de la puissance émise par la BTS, semblable à celui réalisé par les téléphones mobiles, est également prévu dans la norme GSM ; ce contrôle agit au niveau de chaque « time slot » et permet donc de réduire le champ rayonné. Toutefois, il ne s'agit que d'une option qui n'est pas systématiquement utilisée.

Il est à noter que, dans le cas de micro-cellules (quelques centaines de mètres de rayon), la puissance injectée à l'antenne est généralement de 1 ou 2 W.

Etant donné qu'une antenne-relais rayonne, en général, plusieurs porteuses, la puissance maximum rayonnée par l'antenne vaut :

$$P_{\text{totale}} = P \cdot N_{\text{porteuse}} \quad (6)$$

où N_{porteuse} est le nombre de porteuses rayonnées par l'antenne

11. TRANSMISSION DISCONTINUE

Lors d'une communication avec un téléphone GSM, la transmission est interrompue lorsque son utilisateur ne parle pas (en fait il ne subsiste que des « bursts » séparés par un intervalle d'une durée de quelques secondes au lieu d'un burst toutes les 4,625 ms lorsque l'utilisateur parle) ; cette fonction est appelée « discontinuous transmission » ; son but est de réduire la consommation électrique du téléphone afin d'accroître l'autonomie de la batterie. La réduction de consommation est une exigence importante vu la taille de plus en plus petite des téléphones mobiles. Le mécanisme de « discontinuous transmission » contribue, notamment, à réduire l'exposition moyenne aux champs électromagnétiques émis par le téléphone. Toutefois, à l'autre extrémité de la liaison (par exemple un téléphone fixe), l'absence de réception (bruit) donne l'impression que la communication est interrompue ; un bruit « artificiel » (appelé « comfort noise ») est donc rajouté à la réception dans le but de remédier à ce problème.

12. DIVERSITE D'ANTENNES ET DIVERSITE DE POLARISATIONS

Pour améliorer la réception par la BTS, une technique couramment utilisée consiste à capter les émissions des téléphones mobiles au moyen de 2 antennes par cellule, au lieu d'une seule. La BTS sélectionne le signal qui présente le niveau le plus élevé. Pour être efficace, il faut que la distance entre les deux antennes soit au moins de quelques longueurs d'onde. Cette technique porte le nom de « Diversité d'antennes » (ou « Space diversity » en anglais). Dans le cas d'un site couvrant trois secteurs, tel que celui de la figure 10, le nombre d'antennes passe de 3 à 6, toutefois, la diversité d'antennes agit uniquement en réception et n'augmente pas le champ émis.

Une autre technique, appelée « Diversité de polarisations », consiste à utiliser une antenne de réception qui est sensible à deux directions de polarisation orthogonales entre elles. Une telle antenne est constituée de 2 réseaux de dipôles : le premier réseau capte la composante du champ électrique orientée à -45° par rapport à la

verticale et le second capte la composante à + 45°. La diversité de polarisation n'augmente pas non plus le champ émis par l'antenne. Les diversités d'antennes et de polarisations peuvent également être combinées pour améliorer la qualité de la réception.

13. EFFET DES TRAJETS MULTIPLES

Comme l'illustre la figure 15, la transmission entre une antenne-relais et un téléphone mobile s'effectue généralement via plusieurs trajets. Il y a tout d'abord une onde directe parcourant le chemin le plus court, ainsi des ondes réfléchies par des obstacles (sols, bâtiments,...) et des ondes diffractées par des contours d'obstacles. Ces trajets ayant des longueurs différentes, il en résulte qu'un signal partant de la BTS au temps t_0 parviendra au mobile à l'instant t_1 et sera suivi d'échos plus ou moins décalés dans le temps en fonction de la longueur des différents trajets parcourus. La figure 16 illustre le phénomène pour la transmission d'une impulsion de très courte durée et dont l'onde directe n'est suivie que d'un seul écho.

Notons également que l'onde directe et les différents échos ont, sauf circonstances exceptionnelles, des intensités différentes, puisque les mécanismes, tels que réflexion et diffraction intervenant dans la propagation, affectent l'amplitude du signal.

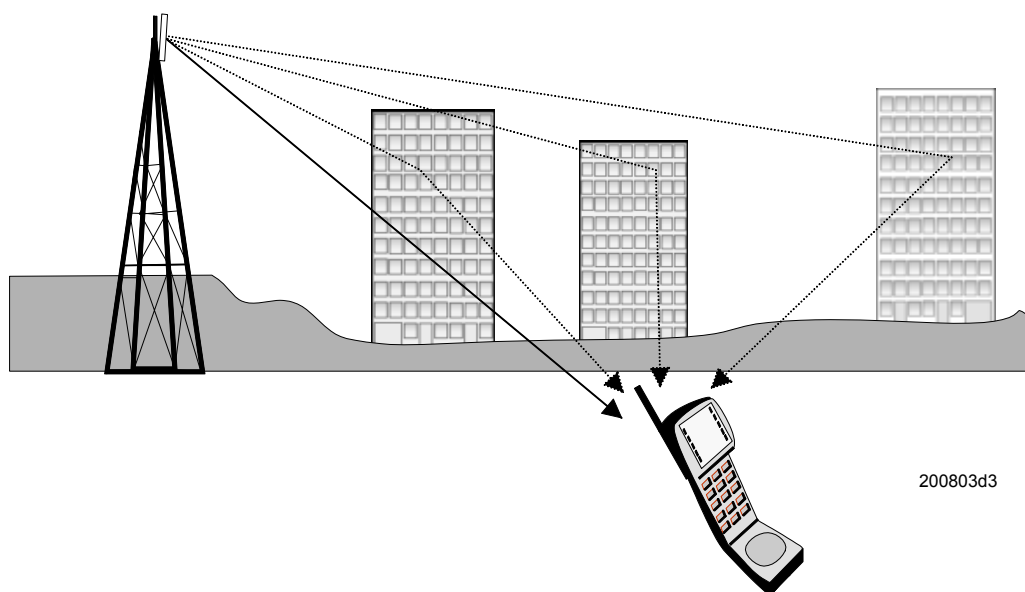


Figure 15 : Trajets multiples

Les ondes radio se propagent à 300 000 km/s dans l'air, il en découle qu'un écart de trajet d'un km correspond à un retard de 3,3 μ s. La durée d'un bit étant de 3,7 μ s, cela signifie que s'il existe une onde réfléchie parcourant un trajet dont la longueur dépasse d'environ 1 km de celle du trajet de l'onde directe, la qualité de la transmission sera sérieusement affectée puisque à la réception, il y aura superposition du bit n° N et de l'écho du bit n° N - 1.

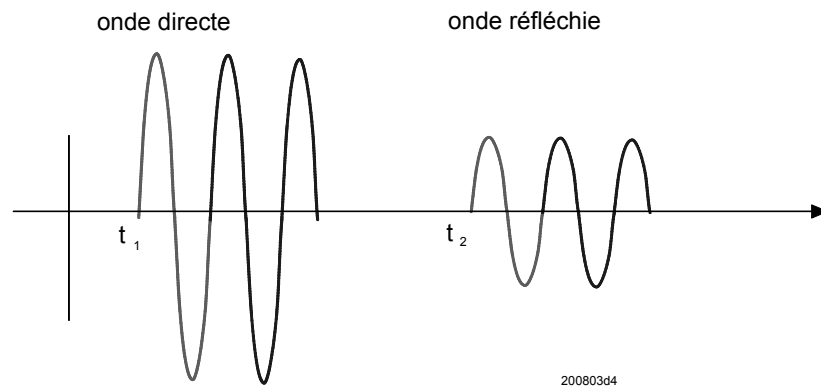


Figure 16 : Onde directe et onde réfléchie

L'effet des trajets multiples donne donc lieu à des interférences entre bit successifs (« intersymbol interferences » en anglais) ; sans un mécanisme de correction, ce phénomène rendrait impossible toute transmission de qualité à un débit binaire tel que celui du GSM, sur une distance de quelques km.

N.B. : *Etant donné le débit binaire du réseau GSM (270 kbit/s, c'est-à-dire 3,7 μ s par bit), les trajets multiples peuvent même fortement dégrader la qualité de la transmission sur une distance nettement inférieure à 1 km. En effet, dans le cas où il existe un obstacle très absorbant entre un téléphone mobile et l'antenne-relais (par exemple un bâtiment), la liaison s'établit via une ou plusieurs réflexions et/ou diffractions. Il se peut que le signal reçu ne soit que la superposition de signaux ayant transité par les trajets indirects dont la longueur dépasse largement la distance séparant le mobile de la BTS.*

La correction évoquée ci-dessus est réalisée par un dispositif appelé « égaliseur adaptatif » ; son principe consiste à transmettre, au milieu de chaque « time slot », une séquence fixe de 26 bit appelée « midamble » (figure 7) et qui est connue du téléphone mobile et de la BTS, ce qui permet de déterminer la détérioration subie lors de transmission radio. A partir de ce résultat, l'égaliseur « reconstitue », au moyen d'un algorithme, l'information telle que transmise. Il est à noter que le téléphone mobile étant susceptible de se déplacer, parfois même à une vitesse relativement élevée (train, voiture,...), un profil tel que celui de la figure 16 varie constamment. L'algorithme de l'égaliseur doit donc être adapté en continu, c'est-à-dire lors de chaque « time slot ». C'est pour cette raison que le « midamble » est inséré au milieu du « time slot » ; il permet de corriger les 2 x 58 bit de données transmis avant et après ce « midamble ».

REFERENCES

[1] S. REDL, M. WEBER, M. OLIPHANT - An Introduction to GSM - Artech House Publishers - 1995.