

# Le GSM : planification et dimensionnement

## 6. 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.
- Déploiement du réseau fixe via un ensemble de faisceaux hertziens pour interconnecter les stations de base.

## 7. LA NORME GSM

Le tableau ci-dessous résume les principales propriétés de la couche radio GSM :

	GSM	DCS
Bande de fréquence	890-915 MHz (up) 935-960 MHz (down)	1710-1785 MHz (up) 1805-1880 MHz (down)
Nombre d'intervalles de temps par trame TDMA	8	8
Nombre de porteuses	124	374
Fréquences porteuses	$f_c = 935 + 0,2 \cdot n$ , pour $1 \leq n \leq 124$	$f_c = 1805,2 + 0,2 \cdot (n - 512)$ , pour $512 \leq n \leq 885$
Ecart Duplex	45 MHz	95 MHz
Rapidité de modulation	271 kbit/s	271 kbit/s
Débit de la parole	13 kbit/s (5,6 kbit/s)	13 kbit/s (5,6 kbit/s)
Débit après codage d'erreur	22,8 kbit/s	22,8 kbit/s
Débit max de données	12 kbit/s	12 kbit/s
Accès multiple	Multiplexage fréquentiel et temporel, duplexage fréquentiel	Multiplexage fréquentiel et temporel, duplexage fréquentiel
Rayon des cellules	0,3 à 30 km	0,1 à 4 km
modulation	GMSK	GMSK

remarque : la bande GSM a été étendue récemment et est aujourd'hui égale : 880-915 MHz, 925-960 MHz.

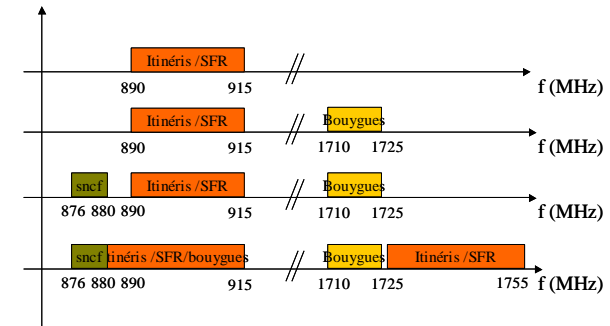


Figure 1 : évolution du partage des ressources spectrales sur le lien montant au cours de la dernière décennie

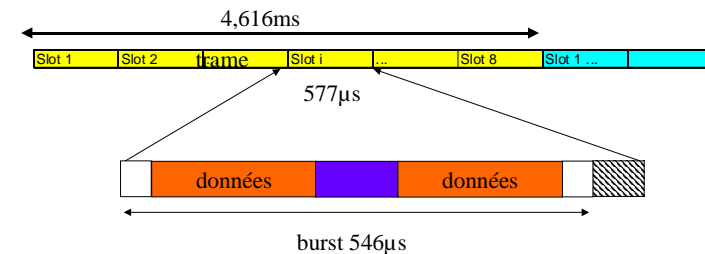


Figure 2 : durée des slots et des trames GSM

## 8. CONTRAINTES RADIO

### 8.1 RAPPORT SIGNAL A 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/interférences)).

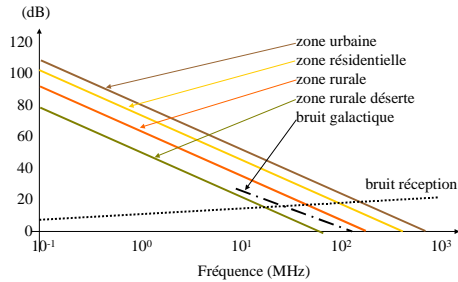


Figure 3 : niveau de bruit électromagnétique relativement au bruit thermique minimal des systèmes de réception

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. Comme le montre la Figure 3, dans la gamme de fréquences utilisées en GSM, le bruit en réception est majoritairement un bruit thermique (ou bruit Johnson) lié à l'échauffement des électrons dans le système de réception. Ce bruit a des propriétés bien spécifiques : il est blanc, à moyenne nulle, gaussien, additif.

- Blanc veut dire qu'il est réparti sur l'ensemble des fréquences de façon uniforme : sa densité spectrale de puissance (DSP) est donc uniforme sur toutes les fréquences (sauf pour une fréquence nulle où il est égal à 0).
- Moyenne nulle : il n'y a pas de composante continue. Si l'on fait la somme (ou l'intégration) du bruit au cours du temps, elle tend vers 0.
- Gaussien : Ce signal aléatoire, a une distribution d'amplitude bien particulière : la probabilité d'avoir un bruit d'amplitude est régie par une loi normale (forme gaussienne). L'écart-type de la distribution  $\sigma$  est le seul paramètre à connaître pour caractériser le niveau de bruit. La puissance moyenne de ce bruit que l'on nomme  $N_0$  est égale à la variance des échantillons :

$$E-1: \sigma^2 = N_0$$

- Additif : un bruit additif est un bruit dont le niveau ne dépend pas de l'amplitude du signal reçu. Statistiquement, le bruit est indépendant du signal reçu, et le signal observé est la somme du signal reçu et du bruit.

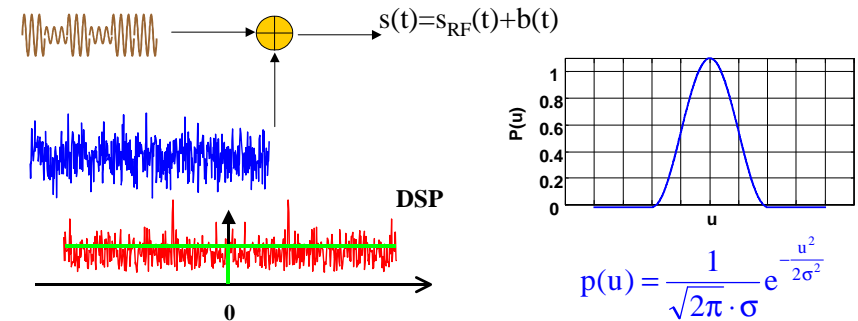


Figure 4 : représentation du bruit AWGN (Additive White Gaussian Noise) : aléatoire, additif, blanc et gaussien.

Le niveau de bruit en réception s'estime assez facilement à partir de la formule de Johnson :

$$E-2 \quad N_0 = \kappa \cdot T_K \text{ Watt/Hz}$$

Où  $\kappa$  est la constante de Boltzman ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K) et  $T_K$  est la température en Kelvin ( $T_K = 290^\circ K$ , en référence). Finalement, comme le bruit est étalé sur tout le spectre, seule la partie qui est présente sur la bande spectrale utilisée par la transmission interfère avec le signal transmis. La puissance du bruit après filtrage est égale à :

$$E-3 \quad N = N_0 \cdot W = \kappa \cdot T_K \cdot W \text{ Watt}$$

Où  $W$  est la bande passante utilisée par le système.

On peut alors estimer le bruit minimal pour un récepteur GSM mobile à 1 température moyenne de 290K. La bande utile d'un canal GSM est estimée à  $W = 271 \text{ kHz}$  (c'est une approximation faite à partir de la vitesse de modulation, cf Figure 5) :

$$E-4 \quad N \approx 10^{-15} \text{ Watt ; soit } N_{dB} \sim -120 \text{ dBm}$$

Cette approximation permet de quantifier le niveau de bruit dans le récepteur. Sachant alors que la norme GSM préconise en réception un rapport signal à bruit d'au moins 8dB, et en prenant une marge de protection de 1 à 3dB (pertes liées à la présence du corps humain, facteur de bruit de l'amplificateur en réception), on obtient un niveau minimal en réception de l'ordre de :

$$E-5 \quad C_{dB} - N_{dB} > 10 \text{ dB} \quad \left( \text{soit } \frac{C}{N} > 10 \right) \text{ soit } C_{dB} > -110 \text{ dBm}$$

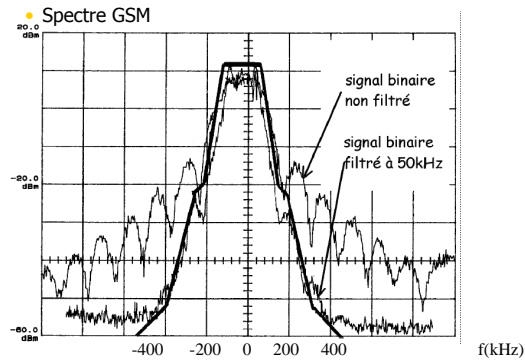


Figure 5 : DSP d'un signal GSM.

## 8.2 RAPPORT SIGNAL A BRUIT C/I

Les interférences sont de 3 types : les interférences inter-symboles (IIS), les interférences interférences (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. Le choix d'un partage de ressources de type FTMA (Frequency and Time Division Multiple Access) impose une répartition des ressources en temps et en fréquence. Sur un canal en fréquence, on peut avoir jusqu'à 8 voix multiplexées en temps (8slots par trame). 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 (cf. Figure 6).

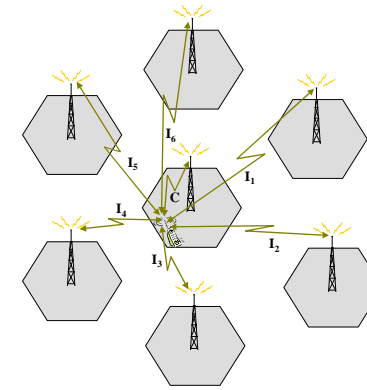


Figure 6 : Interférences entre cellules voisines réutilisant la même fréquence sur un modèle hexagonal

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 (cf. Figure 5). Ainsi, à puissance identique, 2 canaux voisins ( $f_i$  et  $f_{i+1}$ ) ont un rapport C/I d'environ 18dB, 2 canaux voisins ( $f_i$  et  $f_{i+2}$ ) un C/I de 50dB, et 2 canaux ( $f_i$  et  $f_{i+3}$ ) 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/lc	9dB
Interférences 1er canal adjacent	C/la1	-9dB
Interférences 2ième canal adjacent	C/la2	-41dB
Interférences 3ième canal adjacent	C/la3	-49dB

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

$$E-6 \quad \frac{C}{I} = \frac{C}{\sum_{\text{cellcocanal}} I_i + R_1 \cdot \sum_{\text{celladjacent 1}} I_i + R_2 \cdot \sum_{\text{celladjacent 2}} I_i + R_3 \cdot \sum_{\text{celladjacent 3}} I_i}$$

Où  $R_i$  est le rapport de protection donné par :

$$E-7 \quad R_i = \frac{C/la_i}{C/lc}$$

D'après le tableau précédent,  $R_1=0.015$  ;  $R_2=10^{-5}$  ;  $R_3 \sim 10^{-6}$ .

## 9. CONTRAINTES DE TRAFIC

Dans un réseau GSM, il ne s'agit cependant pas seulement de garantir un lien radio, mais également de garantir un certain trafic. Le trafic est estimé statistiquement à partir de la densité de population et du type d'activité associée à chaque région. Par exemple, la probabilité d'appel dans une zone à forte densité d'habitation est très différente de la probabilité d'appel dans une zone à forte densité d'activité professionnelle.

Les lois d'Erlang sont utilisées pour caractériser le taux d'appels téléphoniques. Cette loi est paramétrée par 2 paramètres : le taux d'appel  $\mu$ , et la durée moyenne d'appel H. L'intensité de trafic par utilisateur s'exprime par :

$$\text{E- 8 } A_U = \mu \cdot H \text{ erlang}$$

Connaissant la densité de population associée à une zone géographique, il est facile de déterminer la densité de trafic par le produit :

$$\text{E- 9 } A = A_U \cdot d_H \text{ erlang/km}^2$$

où  $d_H$  est la densité de population par  $\text{km}^2$ .

Enfin, si l'on est capable de prédire la zone couverte par une cellule, il est alors possible d'estimer le trafic que la cellule doit absorber :

$$\text{E- 10 } A_{\text{tot}} = A \cdot S \text{ erlang}$$

où S est la superficie de la cellule.

Les lois d'Erlang permettent alors de déterminer le nombre de canaux nécessaires pour absorber ce trafic statistique avec un taux d'échec donné :

La loi d'Erlang B est donnée par la formule suivante :

$$\text{E- 11 } P_c = \frac{A^{N_c} \frac{1}{N_c!}}{\sum_{n=0}^{N_c} A^n \frac{1}{n!}}$$

Où  $N_c$  est le nombre de canaux voix.

Ainsi, à partir de la connaissance de la densité de trafic et de la surface couverte par un émetteur, il est possible de prédire le nombre de canaux à affecter à une cellule pour garantir un taux de blocage inférieur à un certain pourcentage (par exemple 1%).

On comprend bien alors que le déploiement d'un réseau GSM ne repose pas seulement sur une couverture radio mais sur une répartition intelligente des ressources radio sur un ensemble de stations de base.

## 10. DIMENSIONNEMENT DU RESEAU GSM

### 10.1 DEFINITION DES ZONES DE SERVICES

Le dimensionnement doit prendre en compte les contraintes radio et les contraintes de trafic.

Il est possible, dans un premier temps, pour une zone géographique donnée, d'estimer la capacité globale d'un système GSM, en exploitant le modèle hexagonal théorique.

Soit un système avec S canaux disponibles. Le nombre de canaux voix disponibles n'est pas égal au nombre de canaux en fréquences.

Pour chaque cellule, il faut réserver une voix balise qui contient les canaux de synchronisation (FCH SCH, BCCH) : ces canaux permettent aux mobiles de détecter la présence des stations de base. Lors de l'attribution d'un certain nombre de fréquences à une station de base, il faut donc éliminer une des fréquences pour compter les ressources radios.

D'autre part, chaque canal en fréquence est susceptible de fournir 8 canaux de données TCH (chaque trame contient 8 slots multiplexés) : le nombre total de canaux est donc égal à 8 fois le nombre de canaux en fréquence.

Cependant, certains canaux communs, et en particulier la voix balise, nécessitent des ressources. On considère en général, qu'1/8<sup>ème</sup> des ressources est utilisé pour les canaux communs (y compris la voix balise).

Ainsi, pour N canaux attribués à une station de base, le nombre de TCH est donné par :

$$\text{E11 } N_{TCH} = N \cdot 7/8$$

Si  $N_f$  est le nombre de porteuses attribuées, alors le nombre de canaux physiques TCH disponibles est de :

$$\text{E- 12 } N_c = 7 \cdot N_f$$

En conséquence, le tableau ci-dessous donne le nombre de canaux voix en fonction du nombre de porteuses attribuées à une cellule, conformément à l'équation E- 11 :

Nb fréquences	1	2	3	4	5	6	7	8
Canaux physiques	8	16	24	32	40	48	56	64
Nb TCH	7	14	21	28	35	42	49	56

La figure ci-dessous représente le taux de rejet d'appel en fonction de la densité de trafic demandée, et pour un nombre de porteuses allant de 1 à 7.

Etude du taux d'erreur en fonction du nombre de canaux fréquences

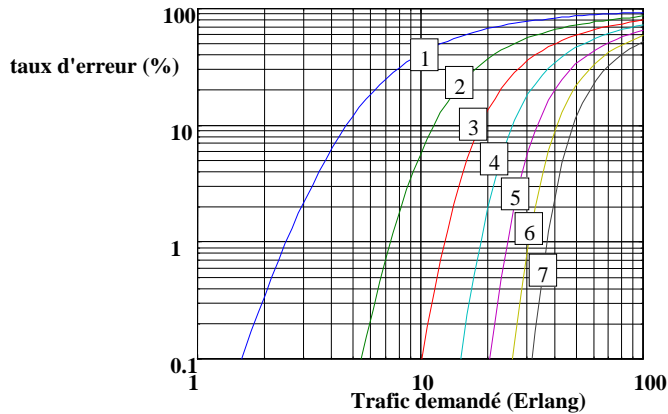


Figure 7 : Etude du taux de refus d'appel en fonction du trafic demandé, pour un nombre de porteuses attribué à la cellule variant de 1 à 8.

### 10.2 FACTEUR DE REUTILISATION DES RESSOURCES

Pour dimensionner un réseau cellulaire, on peut partir d'un modèle théorique hexagonal régulier. Dans ce cas, on cherche à répartir les ressources de façon régulière et optimale, minimisant les interférences. La théorie des graphes offre des résultats intéressants. Un graphe est un ensemble de nœuds et d'arêtes reliant ces nœuds. Dans notre cas, chaque nœud représente une cellule GSM, et les arêtes correspondent à une contrainte de non interférence. Le coloriage de graphe consiste à colorier les sommets du graphe avec un minimum de couleurs, sous la contrainte que 2 sommets voisins ne soient jamais de la même couleur. Dans notre cas, il s'agit donc de colorier les cellules. La notion de voisinage ne se résume pas uniquement aux cellules voisines géométriquement (qui ont un bord commun). On peut fixer une contrainte plus stricte de réutilisation des ressources afin de réduire les interférences.

On appelle distance de réutilisation la distance entre les cellules co-canales, telles qu'illustrées à la figure suivante :

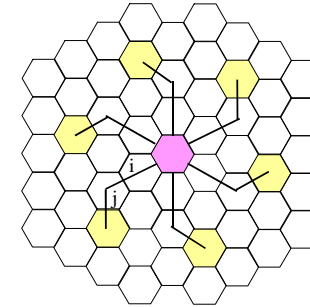


Figure 8 : représentation des cellules co-canal

On peut montrer que chacune des cellules du voisinage de la cellule centrale peut être coloriée avec une couleur différente, et que chaque cellule aura 6 premières voisines co-canales, comme sur le schéma. Ces 6 co-canales sont déterminées par les paramètres  $i$  et  $j$ , qui représentent le nombre de cellules que l'on traverse en 2 sauts comme illustré. La théorie des graphes montre que le nombre de couleurs nécessaire au coloriage complet de ce schéma est donné par la formule suivante :

$$N = i^2 + ij + j^2$$

Résumé dans le tableau :

$i / j$	1	2	3	4
1	3	7	13	21
2	7	12	19	28
3	13	19	27	37
4	21	28	37	48

On appelle  $Q=D/R$  le facteur de réutilisation, où  $D$  est la distance entre 2 cellules co-canales, et  $R$  le rayon des cellules. Il est à peu près égal à :

$$E-13 \quad Q \approx \sqrt{3N}$$

On va maintenant calculer le rapport  $C/I$  en fonction de ce facteur de réutilisation. On tient compte ici uniquement des interférences co-canales. Le rapport  $C/I$  est alors donné par :

$$E-14 \quad \frac{C}{I} = \frac{C}{\sum_i I_i}$$

Considérons un mobile en limite de cellule. La puissance utile reçue, est donnée par :

$$E-15 \quad C = P_0 \left( \frac{R}{d_0} \right)^{-n},$$

où  $r$  est le rayon de la cellule.

La puissance en provenance de chacun des interférents peut être approchée par la distance entre les 2 stations de bases, soit la distance  $D$ . on a alors :

$$E-16 \quad \sum_i I_i = 6P_0 \left( \frac{D}{d_0} \right)^{-n},$$

Ce qui permet d'estimer le  $C/I$  par

$$E-17 \quad \frac{C}{I} = \frac{Q^n}{6} = \frac{\sqrt{3N}^n}{6}$$

Finalement, on pourra choisir  $N$ , en fonction de la contrainte de  $C/I$  et du modèle d'affaiblissement  $n$ .

Cependant, il est évident que ce genre de contrainte n'est qu'une approximation bien théorique de la réalité. En pratique, les cellules sont bien loin d'être hexagonales, et le nombre de cellules voisines, les niveaux d'interférence, et l'affectation des canaux nécessite une approche empirique basée sur plusieurs tests.

## 11. PLANIFICATION DU RESEAU

Dans la pratique, le déploiement d'un réseau GSM nécessite l'optimisation du placement des sites, sous les 2 contraintes de type radio et trafic. Il s'agit de tester, en fonction du type d'antenne, de sa puissance d'émission et de son orientation, la zone couverte par l'émetteur. Une approche pas à pas permet progressivement de faire converger le réseau vers une bonne configuration.

Le principe est le suivant (en simulation ☺) :

- répartir les émetteurs sur le terrain
- établir les zones de couverture, et les adapter en déplaçant les sites, en modifiant les puissances d'émission, en choisissant les orientations.
- Une fois la couverture assurée, il faut rechercher une répartition des fréquences en analysant les sites qui sont voisins.
- Il faut alors rechercher une répartition des fréquences entre les sites. On commencera par positionner les fréquences BCCH, puis les canaux de données.
- Dans le cas où la planification n'arrive pas à converger, il faut alors densifier le réseau : soit rajouter des sites, soit remplacer des émetteurs omnidirectionnels par des émetteurs tri-sectoriels.

Notons qu'en cours d'exploitation, l'augmentation du nombre d'abonnés impose à l'opérateur de faire évoluer son réseau, en tenant compte de l'évolution probable du nombre d'abonnés et des taux d'appel.

## 12. PREDICTION DE COUVERTURE RADIO

Il est impossible d'envisager le déploiement complet en phase de tests, et les opérateurs sont amenés à utiliser des logiciels de simulation qui permettent de prédire la couverture radio associée à chaque émetteur.

En effet, la prédiction de couverture est fondamentale car elle conditionne à la fois les critères radios (on peut prédire le taux d'interférence et le niveau de signal) et les critères trafic (dimensionnement du nombre de canaux).

Les méthodes de prédiction de couverture aujourd'hui utilisées mixent avantageusement les approches empiriques et déterministes.

Les méthodes empiriques, telle la méthode d'Okumura-Hata, utilise des résultats expérimentaux pour estimer la couverture radio. Elles nécessitent de grandes campagnes de mesure, et ne tiennent que très peu compte de la réalité géographique de terrain.

Au contraire, les méthodes déterministes intègrent les effets de relief (au niveau macro), sans tenir compte des propriétés locales.

Les méthodes utilisées (voir dans le logiciel) intègrent en général les 2 approches.

- Les méthodes empiriques intègrent en général la prise en compte des effets de masque et de diffraction sur le profil entre émetteur et récepteur, puis pondèrent ces prédictions par des coefficients déterminés par les formules empiriques d'Okumura et al, ou autres dérivées.
- Les méthodes déterministes procèdent soit par profil (comme pour les méthodes empiriques), et dans ce cas négligent l'effet des chemins latéraux et les effets liés à l'environnement 'micro' (immeubles, forêts,...) ; soit par des approches semblables au lancer de rayon mais avec dans ce cas un coût de calcul assez prohibitif.

Notons que ces prédictions nécessitent plusieurs type d'information : relief et type de terrain. Les opérateurs doivent donc acquérir ces bases de données. Les données de terrain proviennent en général des images satellites qui permettent aujourd'hui d'estimer l'élévation locale de terrain avec une résolution de l'ordre de 3m. Ces données coûtent relativement cher. D'autre part l'affectation des zones (forêt, zone urbaine, etc...) sont effectuées manuellement à partir des cartographies conventionnelles.