

Concepts Cellulaires et Paramètres Radio

Philippe Godlewski
Philippe Martins
Marceau Coupechoux
Cours largement inspiré de
« Les concepts cellulaires », X. Lagrange, Ph. Godlewski, Fév. 1999
UE RES345
ENST, Département Informatique et Réseaux

Plan du cours

- Présentation du réseau cellulaire
- La liaison radio
 - Propagation radio
 - Puissance émise, puissance reçue
 - Interférences
 - L'organisation des ressources radio
- La qualité de service
 - Qualité radio : SINR, Eb/No
 - Probabilité de blocage, de coupure
- La planification cellulaire
 - Modèle hexagonal
 - Motif de réutilisation
 - Couverture
 - Estimation de la capacité d'un système F/TDMA
 - Estimation de la capacité d'un système CDMA
- Les fonctions de mobilité

Présentation du réseau cellulaire

- **Contexte** : 2G, service de parole, réseau macro-cellulaire, début des années 1990.
- **Service mobile terrestre** : ensemble des radiocommunications avec des stations mobiles susceptibles de se déplacer en surface à l'intérieur des limites d'un pays ou d'un continent.
- Ne sont pas inclus dans cette définition :
 - Les systèmes satellitaires (Globalstar, Iridium, etc),
 - La téléphonie sans fil/*cordless* (DECT),
 - Les messageurs (*pager*).
 - Les services de données.
- Dans ce cours, on considère :
 - Un service bidirectionnel, la voix.
- Par opposition à : WLAN, PAN, PMR, Diffusion TV,...

Présentation du réseau cellulaire

- **Principes d'un réseau cellulaire** :
 - Le territoire est divisé en cellules,
 - Chaque cellule est desservie par une station de base,
 - L'ensemble des cellules forme un seul réseau : la division n'est perceptible ni à un usager du réseau fixe, ni à un usager mobile,
 - Les mêmes canaux de fréquence sont réutilisés dans plusieurs cellules.
- **Avantages** :
 - Service continu sur un large territoire,
 - Puissances d'émission moins importantes,
 - La diminution de la taille des cellules permet une augmentation de la capacité.

Présentation du réseau cellulaire



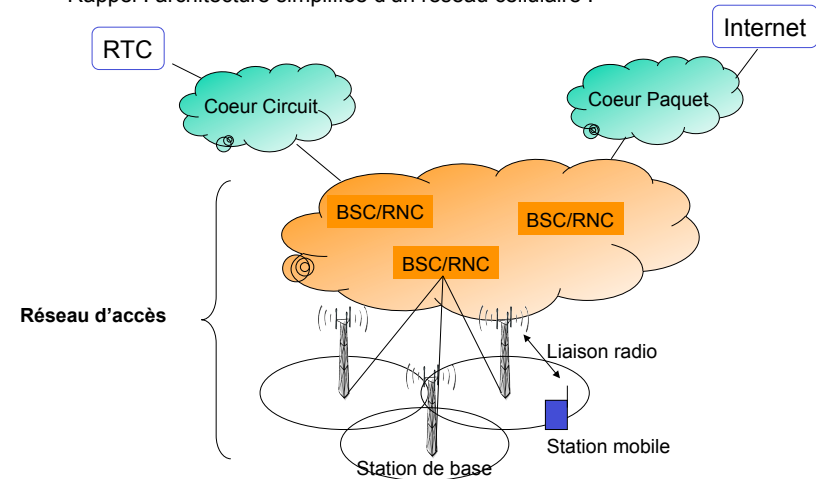
Fonctions à remplir :

- Assurer une couverture,
- Assurer une capacité grâce à la réutilisation des ressources fréquentielles,
- Permettre une localisation automatique des stations mobiles (itinérance – *roaming / international roaming*),
- Permettre le *hand-over* (ou *hand-off*): « transfert automatique intercellulaire » en cours de communication.

Présentation du réseau cellulaire



Rappel : architecture simplifiée d'un réseau cellulaire :



Présentation du réseau cellulaire



Les fonctions par sous-système

- Sous-système radio (Base Station Subsystem BSS) :
 - Transmission et réception radio
 - Gestion de la ressource radio
- Sous-système d'acheminement (Network Subsystem NSS) :
 - Gestion des appels
 - Gestion de l'itinérance
 - Gestion des abonnés
- Sous-système de supervision et de gestion (OSS)
 - Configuration du réseau et tests
 - Remontée des anomalies (alarmes)

La liaison radio

Propagation radio

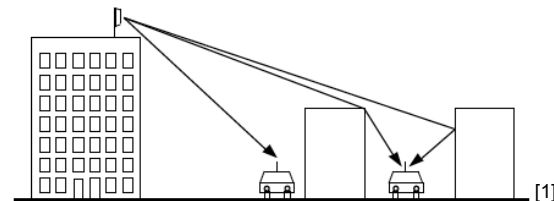


Caractéristiques de la propagation radio :

- Une onde peut subir plusieurs altérations : diffractions, réflexions, diffusions (évanouissements rapides). Pour un signal émis :

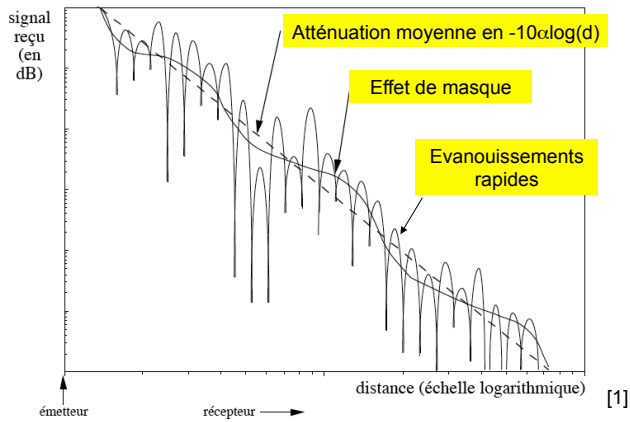
$$\text{Signal reçu} = (\text{onde directe}) + \sum \text{ondes diffractées} + \sum \text{ondes réfléchies}$$

- Les trajets de l'émetteur au récepteur peuvent être multiples (absence fréquente de trajet direct en milieu urbain),
- Présence d'obstacles (éventuellement mobiles) autour du récepteur : effet de masque (*shadowing* ou évanouissement lent).



La liaison radio Propagation radio

- Exemple de variations du signal reçu en fonction de la distance :



La liaison radio Propagation radio

- Modèle à trois étages : $P_r = P_e g_e g_r k \frac{\lambda^2}{r^\alpha} a_{shadow} a_{fading}$

- Dans le vide : $P_r = P_e g_e g_r \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$

P_r	Puissance reçue à la distance r
P_e	Puissance émise
g_e, g_r	Gains des antennes par rapport à une antenne isotropique
α	Coefficient d'atténuation (entre 2 et 4, typique = 3.5)
k	Constante
a_{shadow}	Effet de masque
a_{fading}	Evanouissement rapide
λ	Longueur d'onde

La liaison radio Propagation radio

- Modèle à trois étages $P_r = P_e g_e g_r k \frac{\lambda^2}{r^\alpha} a_{shadow} a_{fading}$

Affaiblissement de parcours <i>path-loss</i>	$k \lambda^2 / r^\alpha$
Effet de masque <i>shadowing</i>	a_{shadow} : loi log-normale $10 \log(a_{shadow}) \sim N$ (moyenne=0dB, écart-type=5...7dB)
Evanouissement rapide <i>fading</i>	a_{fading} ~ loi exponentielle $\sqrt{a_{fading}}$ ~ loi de Rayleigh

La liaison radio Puissance émise, puissance reçue

- Quelques ordres de grandeurs de puissances d'émission :

Station de base GSM	35 W/45.5 dBm 45 W/46.5 dBm
Station Mobile GSM 900	2 W/33 dBm

Station de base UMTS	20 W/43 dBm 40 W/46 dBm
Station Mobile UMTS	125 mW/21 dBm

- Ordres de grandeur des gains d'antenne :
 - Station mobile : 0 dBi
 - Station de base : 11 dBi (antenne omni), 17 dBi (tri-sectorisée)

La liaison radio

Puissance émise, puissance reçue

- Exemple de calcul de la puissance reçue dans le vide :

$$\text{GSM 900, } P_e=45.5 \text{ dBm, } G_e=10\log(g_e)=17 \text{ dBi, } G_r=10\log(g_r)=0 \text{ dBi, } \alpha=2$$

- $f=900 \text{ MHz}$ donne $\lambda = c/f = 33 \text{ cm}$
- Dans le vide : $k = 1/(4\pi)^2$
- En dB : $P_r = P_e + G_e + G_r + 10\log(k) + 20\log(\lambda) - 10\alpha\log(r)$
- A 1000 m (voie descendante) : $P_r = -29 \text{ dBm}$
- Formule générale dans le vide :

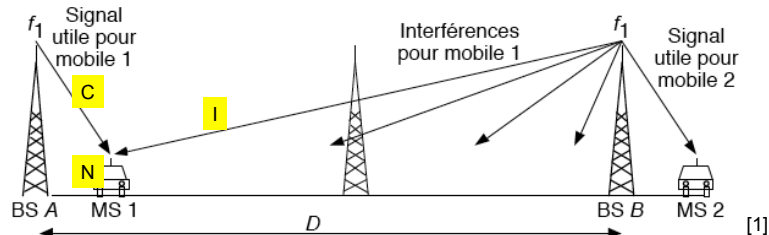
$$P_r(\text{dBm}) = P_e(\text{dBm}) + G_e + G_r - L$$

$$L = 32.4 + 20\log(f(\text{MHz})) + 20\log(r(\text{Km}))$$

La liaison radio

Interférences

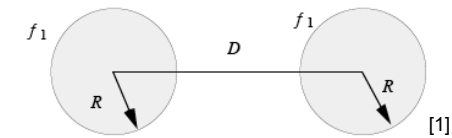
- L'utilisation d'une même fréquence sur deux sites éloignés crée de l'interférence co-canal.
- Grandeurs principales :
 - Puissance du signal utile : C (parfois S ou P_{Rx} , on dit aussi niveau, *level*)
 - Ensemble des interférences : I (puissance)
 - Bruit (thermique) : N (puissance, $N=NoW$)
- Mesure de la qualité radio : $C/(I+N) \sim C/I$ ou SINR \sim SIR



La liaison radio

Interférences

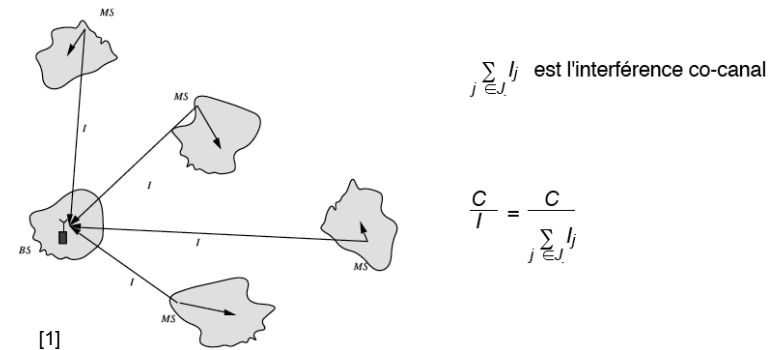
- Dans un réseau cellulaire F/TDMA, les ressources fréquentielles sont réutilisées :
 - R : rayon de la cellule,
 - D : distance de réutilisation des fréquences.
- Les cellules utilisant la même fréquence s'interfèrent mutuellement :
 - $D/R >$ seuil



La liaison radio

Interférences

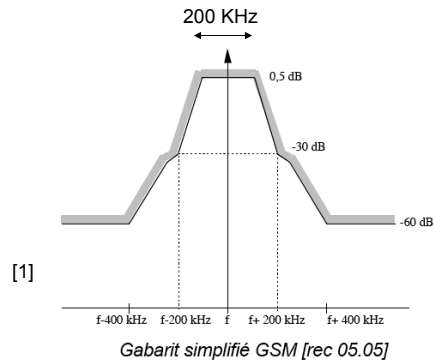
- Principe du calcul de l'interférence co-canal :



La liaison radio

Interférences

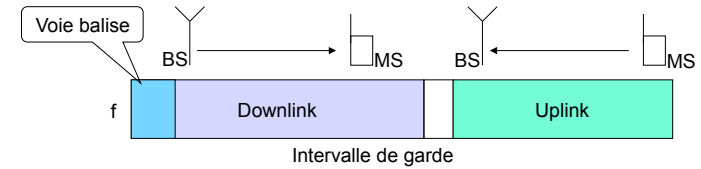
- L'utilisation d'une fréquence f crée de l'interférence sur les bandes adjacentes : interférence canaux adjacents.
- L'interférence canaux adjacents dépend du type de modulation.
- Le signal émis doit être à l'intérieur du gabarit.



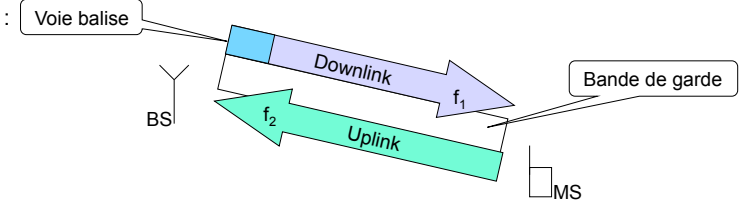
La liaison radio

L'organisation des ressources radio

- Le duplexage : TDD/FDD
- TDD :



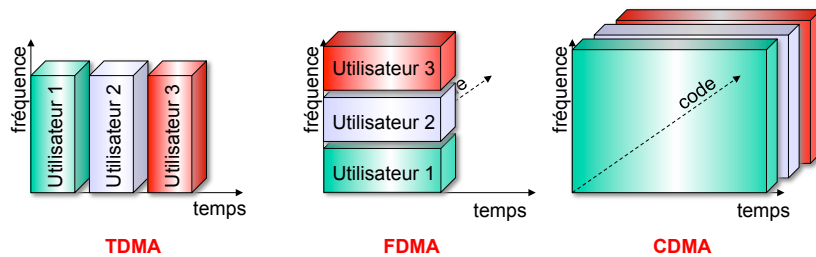
- FDD :



La liaison radio

L'organisation des ressources radio

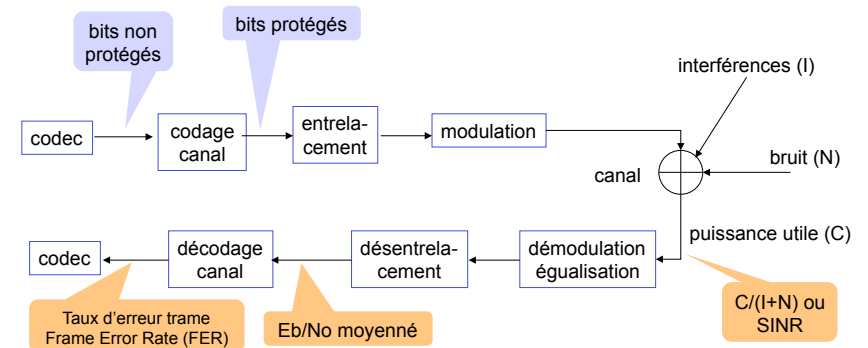
- Le multiplexage : TDMA/FDMA/CDMA



La qualité de service

Critères de qualité radio : SINR, Eb/No

- La qualité du signal radio est mesurée par le SINR.
- Les services de type circuit (e.g. la voix) sont caractérisés par un seuil de fonctionnement Eb/No.
- Chaîne de transmission simplifiée :



La qualité de service

Critères de qualité radio : SINR, Eb/No



- Le SINR est un rapport de puissances à l'entrée de la chaîne de réception. Le SINR seuil dépend du service et du système.
- Eb est l'énergie bit, No est la densité spectrale du bruit. L' $[Eb/No]_{seuil}$ est caractéristique du service. On parle « d'EbNo ».
- Le codage canal peut être vu comme un *booster* permettant un seuil de fonctionnement Eb/No plus faible.
- Ordre de grandeur de l' $[Eb/No]_{seuil}$ pour la voix : $[EbNo]_{seuil} \sim 6dB$.
- Une ambivalence sur Eb : bit codé par le codage canal ou le bit non protégé, i.e. d'information, i.e. utilisateur.

La qualité de service

Probabilité de blocage, de coupure



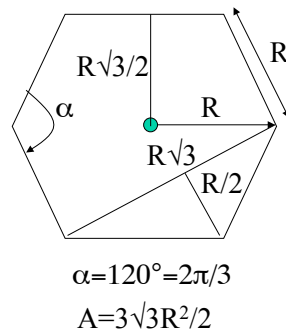
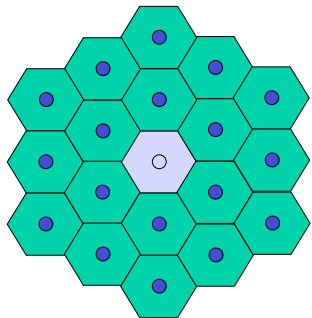
- Autres mesures de la qualité :
- Probabilité de blocage (blocking) : probabilité que le contrôle d'admission rejette un nouvel appel par manque de ressources. On utilise la loi Erlang-B pour le dimensionnement. On désire généralement $P_b < 2\%$.
- Probabilité de coupure (dropping) : probabilité qu'un appel en cours soit interrompu. Raisons possibles :
 - Mauvaises conditions radio persistantes,
 - Echec du hand-over.
 - On utilise parfois un Grade of Service $GoS = 10 * P_{drop} + P_b$
- Probabilité de dépassement (outage) : probabilité que le SINR soit inférieur au SINR seuil. $P_{out} = Pr(SINR < SINR_{seuil})$. $P_{out} < 2\%$ pour un service de parole.

La planification cellulaire

Modèle hexagonal



- Modèle régulier et homogène (propagation et trafic) de réseau utile pour une première planification.



La planification cellulaire

Motif de réutilisation

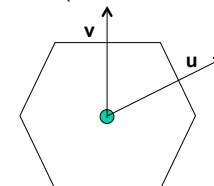


- Motif cellulaire : ensemble des cellules dans lequel chaque fréquence est utilisée une et une seule fois.

- Les motifs optimaux sont de taille K tel que : $K = i^2 + ij + j^2, i, j \in \mathbb{N}$.

- Distance de réutilisation : $D = \sqrt{(3K)} R$

- K est la taille du motif,
- Term. : K est appelé le facteur de réutilisation (ou *reuse factor* ou *reuse*),
- R est le rayon de la cellule (cercle circonscrit à l'hexagone).



$$OM = iu + jv$$

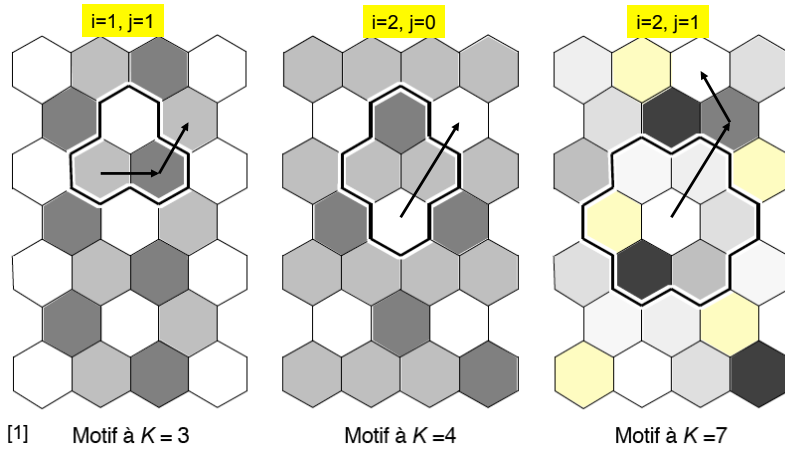
$$D = |OM|$$

La planification cellulaire

Motif de réutilisation



- Exemples de motifs :

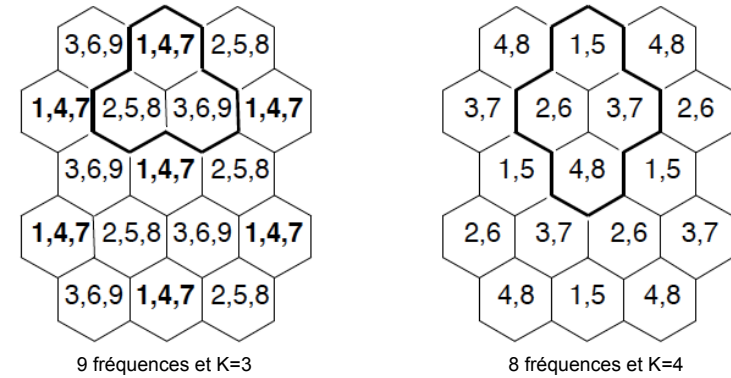


La planification cellulaire

Motif de réutilisation



- Répartition des fréquences de manière régulière :

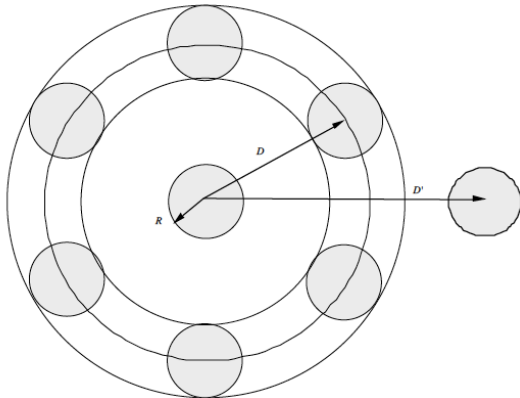


La planification cellulaire

Motif de réutilisation



- Lorsque le motif est régulier, les interféreurs co-canal se trouvent sur des couronnes concentriques :



La planification cellulaire

Motif de réutilisation



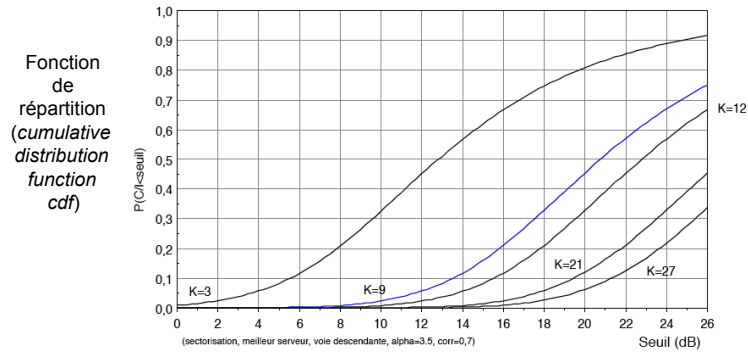
- Détermination du motif en fonction du C/I_{seuil} (sans prise en compte des évanouissements lents et rapides).
- Interférence co-canal : $I \sim \sum_{j=1}^6 I_j$
- En bordure de cellule : $C = P_e k_0 R^{-\alpha}$ et $I_j \sim P_e k_0 D^{-\alpha}$.
- D'où : $I/C = 6 (D/R)^{-\alpha}$ et $K \geq (6 C/I_{\text{seuil}})^{2/\alpha} / 3$
- La taille dépend du C/I seuil mais ne dépend pas de la puissance d'émission.

La planification cellulaire

Motif de réutilisation



- **Détermination du motif** avec prise en compte de l'effet de masque : le C/I est une variable aléatoire qui suit approximativement une loi log-normale.



[1]

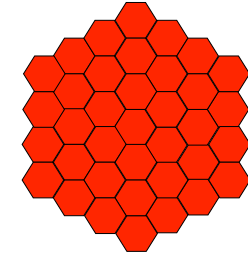
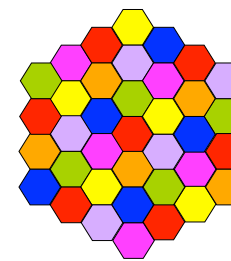
$\alpha = 3,5$ $\sigma = 6$ dB Taille des motifs : K (avec tri sectorisation)

La planification cellulaire

Motif de réutilisation



- Remarque : en CDMA, le motif de réutilisation est de taille $K=1$.



GSM :
motifs de réutilisation généralement différents de 1
Exemple : $K=18$ pour la voie balise
Exemple : $K=12$ pour les autres canaux
Exemple : $K=3$ avec du saut de fréquence synthétisé

UMTS :
motifs de réutilisation = 1
Planification des codes PN

+ : planification facile
- : gestion des interférences

La planification cellulaire

Couverture : sensibilité



- Une station mobile est couverte si :
 - La puissance du signal reçu est supérieure à sa sensibilité et
 - Le SINR atteint le SINR seuil.
- Ordres de grandeur de la sensibilité :

Station de base GSM	-110 dBm
Station mobile GSM	-100 dBm

- La sensibilité est relative au SNR, cas sans interférences.

La planification cellulaire

Couverture



- Une caractéristique fondamentale du récepteur pour un certain service cellulaire : **la sensibilité**.
- C'est la puissance minimale de réception nécessaire à un service de qualité.
- En limite de couverture, en l'absence d'interférences et d'effet de masque :

$$P_r [mW] = S_{\text{seuil}} = \left(\frac{C}{N} \right)_{\text{seuil}} \times N$$

$$P_c [dBm] + G_e + G_r - L(R) = S_{\text{seuil}} [dBm] = \left(\frac{C}{N} \right)_{\text{seuil}} [dB] + N [dBm]$$

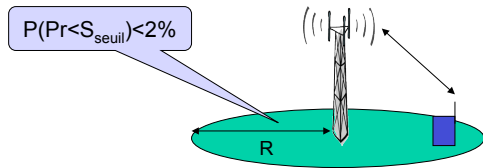
- On déduit de la puissance d'émission, de la sensibilité (S_{seuil}), du C/N seuil et du modèle de propagation (L), le rayon R de la cellule.

La planification cellulaire

Couverture



- En présence d'effet de masque, la puissance reçue est une variable normale en dBm.
- Il est impossible de garantir un SINR en tout point d'une cellule à tout instant à cause de l'effet de masque.
- On s'intéresse alors à la probabilité que la puissance reçue soit inférieure à la sensibilité : $P(\text{Pr} < S_{\text{seuil}})$
- Le rayon R est déduit de la probabilité de dépassement.

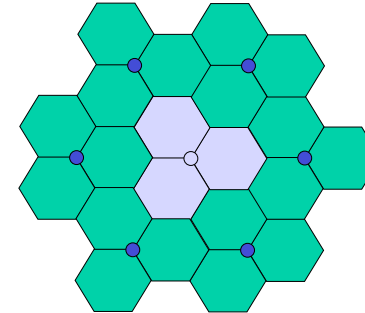


La planification cellulaire

Sectorisation

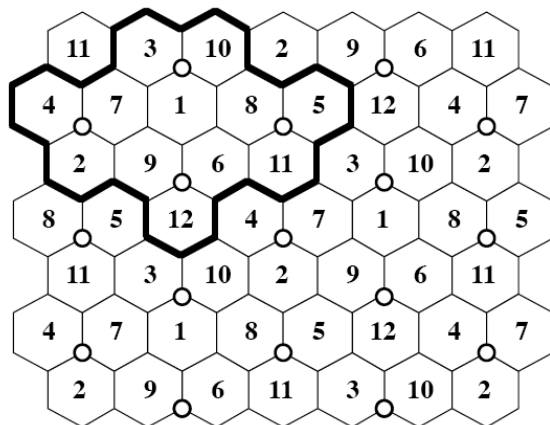


- Utilisation d'antennes directives pour réduire le nombre de sites : un site couvre trois cellules.
- Le C/I est légèrement détérioré pour un K donné par rapport au cas omnidirectionnel. On choisit en général K multiple de 3.



La planification cellulaire

Sectorisation



Exemple de motif tri-sectoriel à 12

La planification cellulaire

Estimation de la capacité : système F/TDMA



- Soit :
 - W , la bande allouée à l'opérateur,
 - w_c , l'occupation spectrale d'une bande duplex,
 - n , le nombre de canaux physiques par canal fréquentiel duplex (nombre de slots d'une trame TDMA).
- L'opérateur dispose de W/w_c porteuses fréquentielles duplex.
- La bande équivalente par utilisateur vaut : $w_u = w_c/n$.
- L'opérateur dispose ainsi de W/w_u canaux physiques, soit $W/(Kw_u)$ par cellule.

- Capacité (en nombre de canaux par cellule et par Hz) :

$$C = \frac{1}{Kw_u} = \frac{n}{Kw_c}$$

La planification cellulaire

Estimation de la capacité : système F/TDMA



- Exemples de capacités :
- NMT :
 - $w_c = 2 \times 25$ kHz, $n=1$ d'où $w_u = 50$ kHz
 - $K=21$ d'où $C=0.95$ canaux/cellule/Hz
- GSM :
 - $w_c = 2 \times 200$ kHz, $n=8$ d'où $w_u = 50$ kHz
 - $K=9$ d'où $C=2.2$ canaux/cellule/Hz

La planification cellulaire

Estimation de la capacité : système CDMA



Une première évaluation ("évaluation d'ingénieur") pour la capacité naïve du CDMA (voie montante).

Cette estimation est donnée dans [3] :

$$C_{cell} = (W_r / R_u) \cdot (F / [E_b/N_0]_{seuil}) \cdot \delta^{-1}$$

où

C_{cell} = nombre d'appels par cellule,

W_r = bande de référence (3.84 Mcps pour l'UMTS),

R_u = débit binaire utilisateur pour un service de ref. (12.2 Kbps pour la voix),

F = "frequency reuse efficiency" (rapport d'interférence $F = I_{intern} / I_{total}$, une valeur typique est 0.6),

$[E_b/N_0]_{seuil} = Eb/No$ "cible" pour le service (e.g. 6 dB pour la voix),

δ = facteur d'activité vocale.

La planification cellulaire

Estimation de la capacité : système CDMA



- Exemple : IS-95

$$C_{cell} = (W_r / R_u) \cdot (F / [E_b/N_0]_{mesh}) \cdot \delta^{-1}$$

$$W_r = 1.25 \text{ MHz,}$$

$$R_u = 9.6 \text{ kbit/s}$$

$$[E_b/N_0] = 6 \text{ dB} = (4 \text{ "en unité naturelle"})$$

$$\delta = 50\% \text{ de silence}$$

$$F = 60\%$$

$$C_{cell} \approx (1250/9.6) \times 0.6 \times (1/4) \times 2 = 39 \text{ utilisateurs pour la direction- (reverse)}$$

Capacité normalisée : (considérer 1 MHz au lieu de 1.25 ; et la transmission duplex)

$$C_{cell} \approx 39 / (1.25 \times 2) \approx 15 \text{ utilisateurs /cellule \&/MHz}$$

(pour mémoire ... dans GSM une comptabilité donne

$$C_{cell} \approx (1/2) (1/0.2) \times 8 \times (1/7) \sim 3 \text{ ... mais ce ne sont que des estimations ...)$$

Pour un couple de porteuses UMTS ($\sim 2 \times 4$ MHz utile) ...

120 utilisateurs ... en pratique plutôt 60 utilisateurs.

Les fonctions de mobilité

Gestion de l'itinérance



• Inscription et paging

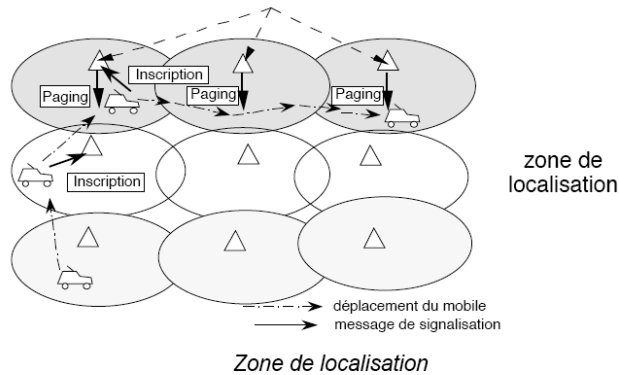
- **Paging** : émettre les appels sur toutes les cellules du système ou d'une zone du système.
- **Inscription** : connaître à tout moment la localisation du mobile grâce à une procédure dite d'inscription (*location update procedure* ou *registration*).
 - Possible grâce à la voie balise.

Les fonctions de mobilité

Gestion de l'itinérance



- **Zone de localisation** : un ensemble de cellules à l'intérieur duquel un mobile peut se déplacer sans se signaler au réseau. Lorsque le mobile entre dans une nouvelle zone de localisation, il le signale au réseau.



Les fonctions de mobilité

Gestion des abonnés



• Déroulement d'une inscription

- Nécessité d'un canal en émission périodique avec identification de la zone de localisation : voie balise (ou *beacon* ou *broadcast control channel*).
- Phases :
 - Ecoute de la voie balise
 - Lecture de la zone de localisation
 - Comparaison avec la précédente zone mémorisée
 - Si la zone est différente, envoi d'un message d'inscription (mise à jour des VLR et HLR)
 - Retour sur la voie balise

Les fonctions de mobilité

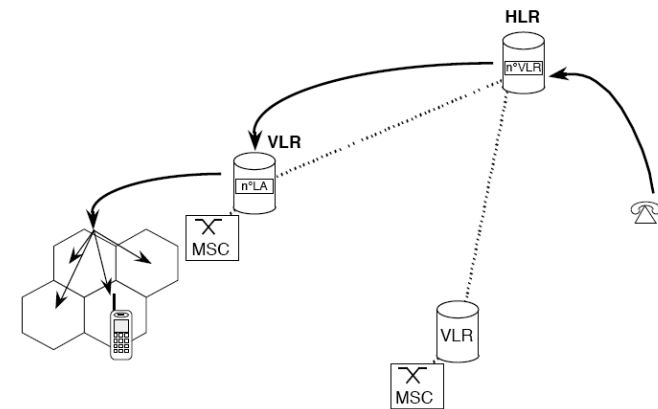
Gestion des abonnés



- Il y a deux types de base de données.
- La HLR (Home Location Register) :
 - Profil de l'abonné (identité, services souscrits, restrictions,...),
 - Localisation grossière de l'abonné (numéro de VLR).
- La VLR (Visitor Location Register) :
 - Liste des abonnés gérés par la VLR,
 - Profil des abonnés gérés par la VLR (image d'une partie de la HLR),
 - Zone de localisation ou cellule où se trouve l'abonné.

Les fonctions de mobilité

Gestion des abonnés



LA : Location Area, zone de localisation

Localisation à deux niveaux dans le HLR et le VLR

Les fonctions de mobilité

Handover



- Types de handovers :
 - Entièrement géré par l'infrastructure
 - Décidé par l'infrastructure avec l'aide du mobile (GSM)
 - Entièrement géré par le mobile (DECT)
- Principales phases (cas GSM) :
 - Mesure du signal reçu par le mobile
 - Mesure du niveau de réception sur les cellules voisines (par le mobile, sur les fréquences balise)
 - Réservation par le réseau d'un canal physique sur la nouvelle cellule
 - Réservation d'un chemin de connexion dans le réseau fixe
 - Envoi de l'ordre de handover au mobile avec indication du nouveau canal et de la nouvelle cellule
 - Suppression du premier chemin de connexion

Acronymes



BER : Bit Error Rate
BSC : Base Station Controller (GSM)
BTS : Base Transceiver Station (GSM)
DECT : Digital Enhanced Cordless Telecommunications
CDMA : Code Division Multiple Access
FDMA : Frequency Division Multiple Access
FER : Frame Error Rate
GoS : Grade of Service
GSM : Global System for Mobile Communications
NMT : Nordic Mobile Telephone
PAN : Personal Area Network
PMR : Private Mobile Radio
PSTN : Packet Switched Telephone Network
RNC : Radio Network Controller (UMTS)
SIR : Signal to Interference Ratio (ou CIR)
SINR : Signal to Interference plus Noise ratio (ou CINR)
TDMA : Time Division Multiple Access
UMTS : Universal Mobile Telecommunications System
WLAN : Wireless Area Network

Références



- [1] X. Lagrange, Ph. Godlewski, « Les concepts cellulaires », cours ENST, fév. 1999.
- [2] X. Lagrange, Ph. Godlewski, S. Tabbane, « Réseaux GSM », 5ème édition, Hermès, 2000.
- [3] Harri Holma, Antti Toskala « WCDMA for UMTS », Wiley 2002