



Les bases de l'ingénierie des réseaux mobiles

Cours RE56 Printemps 2004

Alexandre CAMINADA
UTBM
Département Informatique
90010 SEVENANS Cedex

Plan

- 1. Le concept cellulaire**
2. La propagation

Concept cellulaire – Problème

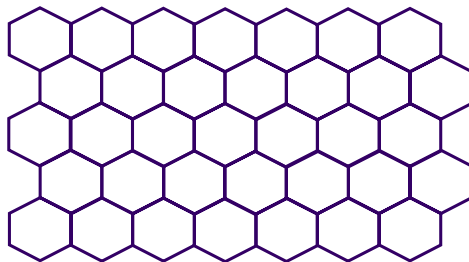
- Besoin: acheminer les communications et les maintenir, en cours de déplacement
 - Couverture radio très étendue
- Problème: la bande de fréquences est limitée
 - Réutiliser les mêmes ressources spectrales dans des endroits plus ou moins proches
 - Disposer plusieurs émetteurs
- Problème: maîtriser les brouillages entre émetteurs utilisant les mêmes ressources spectrales
 - Intervention du système retenu pour l'établissement des canaux
 - Planifier au mieux le réseau des émetteurs
 - Exemple : éviter les points hauts à puissance maximale
 - zones d'ombres à longue distance
 - zones de brouillages à courte distance



Alexandre CAMINADA, UTBM, Département Informatique
D3 - RE56 2004

Concept cellulaire – Pavage régulier

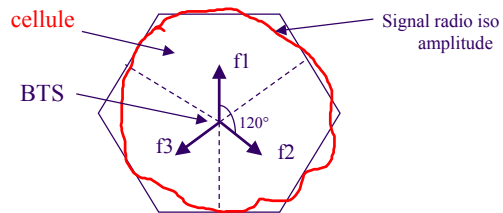
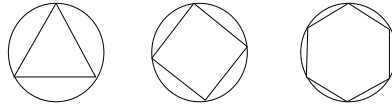
- Partition du plan en hexagones réguliers appelés « cellules »
- Partition régulière = motif
 - maîtrise des cellules voisines, du brouillage
 - maîtrise de la réutilisation de fréquences
 - maîtrise de la couverture radio



Alexandre CAMINADA, UTBM, Département Informatique
D4 - RE56 2004

Concept cellulaire – Hexagone

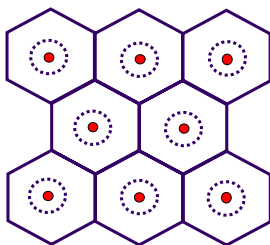
- Nécessité de pouvoir systématiser le design et se donner un modèle de représentation simple de celui-ci.
- Trois polygones réguliers peuvent effectuer un pavage parfait du plan:
 - le triangle équilatéral
 - le carré
 - l'hexagone
- Le choix de l'hexagone:
 - proche du cercle
 - surface / distance centre-sommet



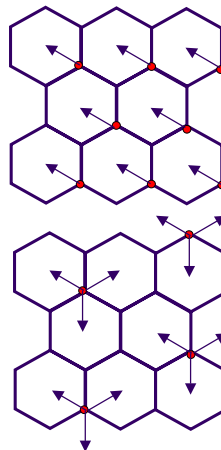
Alexandre CAMINADA, UTBM, Département Informatique
D5 - RE56 2004

Concept cellulaire – Les sites

- Antennes omnidirectionnelles

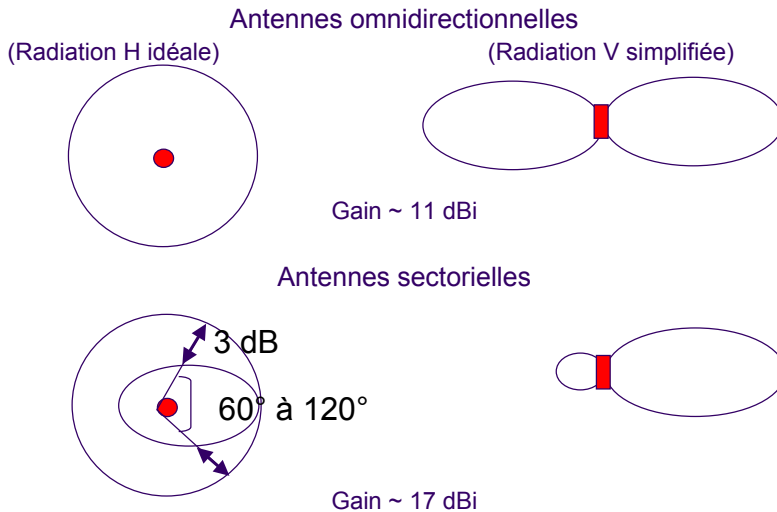


- Antennes directionnelles



Alexandre CAMINADA, UTBM, Département Informatique
D6 - RE56 2004

Concept cellulaire – Les antennes



Concept cellulaire – Les antennes

— Tilt mécanique

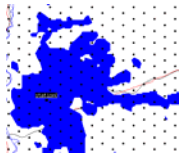
- Premier déploiement
- Facile à modifier
- Génère des interférences

— Tilt électrique

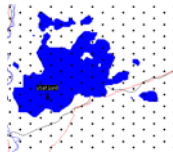
- Utiliser en densification
- Difficile à modifier
- Meilleure gestion des interférences



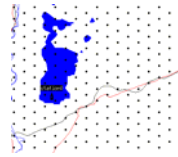
Concept cellulaire – Le paramétrage



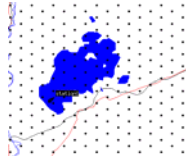
Omnidirectional
Power 60 dBm



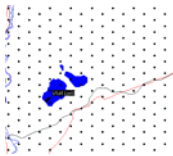
Large directional



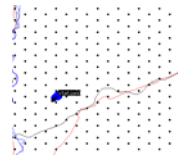
Narrow directional



Azimuth 50°



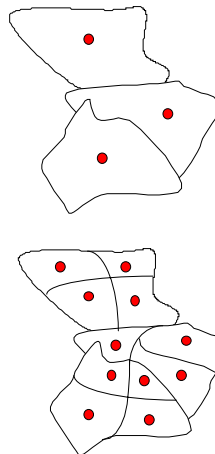
Power 50 dBm



Tilt -15°

Concept cellulaire – Le fractionnement cellulaire

- Ce concept est une application récursive du concept cellulaire à lui-même.
- Il intervient lorsqu'une cellule est saturée en trafic.
- Il consiste à diviser une cellule en plusieurs cellules plus petites qui auront chacune moins de trafic à écouler. On parle aussi de densification.
- Il intervient directement sur la réutilisation des fréquences en augmentant le nombre de cellules à une distance D d'un point.



Concept cellulaire – Type de cellules

- Couverture variable en fonction de la zone
 - 30km de rayon en campagne
 - 500m en ville actuellement
 - 100 BTS à Paris Intra-Muros en 1994, environ 3000 aujourd'hui
- Lien étroit entre couverture et capacité
 - Capacité maximale de 16 porteuses (16×8 canaux) = 128 voies ou communications simultanées ; en pratique, 1 en rural, jusqu'à 8 en milieu urbain
 - Exemple du couplage d'antenne en GSM : 1 seule antenne pour plusieurs émetteurs mais avec une perte de puissance importante à l'entrée de l'antenne
- Macro BS : antennes sur les toits
- Micro BS : antennes sur les murs sous les toits
 - Coûts faibles
 - Utilisées en ville
 - 48 Micro à Paris en 1994, environ 600 aujourd'hui

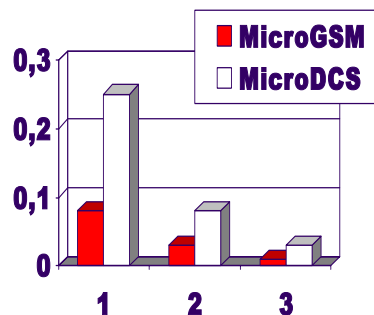
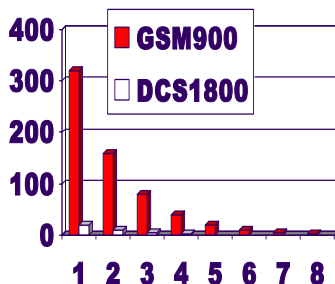


Alexandre CAMINADA, UTBM, Département Informatique
D11 - RE56 2004

Concept cellulaire – Les contraintes du matériel

Puissances de la BS, maximales en Watts, prévues par la norme GSM, par classes d'antennes

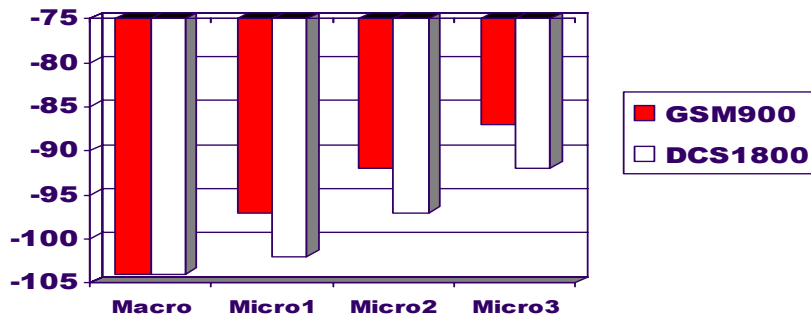
- Avant coupleurs en Macro
- Après coupleurs en Micro
- Une certaine tolérance est acceptée sur la puissance maximale effective (x2)



Alexandre CAMINADA, UTBM, Département Informatique
D12 - RE56 2004

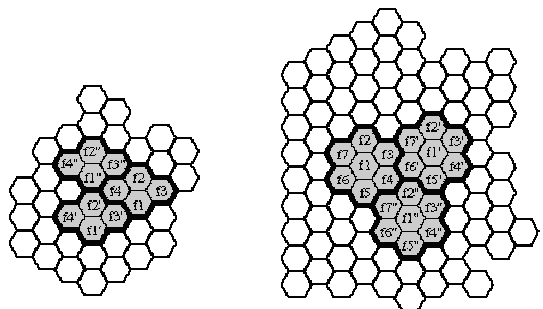
Concept cellulaire – Les contraintes du matériel

Sensibilités de la BS en dBm dans la norme GSM



Concept cellulaire – La réutilisation de fréquences

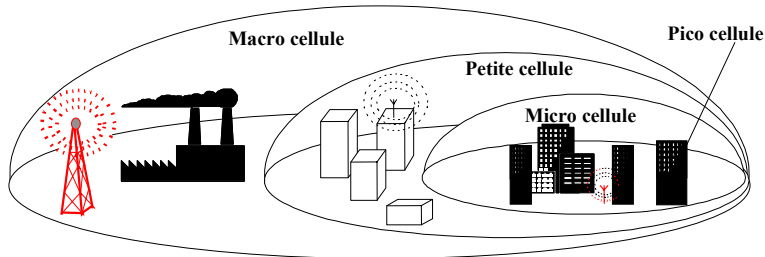
- Définition: La réutilisation de fréquences est l'utilisation de canaux radios de même fréquence pour couvrir différentes zones qui sont suffisamment séparées les unes des autres pour ne pas créer trop d'interférence co-canal
- A l'origine du concept cellulaire la réutilisation de fréquences se faisait sous la forme de motifs



(a) Frequency reuse pattern for $n=4$ (b) Frequency reuse pattern for $n=7$

Concept cellulaire – Réseau multicouche

Le motif ne s'applique plus en multicouche



Concept cellulaire – En résumé

— Cellule

- Zone géographique dans laquelle un mobile peut communiquer avec une station de base
- Délimitée par une qualité de réception du signal
- Limitée par une capacité : nombre de communications qui peuvent être établies simultanément (nombre d'abonnés)

— Réseau cellulaire

- Ensemble de cellules appartenant au même opérateur
- Les BS fonctionnent selon le même système
- Assure la continuité du déplacement : couverture du territoire
- Rattachement des équipements réseau au RTC
- Les mobiles peuvent passer d'une cellule à l'autre

Plan

1. Le concept cellulaire

2. La propagation



Alexandre CAMINADA, UTBM, Département Informatique
D17 - RE56 2004

La propagation – Brique de base de l'ingénierie

- Phénomène extrêmement complexe à prévoir, donc à reproduire
 - Études physiques (électromagnétique)
 - Bases de données (précision)
 - Ingénierie du réseau (matériel; règles d'ingénierie)
- Établit la confiance de l'ingénierie
 - Modéliser et simuler la propagation des ondes
 - Entrées de tous les autres calculs scientifiques
 - Temps de calcul vs précision des calculs
 - Soucis scientifique vs soucis opératoire



Alexandre CAMINADA, UTBM, Département Informatique
D18 - RE56 2004

La propagation – Affaiblissement

Formulation de base de l'affaiblissement

$$(en Watt) \quad Pr = Pe Ge Gr (\lambda / 4\pi d)^2$$

En dB:

$$\begin{array}{ccccccccc} RxLev & = & Pe & +Ge & +Gr & - 20 \log F - 20 N \log d & + cte \\ (dBm) & & (dBm) & (dBi) & (dBi) & (MHz) & (m) \end{array}$$

Avec $F, 900, 1800, 1900, 2200...$

$\lambda = 30 \text{ cm à } 900\text{MHz}$

Avec $N = 2 \text{ en trajet libre}$

$N = 3 \text{ en rural}$

$N \geq 4 \text{ en urbain}$

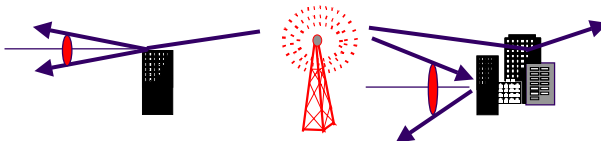


Alexandre CAMINADA, UTBM, Département Informatique
D19 - RE56 2004

La propagation – Phénomènes physiques

— Principaux phénomènes physiques de propagation

- Réfraction
- Réflexion
- Diffraction



— Incidence de la propagation en radio mobile terrestre

- Perte de puissance : affaiblissement (*path loss*)
- Impact des obstacles : effet de masque (*shadowing*) ~aléatoire ~6 dB
- Canaux à trajets multiples : évanouissement de l'onde (*fading*)



Alexandre CAMINADA, UTBM, Département Informatique
D20 - RE56 2004

La propagation – L'évanouissement

L'évanouissement du signal est dû à la réception simultanée de signaux d'amplitudes et de phase aléatoire

- Dégradation de la puissance (*fading* de Rayleigh) et de la phase
- Dégradation de la fréquence (effet Doppler, une porteuse donne un spectre plus large)
- Sensible à la largeur du canal de propagation, la vitesse du mobile, la modulation et la fréquence
- Variation de plusieurs dizaines de dB
- Moyen d'atténuer l'effet :
 - Diversité en fréquences
 - Diversité spatiale
 - Entrelacement
- Pas simulé dans les modèles de propagation mais pris en compte par une marge sur le niveau de champ



La propagation – Durée de propagation

- Temps de propagation A/R du signal à prendre en compte (T_p)
 - Environ 30 Km parcourus en 100 μ s
 - Les *burst* émis par MS1 sur TS1 et MS2 sur TS2 peuvent se chevaucher à la réception par la BS
- Deux solutions
 - Augmenter le temps de garde, i.e. le temps de silence entre deux émissions de *burst*
 - Gérer le temps de propagation A/R du signal (*Timing Advance*): avancer l'émission de chaque slot de T_p



La propagation – Les modèles de propagation d'ondes

- Modèles de propagation indoor, micro, macro... avec des spécificités selon le type d'environnement, et la précision des BD géographiques

Taille de cellules	Modèles	BD Géographiques
Macro cellule (2 km – 50 km)	Modèle macro rural	Précision 100 à 400 m Routes, sursol
Petite cellule (500 m – 2 km)	Modèle macro urbain	Précision 25 à 100 m Rues, contours bâtiments
Micro cellule (300 m – 1500 m)	Modèle micro	Précision 10 à 25 m Vues 3D Rues, bâtiments
Pico cellule	Modèle intérieur	Plan du bâtiment 3D Fichiers DXF



Alexandre CAMINADA, UTBM, Département Informatique
D23 - RE56 2004

La propagation – Description numérique de l'environnement

- Les informations géographiques sont de différents types :
 - Hauteur du sol et du sur-sol
 - Nature du sur-sol : eau, bois, bâtiment plus ou moins dense
 - Forme du sur-sol : contours, inclinaisons
 - Données climatiques : variation du sur-sol, états d'humidité
- Les informations géographiques sont généralement sous formes maillées ou vectorielles
- Coût : environ 250kF pour une ville moyenne (IGN)
- Problèmes informatiques soulevés :
 - Incomplétude des données
 - Inexactitude des données
 - Variation des format de fichiers et de la nature des informations



Alexandre CAMINADA, UTBM, Département Informatique
D24 - RE56 2004

La propagation – BD géographiques

INDEX_THEMES=

```
[  
 1 "open" ]  
 2 "sea" ]  
 3 "inland water" ]  
 4 "residential" ]  
 5 "mean urban" ]  
 6 "dense urban" ]  
 7 "buildings" ]  
 8 "villages" ]  
 9 "industrial" ]  
10 "open in urban" ]  
11 "forest" ]  
12 "parks" ]  
26 "dense urban high" ]  
27 "block buildings" ]  
28 "dense block buildings" ]  
29 "rural" ]  
30 "mixed suburban" ]  
];
```

```
FichierGeographique {  
  NOM_FICHER="madrid_17.sol";  
  PAS_DE_MAILLE=20;  
  NB_THEMES= 17;  
  THEMES=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 26 27 28 29 30];  
  MAILLES= [  
    [ x, y, %1, %2, %3, .... %29, %30 ]  
    ...  
  ]  
};
```



Alexandre CAMINADA, UTBM, Département Informatique
D25 - RE56 2004

La propagation – Techniques de modélisation

- Statistiques
 - Zone géographique homogène (pas de BD, plutôt des fonds de plan)
 - Peu fiables mais rapides
 - Mesures ; Okumura-Hata
- Déterministes
 - BD précise (3D)
 - Temps de calcul long mais *a priori* très fiable
 - Lancé de rayons
- Semi-empiriques
 - BD assez précise (sol, sursol)
 - Combinaison de principes physiques et statistiques (fiabilité à la carte)
 - Régression linéaire, réseaux de neurones artificiels...
 - *Approche la plus courante*



Alexandre CAMINADA, UTBM, Département Informatique
D26 - RE56 2004

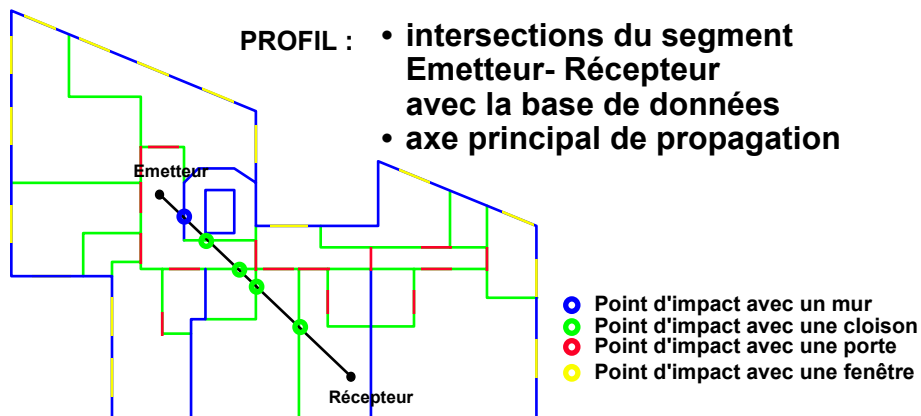
La propagation – Modèle intérieur

- Antennes dans les bâtiments
- Couverture limitée mais de qualité (voix, data)
- Impact des matériaux: nature, épaisseur, disposition...
- Description 3D et précise (actuelle!) du bâtiment
- Impact très fort pour les services hauts-débits (GPRS, UMTS, 4G)
- Modèles peu utilisés car coût de déploiement indoor très faible (peu d'études préalables) et volonté de déploiement (impact sur les gens)
- Problèmes informatiques soulevés:
 - Reconnaissance/corrections de plans d'architecte 2D
 - Visu 3D
 - Interprétation de photos ou films



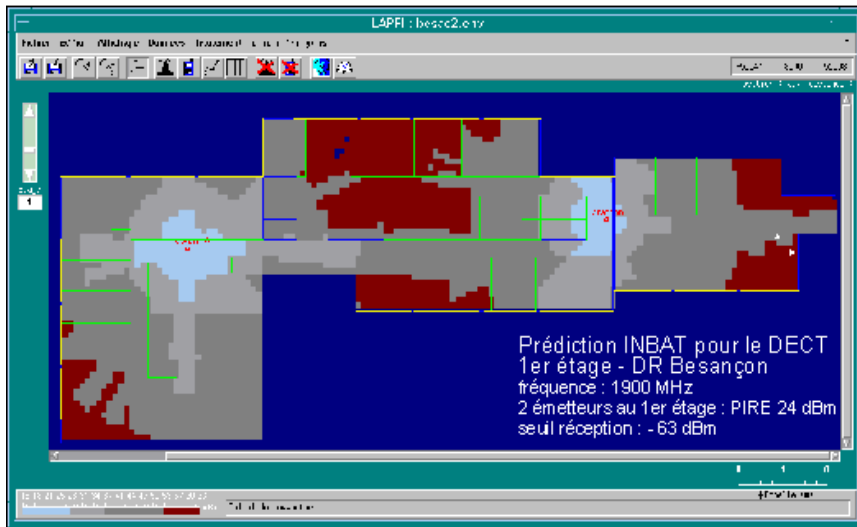
Alexandre CAMINADA, UTBM, Département Informatique
D27 - RE56 2004

La propagation – Modèle intérieur



Alexandre CAMINADA, UTBM, Département Informatique
D28 - RE56 2004

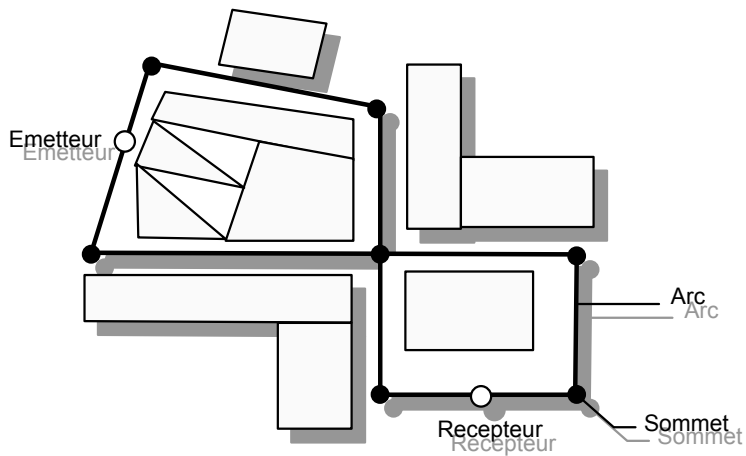
La propagation – Modèle intérieur



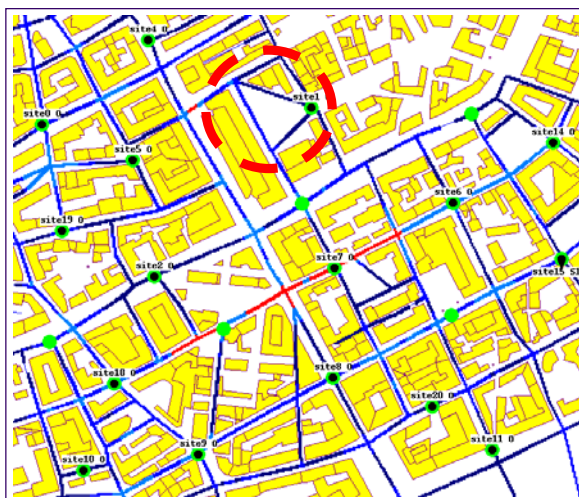
La propagation – Modèle micro cellulaire

- Antennes sur les murs des bâtiments (7 à 10m)
- Couverture limitée de type canyon ou conduit d'ondes:
 - Effets de rupture: carrefours, virages en épingles (angles d'arrivée)
 - Effets de cumul: places, squares (espaces ouverts)
- Effets de pénétration, dépénétration (traversés de bâtiments, et éventuellement antennes indoor ou outdoor)
- Impact très fort pour les services incar (2W)
- Modèles peu utilisés car ingénierie très chère (500 micro à Paris; quelques centaines dans le reste de la France en grande ville)
- Problèmes informatiques soulevés:
 - Reconnaissance/corrections de plans 2D
 - Représentations indoor/outdoor
 - Mise à jour des cartes (modification des rues et bâtiments)

La propagation – Modèle micro cellulaire



La propagation – Modèle micro cellulaire



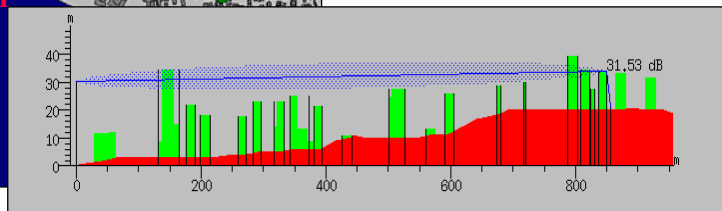
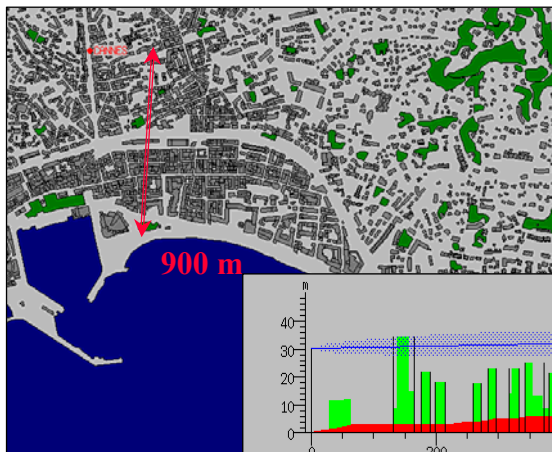
La propagation – Modèle macro urbain

- Antennes plus hautes que le sursol: toits, tours, pylônes...
- Couverture étendue mais assez régulière (milieu homogène):
- 2 approches parfois combinées: profil vertical et/ou lancer de rayons
- Effets de réfraction, réflexion et diffraction
- Modèles très importants car utilisés dans les zones de fort trafic (centre ville et périphérie des villes ; quartiers denses d'habitation, de commerce ou d'industrie)
- Problèmes informatiques soulevés:
 - Très grande précision attendue sur de très grande surface de calculs (complexité dépendante du nombre de mailles traitées)



Alexandre CAMINADA, UTBM, Département Informatique
D33 - RE56 2004

La propagation – Modèle macro urbain



Alexandre CAMINADA, UTBM, Département Informatique
D34 - RE56 2004

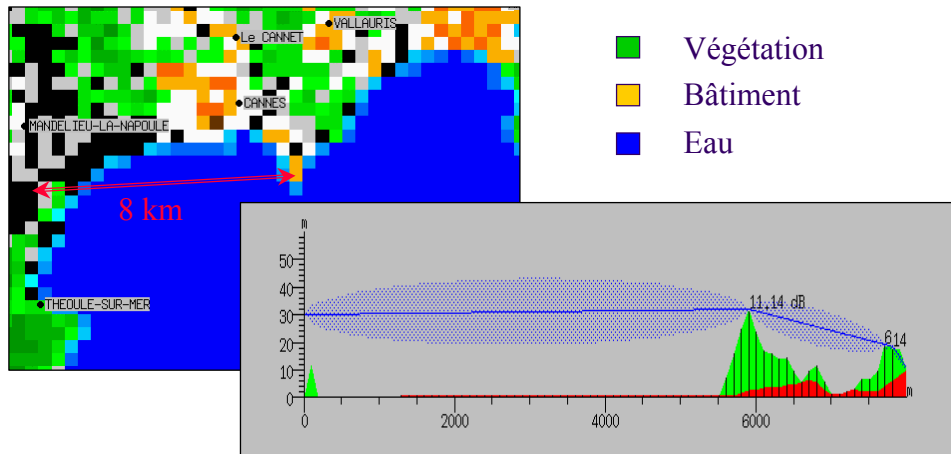
La propagation – Modèle macro urbain



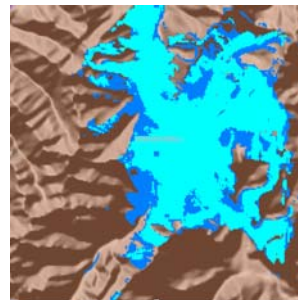
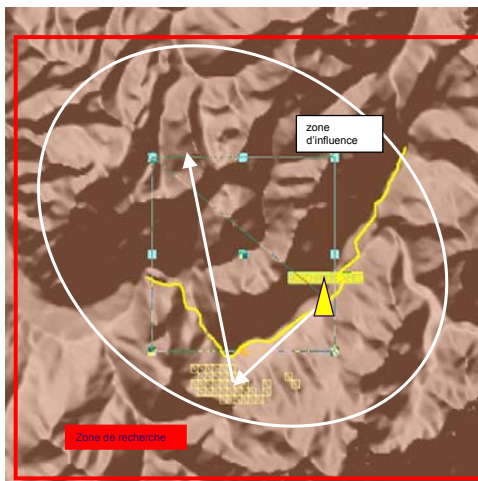
La propagation – Modèle macro rural

- Antennes plus hautes que le sursol: château d'eau, pylônes, collines...
- Couverture très étendue et souvent dans un milieu hétérogène:
 - Villes moyennes/petites, zones d'activités
 - Campagne, montagne
 - Axes: routes, autoroutes, voies ferrées
- Règles de propagation très dépendantes de l'environnement naturel:
 - Campagne, montagne (réflexion sur les parois, conduits...)
 - Climat (saison, pluies), végétation (évolution des forêts, cultures...)
- Modèles très demandés mais très chers à réaliser avec une bonne fiabilité
- Problèmes informatiques soulevés:
 - Reconnaissance automatique des conditions de propagation (maille en visibilité, réflexion 1^{er}/2^{ème}/3^{ème} ordre...)
 - Classification du milieu pour économie de calculs

La propagation – Modèle macro rural

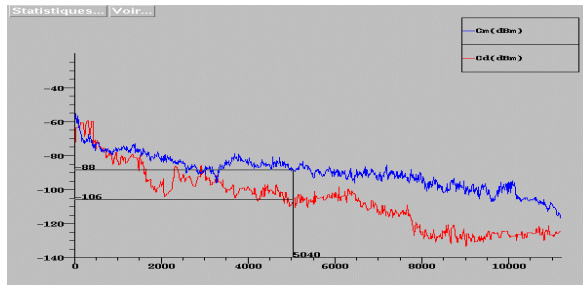


La propagation – Modèle macro rural



La propagation – Performance des modèles

- Parcours de mesures
 - matériel spécifique : TEMS, QVoice, K11...
 - coût h*mois très élevé
- Mesures spécifiées à l'avance:
 - Type de milieu à tester : outdoor, indoor...
 - Type d'équipement à tester : nouveaux systèmes, antennes, fréquences...
- Les modèles sont comparés aux mesures sur des parcours précis



Mesures

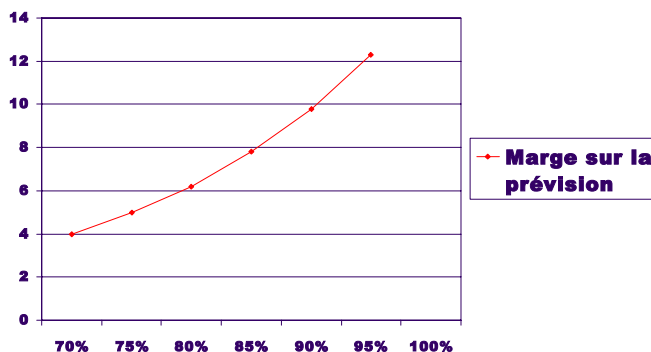
Modèles



Alexandre CAMINADA, UTBM, Département Informatique
D39 - RE56 2004

La propagation – Performance des modèles

- Performances globales par rapport à des ensemble de mesures
 - Moyenne $\langle E \rangle = 0$ dB ; Écart-type $\sigma = 5$ à 7 dB
 - Imprécision de 3 dB sur le matériel et de 3 dB sur les mesures
 - Nombreux phénomènes aléatoires...
- Degré de confiance sur le calcul pour une marge d'erreur en dB



Alexandre CAMINADA, UTBM, Département Informatique
D40 - RE56 2004