

*Université Farhat Abbess Sétif
Faculté des sciences
Département d'Informatique
Module : Ingénierie des réseaux
Master 2 RSD
Année : 2013*

Chapitre II : Dimensionnement et planification d'un réseau cellulaire 2G (GSM)

II.1. Introduction

Le dimensionnement des réseaux mobiles est un problème complexe qui met en jeu à la fois des aspects théoriques et pratiques. Il s'agit de trouver la meilleure architecture cellulaire au regard de plusieurs critères que l'on peut résumer comme suit :

- **Qualité de couverture** : garantir un lien radio en tout point de la zone à couvrir.
- **Absorption de la charge** : le réseau doit être capable de fournir un nombre de canaux de communication adapté à la densité de trafic associée à chaque cellule.
- **Mobilité** : Faciliter le handover lors des changements de cellules. Chaque station de base doit connaître ses voisines pour permettre à un utilisateur de se déplacer sans perte de communication.
- **Evolutivité** : un réseau cellulaire de type GSM est en perpétuelle évolution, intégrant de nouvelles stations de bases, ou simplement de nouveaux TRX associés à chaque station de base.

Etant donnée :

- Un environnement à couvrir.
- Des usagers à desservir (estimation).
- Des fréquences allouées.

L'objectif consiste à minimiser le coût de l'infrastructure tout en respectant des contraintes de qualité de service (*QOS*).

II.2. Formules et principes de base

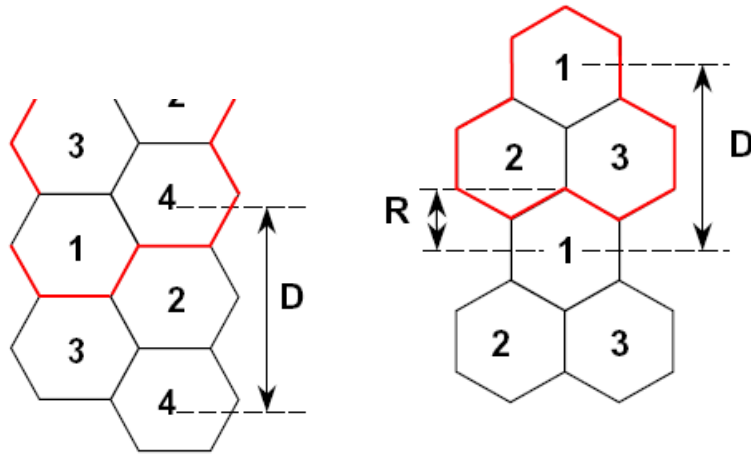
II.2.1 Relation entre la distance de réutilisation et le rayon d'une cellule

On appelle "motif" le plus petit groupe de cellules contenant une et une seule fois l'ensemble des canaux radio. Ce motif est répété sur toute la surface à couvrir. Plus le motif est grand, plus la distance de réutilisation est grande.

En pratique, une distance minimale de deux cellules sépare deux cellules utilisant la même fréquence. Ainsi, on définit des *motifs*, aussi appelés *clusters*, constitués de plusieurs cellules, dans lesquels chaque fréquence est utilisée une seule fois.

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3N} \quad \text{où :}$$

N : taille du motif de réutilisation,
 D : Distance de réutilisation,
 R : rayon de cellule.



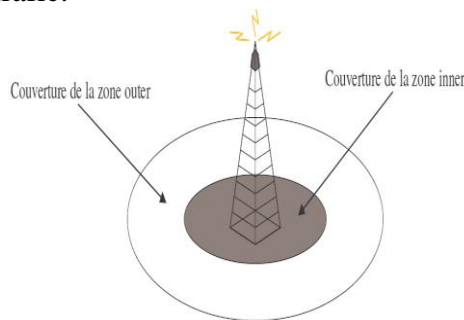
Exemple :

Soit D la distance minimale de réutilisation. On peut calculer D de la manière suivante:

$D = \text{racine carrée}(3K) * R$ (où R est le rayon de la cellule et K est la taille du motif).
 Pour la cas où $K=4$ en zone rurale on a : $D = \sqrt{3 \times 4} \times 35 = 121 \text{ km}$ environ. Concrètement, cela signifie qu'on ne pourra pas implanter une antenne utilisant la même fréquence dans une zone inférieure à 121 km.

II.2. 2. Le modèle des cellules concentriques

Ce modèle consiste à diviser la cellule en deux sous cellules concentriques, afin de mieux partager le trafic, dans les milieux à haute densité de trafic.



L'avantage de l'architecture en cellules concentriques, c'est de permettre une couverture importante en indoor par l'intermédiaire de la couronne extérieure une réduction de puissance, une réduction de l'interférence, et une réduction du motif de réutilisation. Et permettre, aussi, une réduction du recouvrement entre les cellules, et par la suite : une concentration du trafic dans la zone intérieure, par l'intermédiaire, de la couronne intérieure.

II.2. 3. Propagation des ondes radio

- Les ondes radio (notées *RF* pour *Radio Frequency*) se propagent en ligne droite dans plusieurs directions. La vitesse de propagation des ondes dans le vide est de 3.10^8 m/s .

Lorsqu'une onde radio rencontre un obstacle, une partie de son énergie est absorbée et transformée en énergie, une partie continue à se propager de façon atténuée et une partie peut éventuellement être réfléchi. On appelle **atténuation** d'un signal la réduction de la puissance de celui-ci lors d'une transmission.

L'atténuation est mesurée en bels (dont le symbole est B) et est égale au logarithme en base 10 de la puissance à la sortie du support de transmission, divisée par la puissance à l'entrée.

$$L(\text{dB}) = (10) \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

Les antennes n'ont pas, à proprement parler, de gain. Ce qu'on entend par "gain" d'une antenne découle de son aptitude à rayonner dans une certaine direction. A puissance d'excitation identique, le champ obtenu par une antenne qui rayonne dans une certaine direction sera bien évidemment plus importante (dans cette direction) que le champ obtenu par une antenne qui rayonne dans toute les directions. Cette différence se traduit par un gain apparent. De là, la notion de gain d'une antenne.

Atténuation en espace libre

$$P_r = \frac{P_t G_r G_t}{[4\pi(d/\lambda)]^2}$$

Où :

P_r : Puissance reçue

P_t : Puissance émise.

G_r : Gain de l'antenne de réception

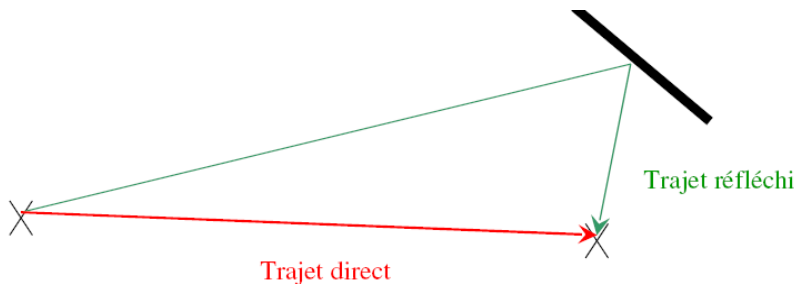
G_t : Gain de l'antenne d'émission

λ : Longueur d'onde

d : Distance émetteur-récepteur

Le fading ou évanouissement du signal

Des obstacles comme le sol, mais aussi les arbres, les bâtiments, etc. réfléchissent les ondes radio. D'où la génération d'ondes réfléchies qui sont déphasées par rapport à l'onde suivant le chemin direct émetteur-récepteur. Le récepteur reçoit alors la somme des ondes directes et réfléchies. Quand les ondes sont en phase, le signal reçu est amplifié, par contre lorsque les ondes sont en opposition de phase, le signal reçu est nul.



Durée d'un trou de fading

Le phénomène de fading peut aller jusqu'à la disparition complète et permanente du signal. On dit que l'on est alors dans un trou de fading.

$$\frac{\sqrt{2\pi[e^{R^2} - 1]}}{\beta v R}$$

Où $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$, R (dB) est tel que $\log_{20}(R)$ donne la profondeur moyenne des évanouissements constatés, v : vitesse du mobile.

Décalage Doppler

Avec $F_{Doppler}$ qui est la fréquence Doppler :

$$F_{Doppler} = (v/c) \times F_p$$

Où

v est la vitesse du mobile.

C est la vitesse de la lumière. F_p est la fréquence porteuse.

Les interférences:

Elles sont dues à d'autres émissions radios qui s'effectuent dans la même bande de fréquence.

- Les interférences peuvent être propres au système de radiocommunication que l'on utilise (réutilisation des mêmes canaux de fréquence dans un réseau radiomobile)
- Les interférences peuvent être dues à un autre système de radiocommunication sur lequel on n'a pas de contrôle
- Les interférences peuvent être volontaires: on parle alors de brouillage (contexte militaire ou équivalent)

Rapport signal à bruit C/N

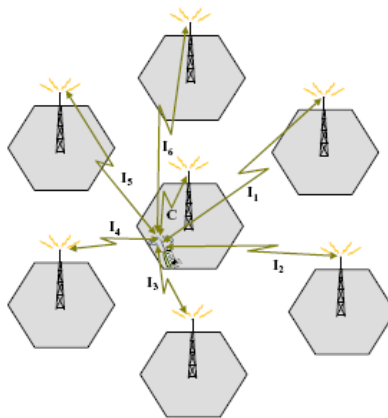
Le premier objectif d'un déploiement cellulaire est de garantir un lien radio en tout point de la zone à couvrir. La qualité de ce lien est définie principalement par 2 paramètres : le rapport signal à bruit C/N canal /noise) et le rapport signal sur interférences (C/I) (canal/interferences)).f (MHz)

Le rapport signal à bruit est donné par le rapport entre la puissance du signal reçu et la densité de puissance du bruit en réception.

Rapport signal sur interférences (C/I)

Les interférences sont de 3 types : les interférences inter-symboles (IIS), les interférences interféquences (IIF, encore appelées interférences canaux-adjacents), et les interférences cocanal (ICC).

- Les interférences inter-symboles caractérisent les interférences entre les impulsions successives d'une même source : lorsqu'un bit est émis, le récepteur en reçoit plusieurs échos étalés dans le temps à cause de la différence de temps de parcours entre les différents chemins Emetteur-Recepteur. Ces interférences (IIS), sont combattues par des techniques d'égalisation (l'égaliseur de Viterbi en GSM) et de codage canal et ne sont pas prises en compte dans la phase de planification.
- Les interférences co-canal (ICC) sont forcément importantes en GSM et sont directement liées à la norme elle-même. Pour augmenter la capacité globale d'un système, les fréquences sont réparties entre les cellules, avec un certain facteur de réutilisation. Ainsi, toutes les cellules et les stations de base associées qui utilisent un même canal en fréquence sont susceptibles d'interférer entre elles.
- Le rapport C/ICC est donné par le rapport entre la puissance utile du signal reçu par un mobile en provenance de la station de base (BTS) à laquelle il est associé, et la somme des puissances des signaux reçus par le même mobile en provenance de toutes les BTS utilisant la même fréquence.



Interférences entre cellules voisines réutilisant la même fréquence sur un modèle hexagonal

Les interférences canaux adjacents (IIF) sont liés à la réutilisation de canaux de fréquences adjacents. En effet la largeur réelle des canaux est supérieure aux 200kHz utilisés pour répartir les canaux en fréquence. Ainsi, à puissance identique, 2 canaux voisins (f_i et f_i+1) ont un rapport C/I d'environ 18dB, 2 canaux (f_i et

fi+2) un C/I de 50dB, et 2 canaux (fi et fi+3) un C/I de 58dB. Pour garantir un C/I total supérieur à 9dB, la norme GSM définit un rapport de protection pour 2 canaux voisins, donné par le tableau suivant :

Interférences co-canal (fo)	C/Ic	9dB
Interférences 1er canal adjacent	C/Ia1	-9dB
Interférences 2ième canal adjacent	C/Ia2	-41dB
Interférences 3ième canal adjacent	C/Ia3	-49dB

Finalement, le rapport C/I total est donné par :

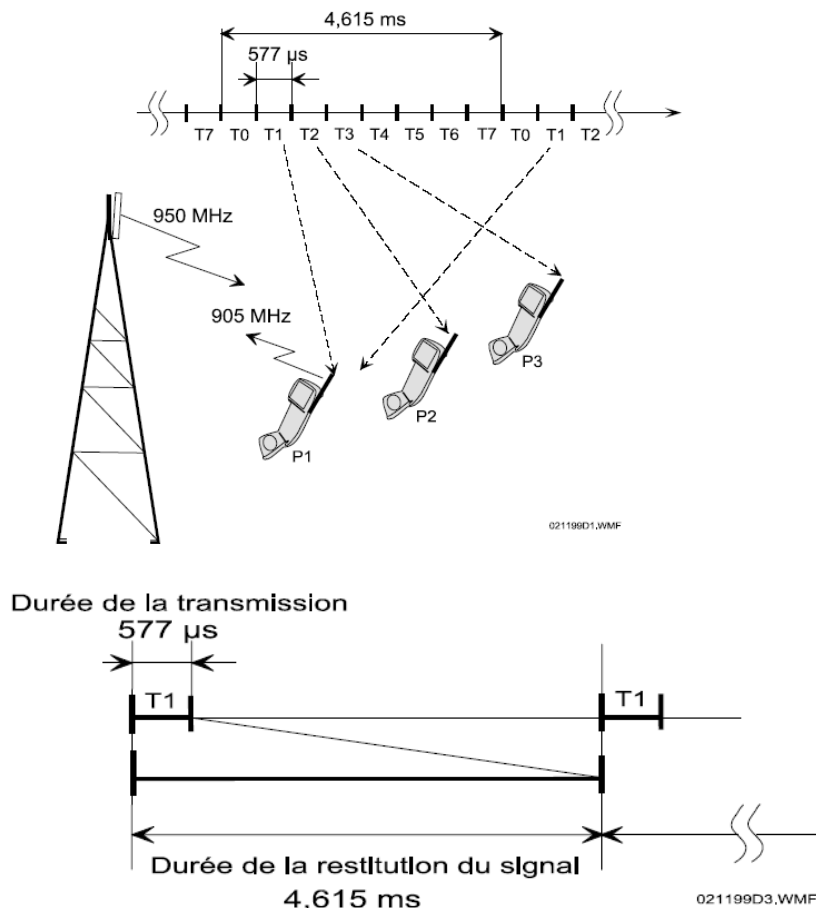
$$\frac{C}{I} = \frac{C}{\sum_{\text{cellcand}} I_i + R_1 \sum_{\text{celladjacent1}} I_i + R_2 \sum_{\text{celladjacent2}} I_i + R_3 \sum_{\text{celladjacent3}} I_i}$$

Où Ri est le rapport de protection donné par :

$$R_i = \frac{C/Ia_i}{C/Ic} \quad R_1 = 0.015 ; R_2 = 10^{-5} ; R_3 \approx 10^{-6}$$

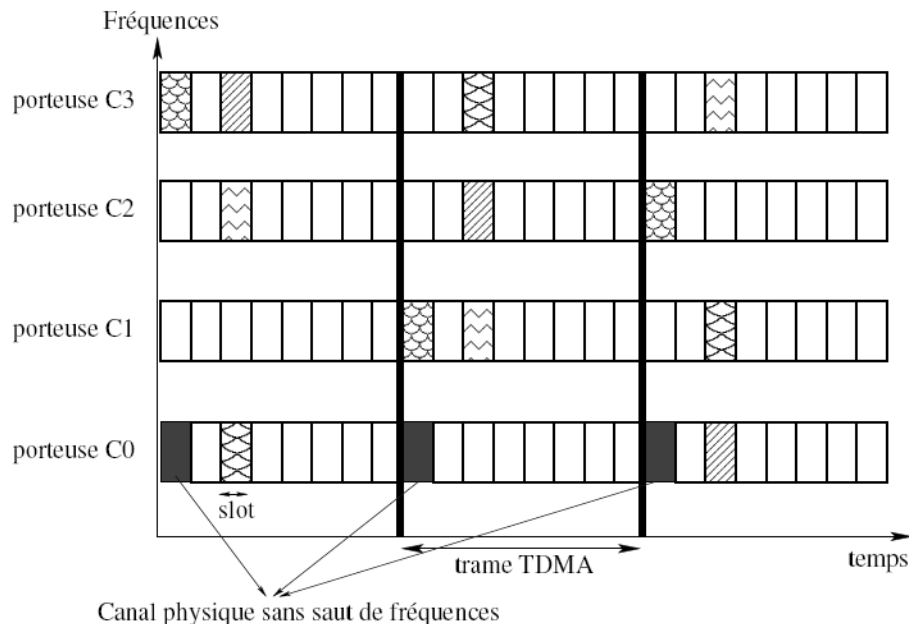
II.2. 4. Technique du saut de fréquence dans GSM

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 ci-dessous illustre ce processus.



La technique des sauts de fréquence consiste à changer la fréquence de porteuse un nombre important de fois pendant la durée d'un bit de message. L'ensemble du domaine de fréquences accessibles est alors couvert : on obtient un spectre étalé et le signal transmis apparaît comme un signal de bruit sur une large bande.

- 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.
- 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 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.

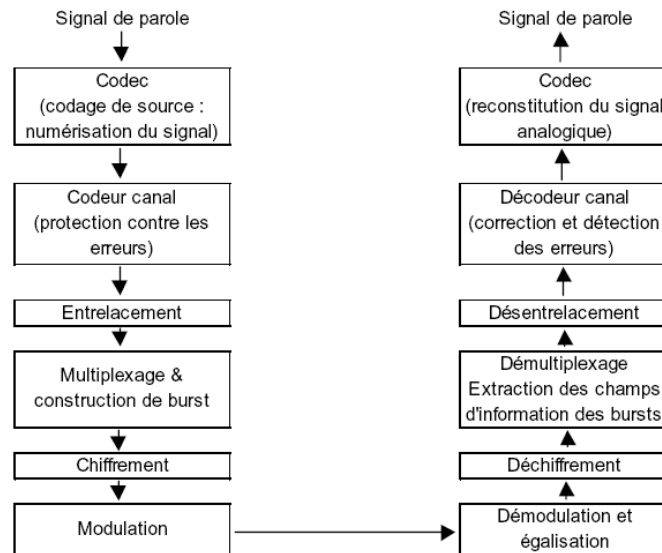


Principe du saut de fréquence

II.2. 5. Chaîne de transmission GSM

Pour transmettre l'information entre le téléphone mobile et le relais GSM on va devoir recourir aux techniques de modulation. C'est à dire que l'information va modifier via un processus de modulation un signal HF qui sera ce qu'on appelle la porteuse. La modulation d'une façon générale jouera soit sur l'amplitude soit sur la fréquence de la porteuse. Ainsi l'émetteur va comporter les éléments suivants:

- un oscillateur qui génère la porteuse
- un circuit de traitement du signal à transmettre destiné à le mettre sous une forme adéquate
- un modulateur qui va combiner ce signal avec la porteuse
- un amplificateur de puissance qui va porter le signal modulé à une puissance suffisante pour l'émission
- une antenne qui reçoit ce signal et transforme le courant en ondes électromagnétiques qui vont se propager dans l'espace et atteindre en particulier le relais le plus proche.



Inversement le relais récepteur comportera:

- une antenne transformant les ondes électromagnétiques en signaux électriques
- un circuit sélectif de détection permettant d'extraire parmi tout ce que reçoit l'antenne le signal utile
- un amplificateur dit radiofréquence destinée à augmenter le niveau de telle sorte qu'on puisse ultérieurement facilement extraire le signal modulant de sa porteuse.
- un démodulateur chargé de cette opération d'extraction
- un amplificateur audio.

II.3. Bilan de liaison et affectation de fréquences

Le bilan de liaison est une opération réalisée lors de la planification radio du réseau. Il consiste à déterminer les paramètres radio optimum permettant de garantir un bilan de liaison équilibré.

Le calcul du bilan des puissances d'émission sur UL et DL consiste à ajuster les paramètres des liaisons pour les équilibrer. En effet, une liaison équilibrée permet un fonctionnement symétrique du système en tout point de la couverture. Ainsi, la puissance reçue à chaque récepteur doit être supérieure ou égale à sa sensibilité et à la puissance transmise par chaque émetteur doit être inférieur ou égale au minimum entre la puissance maximum autorisé dans la cellule et la puissance nominale de l'émetteur.

Les paramètres du bilan de liaison sont les suivants :

Pr_{MS} : Puissance reçue à la MS (dBm)

Pr_{BTS} : Puissance reçue à la BTS

Pe_{MS} : Puissance émise à la MS

Pe_{BTS} : Puissance émise à la BTS

Lc_{BTS} : Perte du coupleur de la BTS

Gd_{BTS} : Gain de diversité de l'antenne de la BTS

G_{MS} : Gain de l'antenne de la MS

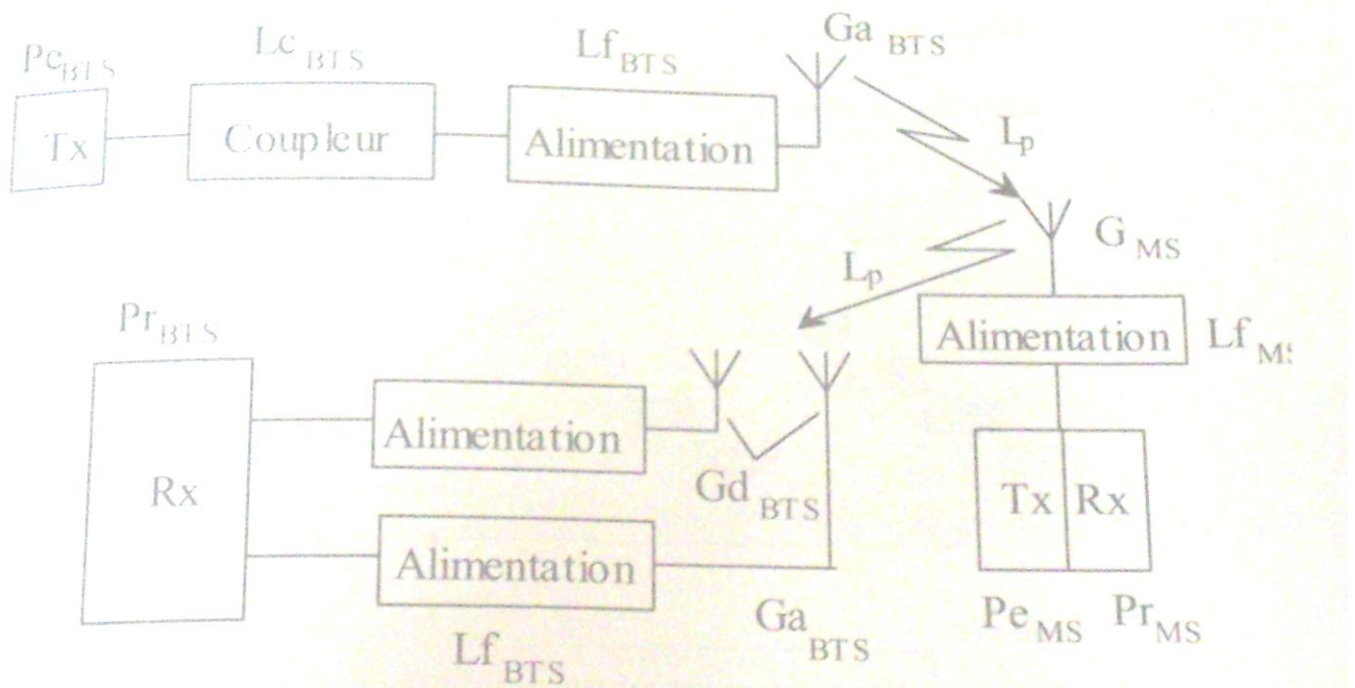
Ga_{BTS} : Gain de l'antenne de la BTS

Lf_{MS} : Perte de câble d'alimentation à la MS

Lf_{BTS} : Perte de câble d'alimentation à la BTS

L_p : Perte de la propagation entre la MS et la BTS

Le schéma suivant montre comment interviennent ces paramètres dans le calcul d'un bilan de liaison.



Le signal reçu à la MS provenant de la BTS est dans ce cas :

$$Pr_{MS} = Pe_{BTS} - Lc_{BTS} - Lf_{BTS} + Ga_{BTS} - L_p + G_{MS} - Lf_{MS}$$

Le signal reçu à la BTS provenant de la MS est dans ce cas :

$$Pr_{BTS} = Pe_{MS} - Lf_{MS} + G_{MS} - L_p + Gd_{BTS} + Ga_{BTS} - Lf_{BTS}$$

La PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente ou EIRP) d'une antenne est définie comme la puissance nécessaire à une antenne isotrope permettant d'obtenir le même champ à une distance égale. Elle est calculée par l'expression (pour l'antenne de la BTS) :

$$PIRE = Pe_{BTS} - Lc_{BTS} - Lf_{BTS} + Ga_{BTS}$$

II.4. Affectation de fréquences manuelle

Il existe principalement trois types de saut de fréquence :

- Le saut de fréquence généralisé;
- Le BBH, Base Band Hopping : saut de fréquences en bande de base ;
- Le SFH, Synthetized Frequency Hopping; saut de fréquence synthétisé.

II.4.1 Le saut de fréquence en bande de base BBH (Base Band Hopping)

Le principe du saut en bande de base est le suivant :

- ✓ Il peut être implémenté lorsque le nombre de TRX est supérieur ou égal à trois.
- ✓ On saute sur un nombre fini de fréquences égal au nombre de TRX de la cellule.
- ✓ Le saut est conditionné par le **HSN**, *Hopping Sequence Number*, il peut être défini comme une séquence pseudo aléatoire permettant d'éviter les interférences co-canal ; c'est un nombre entier inférieur à 64.
- ✓ Le saut s'effectue sur tous les TS sauf le TS0 du TRX1 pour le BCCH.
- ✓ Maximum 10 fréquences pour le saut (gains minime à partir de 6-8 fréquences)

II.4.2 Le saut de fréquence synthétisé SFH (Synthetized Frequency Hopping)

Lorsque le SFH est activé sur une cellule les règles ci-dessous sont appliquées :

- ✓ Il peut être implémenté lorsque le nombre de TRX est supérieur ou égal à 2.
- ✓ Toutes les cellules du même site ont le même HSN ;
- ✓ Tous les TRX différents du TRX1 sautent dans la même plage de fréquence appelée la MALIST ; La **MALIST**, *Mobile Allocated List*, qui est un ensemble de fréquences de la bande allouée à l'opérateur sur lesquelles seront effectués les sauts.
- ✓ Entre deux secteurs du même site pour des TRX de même rang le **MAIO**, *Mobile Allocated Index Offset*, est écarté de deux.

II.5. Saut de fréquences dans GSM

Définition

- **MA** (*Mobile Allocation*) : groupe de fréquence utilisée pour le saut, la même MA est utilisée pour tous les TRX d'une BTS).
- **HSN** (*Hopping Sequence Number*) : séquence de saut de 0 à 63 (0 : cyclique, à éviter, 1-63 : pseudo aléatoire, probabilité de collision 1/N).
- **MAIO** (*MA Index Offset*) Offset de décalage en fréquence de 0 à N-1 (N nombre de fréquence dans le MA), garantit la séparation des canaux dans la même cellule.

II.6. Le Problème d'affectation des fréquences

Le problème d'affectation de fréquences (*FAP : Frequency Assignment Problem*) se rencontre en particulier lors du déploiement des réseaux radiomobile, et il a fait l'objet d'études menées par différents chercheurs dans le but d'une meilleure gestion du réseau. Le spectre de fréquences qui est attribué aux opérateurs de téléphonie est divisé en canaux fréquentiels. L'affectation de fréquences regroupe les mécanismes et procédures mis en oeuvre afin de gérer l'attribution des canaux de fréquences aux demandes de communication. Cette gestion permet de déterminer la qualité du réseau.

II.6.1 Objectif de l'affectation de fréquence

L'affectation de fréquences est un problème majeur dans le domaine des réseaux radio-mobile. Elle permet d'assurer une demande de ressources pour les cellules de la zone de service :

- en minimisant le nombre de fréquences utilisées.
- en maximisant le niveau de C/I.
- L'allocation des fréquences conditionne les performances et la qualité du réseau.

Matrice d'interférence

Obtenu grâce à un outils de planification qui permet de déterminer le rapport C/I au niveau de chaque point du site cellulaire et pour un taux de couverture fixé.

Histogramme des valeurs de C_i / I_{ij} (où C_i est le niveau de signal de la cellule i et I_{ij} représente le niveau d'interférence créée par la cellule j dans la cellule i) déterminé pour chaque couple de cellule i, j .

Chaque élément de la matrice représente la séparation en nombre de porteuses entre les fréquences allouées aux BTSs i et j de façon à éviter l'interférence de j sur i .

Les contraintes supplémentaires considérées sont les suivantes :

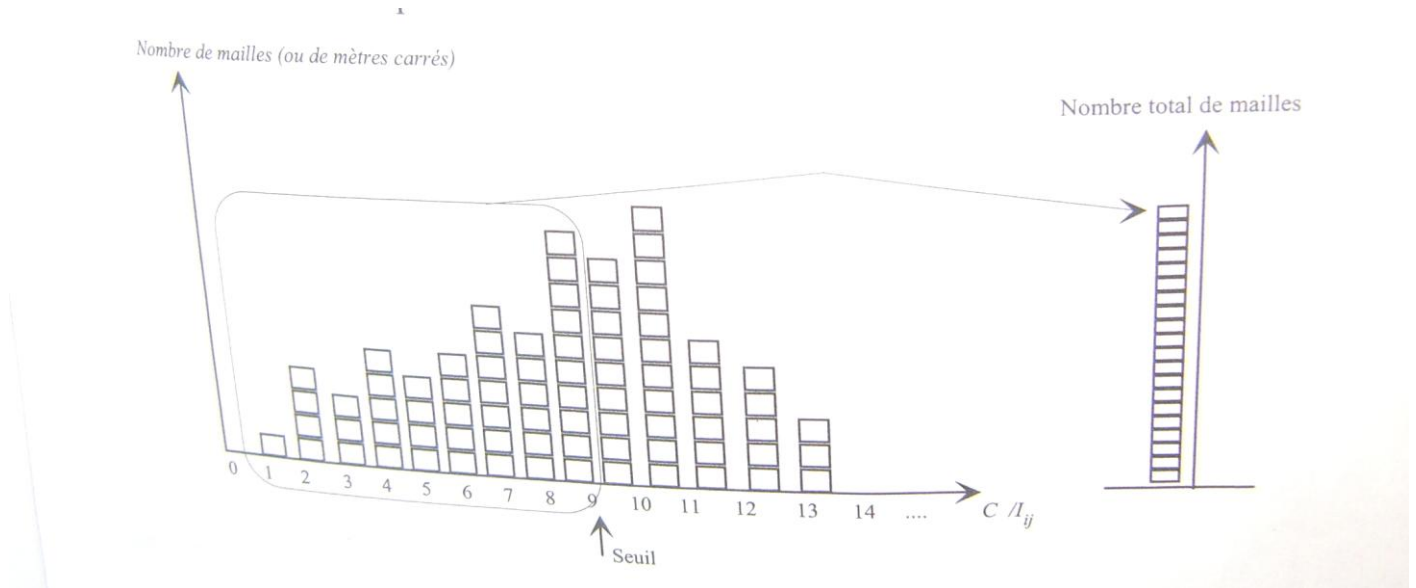
- séparation co-station : 3 porteuse.
- séparation co-site : 2 porteuse.
-

Contraintes usuelles :

- séparation entre sites voisins : 2 porteuses,
- séparation entre autres sites voisins : 2 porteuses,

Matrice de recouvrement

Chaque élément de la matrice, pour les cellules i et j , représente la surface interférée entre i (porteuse) et j (interférence) pour un seuil de compatibilité C/I pour un co-canal ou pour un canal adjacent (rapport de protection). La matrice de recouvrement est obtenue à partir de la matrice de C/I.



Détermination de la surface de la cellule où le niveau de C/I est insuffisant.

La matrice des contraintes se présente de la manière suivante :

Cellules	c_1	...	c_i	...	c_n
c_1					
...					
c_j			α_{ij}		
...					
c_n					α_{nn}

Le résultat du processus d'affectation de fréquence est la matrice d'affectation de fréquences B où $b_{ij} = 1$ si la cellule i peut utiliser la porteuse j , 0 sinon.

Cellules\Canaux	I	...	j	...	M
1	1		0		0
...	...		1		...
I	1		b_{ij}		
...	...				
N	0		0	...	0

Exemple : (voir la série de TD)

L'affectation de fréquence, réalisée en testant les configurations représentées par la matrice d'affectation de fréquence de sorte à ce que le plus grand nombre de contraintes de la matrice de contraintes soit respecté, nécessite, dans le cas de tailles de réseaux importantes, le recours à des algorithmes d'optimisation combinatoire.

Il en existe plusieurs familles :

- Algorithmes constructifs (algorithmes gloutons),
- Algorithme de recherche locale (descente de gradient, recuit simulé, recherche par tabou, etc.)
- Algorithme évolutifs (algorithmes génétique, algorithmes fourmis, etc.)

Ces méthodes n'assurent pas l'optimalité de la solution mais peuvent aboutir à une solution sous-optimale.

II.6.3 Classification des PAF

Selon l'objectif à optimiser on peut distinguer quatre modèles pour la résolution du PAF :

II.6.3.1 Affectation de fréquences d'ordre minimum (MO-FAP)

Cet objectif remonte à l'introduction des téléphones mobiles, dont les fréquences se vendaient par unité et étaient trop chères. Dans le cas d'existence des solutions valides pour un PAF, le souci était de pénaliser l'utilisation des fréquences. Donc, le nombre des différentes fréquences utilisées est minimisé de telle manière qu'aucune interférence ne se produise. Cette classe est une application directe du problème de coloration de graphes.

Le MO-FAP est alors formulé comme suit :

$$\text{Min } \sum_{f \in F} y_f, \text{ avec: } y_f \begin{cases} 1 & \text{si } f \text{ est utilisée} \\ 0 & \text{sin on} \end{cases}$$

II.6.3.2 Affectation de fréquences de spectre minimum (MS-FAP)

Dans le problème d'affectation de fréquences de spectre minimum (MS-FAP), on est censé payer pour l'ensemble complet des fréquences entre les plus hautes et plus basses utilisées. Ainsi, la différence entre la fréquence maximale et la fréquence minimale utilisée, le spectre (*Span*), détermine le coût et doit donc être minimisé.

Le MS-FAP est alors :

$$\text{Min}(f_{\max} - f_{\min})$$

tel que: $f_{\max} = \max f \in F$, est la plus grande fréquence utilisée

tel que: $f_{\min} = \min f \in F$, est la plus petite fréquence utilisée

II.6.3.3 Affectation de fréquences d'interférences minimum (MI-FAP)

Les modèles précédents ont simplifié l'interférence des données des matrices de pénalité, en les employant pour interdire certains choix des paires de fréquences. Une manière pour utiliser la pénalité des données (Matrice de pénalité p) est d'introduire une fonction objective qui réduit au minimum la somme des pénalités encourues par les choix de fréquence. Les fréquences assignées aux deux connexions doivent éliminer les interférences causant la dégradation de la qualité du signal.

II.6.3.4 Affectation de fréquences de blocage minimum (MB-FAP) :

Si aucune affectation valide n'existe ou il est difficile de l'obtenir, on peut décider de trouver une solution partielle qui affecte autant de fréquences possible aux transmetteurs de sorte à ne pas créer d'interférences et que la probabilité du blocage B du réseau soit minimisée.

Bibliographies :

- Planification des réseaux d'accès radio-cellulaires de types CDMA,
ISBN-13: 978-613-1-56976-0
Auteur: Anis Masmoudi

- Vers les systèmes radio mobiles de 4e génération, Évolutions technologiques des normes 3GPP
Auteur: **Martins**, Philippe, **Coupechoux**, Marceau