



HAL
open science

Prédiction de couverture de champ radioélectrique pour les réseaux radiomobiles : L'apport des Systèmes d'Information Géographique. Application en milieu urbain.

Christine Turck

► To cite this version:

Christine Turck. Prédiction de couverture de champ radioélectrique pour les réseaux radiomobiles : L'apport des Systèmes d'Information Géographique. Application en milieu urbain.. Géographie. Université Louis Pasteur - Strasbourg I, 2005. Français. NNT: . tel-00012014v2

HAL Id: tel-00012014

<https://theses.hal.science/tel-00012014v2>

Submitted on 27 Mar 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse présentée pour obtenir le grade de

▪ Docteur de l'Université Louis Pasteur
▪
▪
▪
▪
▪
▪

Strasbourg I

Discipline : Géographie

par **Christine Turck** ▪

Prédiction de couverture de champ radioélectrique pour les réseaux radiomobiles : L'apport des Systèmes d'Information Géographique. Application en milieu urbain

Soutenue publiquement le 09 novembre 2005 ▪

Membres du jury ▪

Directeur de Thèse : Mme Christiane Weber, Directeur de Recherche CNRS
Laboratoire Image et Ville, ULP, Strasbourg

Rapporteur Interne : Mme Christiane Rolland-May, Professeur
Faculté de Géographie et d'Aménagement du Territoire, ULP, Strasbourg

Rapporteur Externe : Mme Lena Sanders, Directeur de Recherche CNRS
Laboratoire Géographie-Cités, Universités Paris I et VII

Rapporteur Externe : Mr Henri Maître, Professeur
Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris

Examineur : Mr Hervé Sizun, Expert Senior Chargé de Recherche
France Télécom, branche Recherche et Développement, Belfort

Invité : Mr Stéphane Devaux, Ingénieur de Recherche
France Télécom, branche Recherche et Développement, Belfort

La thèse ayant été effectuée dans le cadre d'un contrat CIFRE, des clauses de confidentialité (Propriété Intellectuelle) sont inhérentes aux travaux de recherche effectués par Christine Turck et impliquent la non divulgation en dehors du groupe France Télécom de certains travaux (rapports d'études, notes techniques, programmes, codes sources, algorithmes) et résultats (équations, résultats numériques).

Remerciements

Qu'il me soit permis ici de remercier en premier lieu celle qui m'a encouragé à poursuivre mes études jusqu'au doctorat, ma mère, *Denise Fersing-Turck*. Alors à toi, maman, je dédie ce mémoire de thèse parce que tu as mis toute ta tendresse, ta sagesse et ton aide financière, pour que tes trois enfants puissent avoir ce que tu n'avais pas eu la chance d'avoir à leur âge : l'accès au savoir et aux études supérieures.

Mes pensées vont tout d'abord à *Christiane Weber*, Directrice de Recherche au CNRS et Directrice du Laboratoire Image et Ville. Je la remercie d'avoir accepté de diriger cette thèse qui portait sur un sujet de recherche un peu atypique pour la géographie. Je la remercie pour la manière dont elle a encadrée ma thèse durant ces cinq années. Je la remercie pour le temps qu'elle m'a accordée, pour ses conseils scientifiques avisés, et pour la confiance qu'elle a bien voulu m'accorder. Je la remercie également du fond du cœur de m'avoir préservé.

Je remercie le Professeur *Colette Cauvin*, pour m'avoir soutenu, pour avoir été là quand j'en avais besoin, et pour m'avoir enseigné beaucoup de choses en Géographie.

Je remercie sincèrement Lena Sanders, Directrice de Recherche au CNRS à l'Université de Paris I et VII, les Professeurs *Christiane Rolland-May*, Directrice de la Faculté de Géographie de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, *Henri Maître*, Directeur du Laboratoire LTCI à l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris, *Hervé Sizun*, Expert sénior Chargé de Recherche en propagation radio à France Télécom Branche Recherche & Développement à Belfort, et *Stéphane Devaux*, Ingénieur de Recherche à FTR&D à Belfort, d'avoir consenti à être membres du jury de ce doctorat, malgré les nombreuses charges et un calendrier serré.

Je remercie *Jean-Claude Bic*, qui fut directeur du Département Comelec à l'ENST, d'avoir accepté d'être membre de mon jury de thèse. Je le remercie également pour les discussions que nous avons eues et pour ses conseils avisés. Il ne sera malheureusement pas là pour voir l'aboutissement de ce travail, car il est décédé à l'âge de 53 ans, mais je suis sûre qu'il aurait été satisfait de voir que j'ai été jusqu'au bout de ce travail et que le prototype sera opérationnel d'ici peu.

Je tiens à remercier le Laboratoire de Recherche de France Télécom R&D à Belfort, son directeur, *Jean Vuichard* (2003), et le chef du service CDM, *Dominique Thômé* (2005), pour m'avoir accueilli dans le laboratoire durant ces 3 années.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers l'Association Nationale de la Recherche Technique (ANRT) d'avoir financé cette recherche par l'intermédiaire d'une bourse CIFRE, et à France Télécom de m'avoir permis d'acquérir une première expérience professionnelle durant les trois ans que j'ai passé au sein du centre de recherche de France Télécom R&D en tant qu'Ingénieur de Recherche.

Je remercie *Christel Sorin*, Vice-présidente (2003) de France Télécom North America, Membre du Conseil Supérieur de la Recherche et de la Technologie (2005) au sein du Ministère délégué à la Recherche et à l'Enseignement Supérieur, parce qu'elle fut la première à m'avoir parlé du CNET il y a six ans, et pour m'avoir encouragé à présenter ce sujet de thèse aux ingénieurs du CNET.

Je tiens également à remercier les doctorants, ingénieurs, chercheurs et enseignants du Laboratoire Image et Ville, qui m'ont permis de travailler dans une bonne ambiance et m'ont aidé à finir ma thèse dans de bonnes conditions.

A la mémoire de Jean-Claude Bic,

A la mémoire de mon grand-père Nicolas Fersing,

A mon frère Dominique avec tout mon amour,

Aux personnes que j'aime et qui sont chères à mon cœur et à mes yeux.

Introduction générale

Thème de recherche : Application des méthodes d'Analyse Spatiale et des Systèmes d'Information Géographique à l'étude de la propagation des ondes radioélectriques en milieu urbain et périurbain.

PROBLEMATIQUE ET CONTEXTE

Le développement des réseaux de télécommunications mobiles ces dernières années nécessite des opérateurs de télécommunication une prise en compte de plus en plus fine de la réalité du milieu de propagation des ondes radioélectriques. Il y a encore peu de temps les cartes topographiques traditionnelles, combinées à des photographies aériennes, suffisaient pour déployer un réseau cellulaire. Mais la localisation des antennes n'était pas optimale, la qualité des communications non plus ce qui entraînait le mécontentement des abonnés.

L'ouverture des systèmes de fréquences à la concurrence sur le sol français a bouleversé le paysage industriel national, et a introduit, comme ailleurs, une pression considérable sur les besoins et la réalisation de recherche d'optimisation des réseaux de télécommunication.

La demande étant surtout concentrée en milieux urbanisés, la localisation des antennes devient plus complexe du fait de l'influence des formes urbaines et des types d'occupation du sol associés.

L'importance des éléments géographiques, leur nature, leur agencement, ainsi que le rôle du niveau d'observation qui leur est associé, est déterminante pour une utilisation optimale des modèles de propagation radioélectrique, c'est-à-dire conciliant la précision des données géographiques, les traitements et le coût de ces opérations.

L'Analyse Spatiale et l'intégration possible de données pertinentes dans ce contexte au sein d'un Système d'Information Géographique permettra d'appréhender l'influence des données géographiques sur la réalisation des modèles de propagation en ce qui concerne l'occupation du sol (échelle, qualité, typologie, nature des éléments...) et de créer des algorithmes de calcul de la couverture de champ radioélectrique plus adaptés à une optimisation des réseaux radiomobiles. C'est dans ce contexte qu'une étude sur les données géographiques utilisées en ingénierie radio mobile GSM 900 MHz a été menée.

Pour bien définir le contexte de cette recherche, les pages qui suivent, s'articulent autour des deux domaines d'investigation abordés dans notre recherche : la modélisation de la propagation des ondes radioélectriques d'une part, et l'Information Spatiale et ses outils informatiques (SIG, statistiques, Analyse Spatiale, etc.) d'autre part. La démarche envisagée pour mener à bien ce travail sera exposée à la suite.

Les modèles de propagation d'ondes radioélectriques doivent prédire l'affaiblissement du signal radioélectrique émis par les stations vers les zones géographiques environnantes. Cette modélisation consiste à représenter les phénomènes physiques de propagation du signal radio entre un émetteur et des récepteurs mobiles (téléphones, voitures, etc.).

Plus précisément, la modélisation doit tenir compte, de la dispersion du signal émis. En effet, un récepteur peut recevoir directement une onde mais aussi ses contributions indirectes réfléchies ou réfractées sur des bâtiments, de la végétation, des parois rocheuses... Ainsi l'influence des formes spatiales est majeure sur la propagation des ondes.

De plus, parmi les autres facteurs les plus significatifs permettant de modéliser l'affaiblissement du signal radioélectrique, interviennent la fréquence d'émission, la distance séparant l'émetteur du récepteur ainsi que les caractéristiques des antennes.

Face à l'augmentation très importante du trafic radiomobile, les unités d'exploitation des réseaux radiomobiles doivent accroître la capacité du réseau. Ceci s'opère entre autres par une densification et donc un re-calcul de la couverture radioélectrique du réseau. Actuellement, les temps de calcul sont très longs pour prédire la couverture radioélectrique du réseau avec une bonne précision. Ces coûts trop importants en temps de calcul sont en particulier dus à l'utilisation de données géographiques précises ce qui induit un problème essentiel : trouver un compromis acceptable entre la précision de la prédiction par le modèle radio, la précision des données géographiques et les algorithmes de calcul associés.

Il est donc très important de trouver de nouvelles voies et de nouvelles solutions pour réduire ces temps de calcul. Une division d'un facteur de l'ordre de 100, voire plus, des temps de traitement actuels permet de retrouver des temps de calcul de couverture raisonnables pour prédire le champ radioélectrique des stations émettrices du réseau radiomobile. Dans le cas contraire, pour avoir des résultats rapidement, la couverture est calculée avec moins de précision, au détriment de gain potentiel en capacité qui pourrait être obtenu par des zones de brouillage précises.

Pour répondre à ces besoins, un approfondissement de l'utilisation de l'Information Spatiale en ingénierie radiomobile, de l'apport de l'Analyse Spatiale et des SIG, est nécessaire. Ce domaine encore relativement peu développé s'appuie sur des complémentarités nouvelles, qui ne peuvent que se s'accroître aux vues du développement exponentiel des technologies sans fil (WAP¹, PDA, UMTS...) à l'heure actuelle dans notre société.

La prédiction des zones de couverture est fondamentale pour la définition des systèmes cellulaires de radiocommunication et pour leur déploiement géographique. Afin d'assurer une couverture radioélectrique de très bonne qualité, il est nécessaire de mettre au point des modèles performants de couverture radioélectrique afin de placer les émetteurs à des points stratégiques.

Les modèles de propagation existant actuellement (approche maillée, par lancer de rayons, statistiques, réseaux neuronaux, etc.) utilisent des calculs du champ radioélectrique point par point (modèle de propagation des ondes électromagnétiques selon un pas constant), ce qui induit des temps de calculs très longs. Afin de réduire significativement ces temps de calculs, nous avons mis au point de nouvelles approches de calcul, de nouveaux algorithmes, pour les modèles de propagation radioélectriques. Ces nouvelles approches seront dédiées au calcul du champ radioélectrique sur l'ensemble des secteurs géographiques (surfaces et volumes de visibilité optique, facettes de montagnes, etc.) autour des émetteurs.

Trois domaines articulant SIG et Télécommunication gagnent actuellement en importance :

1. Le dimensionnement du réseau radiomobile : elle permet de générer les caractéristiques de fréquence et de propagation pour des modèles cellulaires. Des données géographiques précises et à jour sont nécessaires tels les Modèles numériques de Terrain ou de Surface, les classifications d'occupation du sol ou les éléments linéaires (réseaux).
2. La sélection des sites d'implantation : de nombreux critères sont pris en compte pour sélectionner la localisation des futures antennes de transmission. Des informations en

¹ WAP, PDA, UMTS : définitions : se référer au Lexique.

structure vectorielle ou raster telles que les limites administratives, les obstructions verticales, les types d'occupation du sol... doivent être intégrées aux outils d'ingénierie.

3. La visualisation : la possibilité de visualiser les réseaux radiomobiles est un apport important pour les ingénieurs et les aménageurs, et renforce l'idée d'une complémentarité entre SIG et Télécommunications.

La connaissance du milieu et des contraintes géographiques qui se posent à différents niveaux d'observation, est donc un point essentiel dans cette articulation. Les Systèmes d'Information Géographique permettent d'appréhender les différents éléments spatiaux à prendre en compte, c'est-à-dire l'échelle, la précision, le type d'occupation du sol : résolution spatiale et typologie, nature. Les requêtes sur objets ou sur zones doivent faciliter la prise en compte des besoins ci-dessus.

Dans un tel contexte plusieurs questions sont soulevées

- Les données utilisées actuellement suffisent-elles, à elles seules, à prédire efficacement la couverture de champ radioélectrique ?
- Dans la négative, existe-t'il d'autres types de données géographiques qui pourraient être mis en œuvre dans la modélisation géographique de la propagation radio et qui permettraient d'améliorer la qualité du modèle en terme de temps de calcul ou de précision des résultats ?
- Enfin, pour améliorer la modélisation existe-t'il des données géographiques qui permettent de caractériser plus efficacement l'environnement le long du canal de propagation émetteur-récepteur ?

Ceci pose clairement le problème en termes de qualité des modèles utilisés en ingénierie radio et dès lors on peut envisager deux manières différentes d'y répondre : soit on travaille sur les données radioélectriques (affaiblissement radio, caractéristiques de l'antenne, fréquences, etc.) qui entrent dans la modélisation de la propagation des ondes radio ; soit on essaie d'améliorer la qualité de la prise en compte de l'espace géographique dans les modèles de propagation. C'est cette seconde approche, c'est-à-dire la modélisation de l'espace géographique qui a été choisie dans ce travail.

OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Hypothèse : L'Information Géographique joue un rôle très important, et ceci aussi bien dans le déploiement des infrastructures de télécommunication (choix de la localisation des infrastructures), que dans les logiciels de visualisation et de modélisation du réseau de télécommunication [propagation du signal radio, état du trafic, flux de communications, délimitation des zones sensibles (parcs naturels, aéroport, écoles, hôpitaux), etc.].

Afin de modéliser l'espace terrestre de manière optimale nous nous proposons d'introduire de nouvelles données géographiques indirectes, les indicateurs morphologiques, qui permettent de décrire la morphologie de ces zones géographiques.

Les infrastructures de télécommunications (antennes relais, tours hertziennes, réseaux filaires, etc.) sont intimement liées à l'espace terrestre : leur implantation, leur localisation dépendent d'une part du relief (localisation des tours hertziennes et des antennes en hauteur, réseaux filaires localisés le long des voies de communication, etc.), et d'autre part de la localisation de la population (desserte des personnes).

La démarche envisagée est divisée en trois parties, une première partie tournée vers une analyse du développement des télécommunications depuis ses origines jusqu'à l'époque actuelle. Une seconde partie porte sur l'analyse des modèles radio et des données géographiques actuellement utilisées en ingénierie radio, et la mise en évidence de limites induites par une mauvaise prise en compte de l'Information Spatiale (qualité, modélisation spatiale des données géographiques, types, etc.). La troisième partie propose des optimisations des outils d'ingénierie radio par une approche géographique (création de nouvelles données géographiques indirectes, utilisation d'un SIG, etc.), et la mise en oeuvre des résultats obtenus dans un prototype : le modèle OpenMorph.

Une première phase de travail a consisté en une réflexion sur le développement des télécommunications depuis deux siècles et de son impact sur l'espace géographique français : études des moyens de communications téléphoniques (fixe, mobile, satellite, Internet), les implications sociales et écocgéographiques, la répartition des réseaux téléphoniques publics et privés sur le territoire français (centralité, desserte, discontinuité). Un état des lieux des études menées dans le domaine de la Géographie des Télécommunications et des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication a été mené. Nous avons analysé l'histoire du développement des moyens de télécommunications et de la construction des réseaux de télécommunications afin de comprendre pourquoi et comment se sont développés les télécommunications sur le territoire français. Nous avons ainsi pu observer que les réseaux de télécommunication se sont développés de manière différente selon les régions, selon les époques et selon les choix politiques nationaux et locaux.

Nous avons également analysés l'impact sociologique et humain de tous ces nouveaux moyens de communication (NMC) sur notre société.

Une deuxième étape de recherche porte sur l'étude de la qualité des données géographiques utilisées en ingénierie radio mobile. Cette étude nous a permis de déterminer l'influence de la nature (bois, bâtiments, eau...) et de la précision des données géographiques (1, 5, 10, 15, 20 mètres) sur la qualité de la modélisation de la propagation des ondes radio.

Nous avons étudié l'ingénierie des systèmes de télécommunications radiomobiles : les outils de visualisation des données radio et des données géographiques, les différents modèles de propagation des ondes radioélectriques, les différentes bases de données géographiques utilisées. Ceci nous a permis de mettre en évidence les points à améliorer afin d'optimiser la modélisation radioélectrique : une meilleure prise en compte de l'Information Spatiale dans la modélisation radio, quel type de données géographiques utiliser en entrée des modèles de propagation, une évaluation de la qualité des données géographiques (précision, sémantique, mise à jour, coût, échelle, etc.). Nous avons ainsi constaté qu'il existe des limites, des entraves à une modélisation radio optimale due à une mauvaise prise en compte de l'information géographique dans les modèles radio préexistant, ainsi qu'à une mauvaise utilisation (en terme de modélisation géographique au sein du modèle radio) de ces données géographiques dans la modélisation radio.

Enfin, une troisième étape de notre recherche a consisté à proposer de nouvelles approches algorithmiques (géomatiques) du calcul de couverture de champ radioélectrique. Nous avons introduit de nouvelles données géographiques : les indicateurs morphologiques. Ces données permettent de classifier l'environnement en vastes zones géographiques homogènes du point de vue morphologique. Ceci soulève la question suivante : Quels sont les critères géographiques à utiliser pour modéliser l'espace terrestre ?

Deux types de données géographiques peuvent être mises en oeuvre de manière complémentaire :

- (1) Les mesures géographiques « classiques », directes : clusters bâtis, surfaces en visibilité optique (espaces ouverts), densité de bâti, altitude et la pente du sol, type d'occupation du sol (Clutter), distance Emetteur-récepteur, etc.
- (2) Les mesures indirectes : les indices de forme (Reconnaissance de formes), la dimension fractale (géométrie fractale des objets géographiques), le coefficient de rugosité, etc.

Nous avons proposé des solutions afin d'améliorer les modèles de propagation radio grâce à une approche géographique : une meilleure prise en compte du milieu géographique, principalement en milieu urbain, du fait de sa complexité et de la forte influence des objets géographiques (bâti, mobilier urbain, etc.) sur la propagation des ondes radio ; une utilisation de nouvelles données géographiques directes et indirectes (indicateurs morphologiques, modélisation spatiale en deux et trois dimensions). Nous avons également évalué la qualité des données géographiques utilisées par les opérateurs de télécommunication dans leur modèles de propagation d'ondes radio, afin de mettre en évidence les limites des performances des modèles radio dues soit à une mauvaise prise en compte des données géographiques dans la modélisation, soit à une mauvaise qualité des données géographiques elles-mêmes (erreurs géométriques, résolution, etc.), soit encore à une information géographique trop imprécise (résolution des données trop faible, pas assez de données géographiques caractéristiques du milieu). Nous avons donc proposé l'utilisation de nouvelles variables géographiques directes et indirectes (indicateurs morphologiques) qui permettent de caractériser plus efficacement le milieu en présence.

L'utilisation d'un Système d'Information Géographique, nous a permis d'évaluer l'apport d'un logiciel dédié à l'Analyse Spatiale pour la modélisation d'un phénomène physique : la propagation des ondes radioélectriques à travers un espace géographique donné. Enfin l'utilisation du SIG nous a permis de développer une plateforme d'ingénierie radioélectrique, prénommée OpenMorph, qui effectue les calculs d'ingénierie radiomobile (calculs d'affaiblissement radio pour différents modèles, etc.). Le modèle OpenMorph comporte également un module dédié à la modélisation géographique, à l'analyse spatiale du milieu géographique en présence : ce module effectue une étude de la morphologie du milieu, grâce aux calculs d'indicateurs morphologiques (indices de forme, fractales, rugosités, modélisation du bâti et des espaces vides en 2D et 3D, etc.). Ces calculs permettent d'obtenir toute une série de données géographiques directes (altitudes, types d'occupation du sol, etc.) et indirectes (indices de forme, dimensions fractales, surfaces en visibilité, volumes de visibilité, etc.), qui permettent de caractériser plus efficacement le milieu géographique en présence, et permettent ainsi d'améliorer la prédiction de l'affaiblissement du signal radio par les modèles de propagation d'ondes radioélectriques. L'influence des éléments naturels et anthropiques (relief, bois, champs, eau, bâtiments et infrastructures...) et de la précision des données géographiques sur la qualité de la modélisation de la propagation radioélectrique sera mise en évidence dans la troisième partie.

Le modèle OpenMorph a été mis en œuvre au sein d'un Système d'Information Géographique. Il se compose de deux parties : un modèle d'analyse spatiale qui permet de calculer les données géographiques, et un modèle de propagation d'ondes radio (le modèle de Hata). Afin de valider le modèle, une simulation du modèle OpenMorph a été effectuée sur Strasbourg : le calcul des données géographiques et le calcul de l'affaiblissement radio selon le modèle de Hata a été effectué pour l'ensemble de la Communauté Urbaine de Strasbourg.

Après avoir testée et validée notre approche sur la zone d'étude (la Communauté Urbaine de Strasbourg) des prospectives de développement ont été envisagées.

Table des matières

REMERCIEMENTS	5
INTRODUCTION GENERALE	9
TABLE DES MATIERES	17
PREMIERE PARTIE	25
INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE	27
CHAPITRE 1 : HISTOIRE DES TELECOMMUNICATIONS	29
1 – <i>Le développement des moyens de télécommunication depuis ses origines</i>	29
1.1 - Introduction	29
1.2 - L’Homme et la communication	30
1.2.1 – La parole : premier moyen de communication	30
1.2.2 – L’avènement de l’écriture	31
1.2.3 – L’invention de l’imprimerie	34
1.2.4 – Histoire des moyens de télécommunications avant « l’ère électrique »	35
1.2.5 – Naissance des télécommunications modernes	37
1.2.6 – Evolutions futures des recherches scientifiques dans le domaine des télécommunications	38
2 – <i>Histoire de l’évolution technique des moyens de télécommunication depuis deux siècles</i>	41
2.1 – L’invention du télégraphe	41
2.1.1 – Le Télégraphe aérien de Claude Chappe	41
2.1.2 – Le Télégraphe électrique de Samuel Morse	45
2.1.3 – Perfectionnements du télégraphe électrique	46
2.1.4 – Développement des réseaux télégraphiques	48
2.1.4.1 - Genèse du réseau télégraphique français	48
2.1.4.2 - Le développement mondial des réseaux de télégraphie	48
2.1.4.3 - La pose des premiers câbles télégraphiques sous-marins	48
2.2 – L’invention du téléphone	50
2.2.1 - Premières expériences de propagation des ondes acoustiques	50
2.2.2 - Premières essais de mise au point d’appareils téléphoniques	50
2.2.3 - L’invention du téléphone	52
2.2.4 - La construction des réseaux de lignes téléphoniques	54
2.2.5 - Genèse du téléphone en France	55
2.2.6 - Nationalisation du téléphone en France	56
2.2.7 - L’automatisation du téléphone	58
2.2.7.1 - Le développement de la commutation automatique à Paris	58
2.2.7.2 - Le développement de la commutation automatique en province	59
2.2.7.3 - Le développement de la commutation automatique en milieu rural	59
2.2.8 - Evolution des techniques de transmission du signal vocal	60
2.3 – L’invention des radiocommunications	62
2.3.1 - La découverte des ondes électromagnétiques	62
2.3.2 – L’invention de la télégraphie sans fil	63
2.3.3 - La découverte de l’ionosphère	64
2.3.4 – L’invention de la triode	64
2.3.5 – Le développement des radiocommunications durant la première moitié du 20 ^{ème} siècle	65
2.3.5.1 - Le développement de la radiodiffusion sonore en France	65
2.3.5.2 - Le développement du radar	66
2.3.5.3 - Le développement de la télévision	67
2.4 – Le renouveau des télécommunications après 1945	68
2.4.1 – Evolution des télécommunications durant la Seconde Guerre mondiale	68
2.4.2 – L’invention du transistor	68
2.4.3 – Mise en place de nouveaux systèmes de commutation	69
2.4.3.1 – Développement de nouveaux systèmes de commutation automatiques	69
2.4.3.2 – Développement de nouveaux centraux téléphoniques : les systèmes CROSSBAR	70
2.4.4 – Développement des liaisons à grande distance en France	71
2.4.4.1 – Réseau de lignes à grande distance par câbles (les câbles coaxiaux)	71
2.4.4.2 – Réseau de liaisons à grande distance par ondes radioélectriques (faisceaux hertziens)	71
2.4.5 – Développement du réseau Télex en France	72
2.5 – Naissance du réseau de télécommunications intercontinentales à partir des années 60	74
2.5.1 – Les liaisons téléphoniques par câbles sous-marins	74
2.5.2 – Les télécommunications par satellites	75
2.5.3 – Complémentarité des satellites et des câbles sous-marins	77
2.6 – Evolution des systèmes de transmission du signal	78
2.6.1 – Les liaisons par fibres optiques	78
2.6.2 – Les systèmes de transmissions multiplex	80

2.7 – Développement des systèmes de commutation électroniques.....	82
2.8 - Mise en œuvre du plan de rattrapage en équipements et réseaux de télécommunications sur le territoire français : le <i>Delta LP</i> (1968-1978).....	86
2.8.1 – Les télécommunications s’émancipent.....	86
2.8.2 – Réforme de l’organisation territoriale des télécoms au niveau régional.....	87
2.8.3 – Réforme de la politique industrielle de l’administration des PTT et de son statut.....	89
2.8.4 – Mise en œuvre du plan de rattrapage téléphonique.....	91
2.9 – L’essor de la Télématique.....	95
2.10 - Mise en œuvre du réseau câblé.....	99
2.11 – Mise en place du réseau Internet dans les années 1990.....	104
2.11.1 - Origines des NTIC.....	104
2.11.2 - Genèse et croissance des NTIC en Europe.....	105
2.11.3 - Genèse et croissance du réseau Internet et des NTIC en France.....	107
2.11.4 - Du contenant au contenu.....	110
2.11.5 - Historique du réseau Internet.....	113
2.12 – Le secteur des mobiles.....	116
2.12.1 - La radiomessagerie.....	116
2.12.2 – Les radiomobiles.....	116
2.12.3 - La téléphonie mobile par satellite.....	117
Synthèse : Evolution chronologie des télécommunications.....	121
CHAPITRE 2 : VERS LA VILLE NUMERIQUE.....	125
1 – Introduction.....	125
2 – Vers une société de l’information, une société en réseau.....	129
3 – Collectivités territoriales et Aménagement du territoire : Vers un accès aux réseaux partout ?.....	134
4 – Entreprise et activité professionnelle en réseau.....	137
5 – Conclusion du deuxième chapitre.....	140
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE.....	141
DEUXIEME PARTIE.....	143
TABLE DES MATIERES DE LA DEUXIEME PARTIE.....	145
1 – Introduction de la deuxième partie.....	147
2 - Les différentes technologies déployées.....	149
2.1 – Les principaux services radioélectriques.....	149
2.2 - Les besoins des concepteurs de systèmes de télécommunication.....	150
2.3 - Les différentes gammes de fréquence.....	151
3 – Le développement de modèles de propagation.....	152
3.1 - Pourquoi et comment faire de la modélisation de la propagation des ondes radioélectriques.....	152
3.2 - Le canal de propagation.....	154
3.3 - La nature des milieux géographiques concernés.....	154
3.4 - Les effets du terrain et du sursol sur la propagation radioélectrique.....	155
3.5 – Développement de modèle.....	155
3.5.1 - Les objets constitutifs d’un modèle.....	155
3.5.2 - Types de modélisation en téléphonie radiomobile.....	158
3.6 – La conception d’un modèle de propagation pour les systèmes de télécommunications radiomobiles du type GSM 900 MHz.....	159
3.6.1 - Présentation générale.....	159
3.6.1.1 - Notion de réseau cellulaire.....	159
3.6.1.2 – Le fonctionnement d’un réseau de téléphonie radiomobile.....	162
3.6.1.3 - Définition : qu’est-ce qu’un modèle de propagation.....	165
3.6.1.4 - Domaine d’application d’un modèle.....	166
3.6.1.5 - Les différents types de modèles.....	167
3.6.1.6 - Comment construire un modèle.....	171
3.6.2 - Données utilisées pour la modélisation.....	172
3.6.2.1 – Les différents mécanismes de propagation pris en compte.....	172
3.6.2.1.1 – Affaiblissement de propagation en espace libre :.....	175
3.6.2.1.2 – Affaiblissement de diffraction.....	176
3.6.2.1.3 – La réflexion des ondes radioélectriques.....	178
3.6.2.1.4 – La diffusion des ondes.....	181
3.6.2.2 – Description des données géographiques.....	184
3.6.2.2.1 – Les données maillées (raster, pixel).....	184
3.6.2.2.1.1 – Le Modèle Numérique de Terrain.....	184
3.6.2.2.1.2 – Le Clutter.....	186
3.6.2.2.1.3 – Le Modèle Numérique de Surface.....	187
3.6.2.2.2 – Les données vectorielles.....	189
3.6.2.3 – Obtention de données radioélectriques expérimentales.....	191
3.6.2.3.1 – Mesures de champ en extérieur.....	191
3.6.2.3.2 – Autres types de campagnes de mesures.....	194

3.6.3 - Les critères d'évaluation d'un modèle	195
4 – Les modèles utilisés en ingénierie des systèmes radiomobiles	196
4.1 - Introduction	196
4.2 – Les modèles pour les grandes cellules	196
4.2.1 – Modèles macro cellulaires ruraux et suburbains	197
4.2.2 – Le Modèle macro cellulaire montagneux	199
4.3 - Les modèles pour les petites cellules	202
4.3.1 – Le modèle COST-CNET	202
4.3.2 – Le modèle de LEE	204
4.4 – Les modèles micro cellulaires	205
4.4.1 – Introduction	205
4.4.2 – Le modèle micro cellulaire - CNET	206
4.4.2.1 – Calcul de l'affaiblissement dans le plan horizontal : le graphe des rues	206
4.4.2.2 – Calcul de l'affaiblissement dans le plan vertical : la coupe de profil du sol et du sursol	209
4.4.2.2.1 – Calcul en visibilité (LOS)	209
4.4.2.2.2 – Calcul en non visibilité (NLOS)	209
4.5 – Les modèles urbains à lancer de rayons	211
4.5.1 – Introduction : modélisation par la technique du lancer de rayons	211
4.5.2 – Le modèle RAYON-CNET	211
4.5.2.1 - Algorithme de calcul du lancer de rayon dans le plan horizontal	213
4.5.2.2 - Algorithme de calcul du lancer de rayon dans le plan vertical	213
4.6 – Les modèles à Tracé de Rayons	215
4.7 – Modélisation pour la réception à l'intérieur des bâtiments	216
4.7.1 – Les modèles de pénétration	216
4.7.2 – Les modèles de propagation pour l'intérieur des bâtiments	221
4.7.2.1 – Modèle de propagation pour l'intérieur des bâtiments en distance E-R	222
4.7.2.2 – Modèle pour l'intérieur des bâtiments de type « Motley-Keenan »	223
4.7.2.3 – Modèle à tracé de rayons pour l'intérieur des bâtiments	224
4.8 - Les modèles géométriques	226
4.9 – Une évolution des modèles de propagation : les modèles à base de réseaux de neurones	228
5 - Conclusion de la deuxième partie	230

TROISIEME PARTIE **231**

<i>Sommaire de la Troisième partie</i>	233
<i>1 – Introduction de la troisième partie</i>	237
<i>2 – La qualité des données géographiques utilisées en ingénierie radiomobile</i>	239
2.1 – Introduction	239
2.2 – La nature des fichiers	241
2.2.1 – Les fichiers d'altitude (MNT)	241
2.2.2 – Les fichiers maillés Altitude / Sursol à 5 couches	242
2.2.3 – Les fichiers de contours de base du sursol	243
2.2.4 – Les fichiers d'axes de routes	245
2.2.5 – Les fichiers de facettes de montagnes	246
2.2.6 – Les clutters 17 thèmes	248
2.2.8 – Les fichiers de données maillées de sursol 100 mètres localisées	250
2.2.9 – Les fichiers de données maillées de sursol 400 mètres délocalisées	252
2.2.10 – Les fichiers de données maillées finement, au pas de 1 à 10 mètres	254
2.3 - Les formats connus et propriétaires des données géographiques	256
2.3.1 - Le format Graphe	256
2.3.2 - Les formats propriétaires FT	257
2.3.3 – Types de structures des données géographiques	259
2.3.3.1 – Les données bitmap	259
2.3.3.2 – Les données maillées	260
2.3.3.3 – Les données vectorielles	261
2.3.3.4 – Les données attributaires	262
2.3.4 – Intérêt de la compression des données géographiques maillées	263
2.4 – Améliorations des données géographiques à l'aide du SIG : Vérifications et corrections des données. Créations de nouvelles données géographiques	266
2.4.1 – Vérifications et corrections des données géographiques vectorielles	267
2.4.1.1 – Corrections à effectuer sur les contours	267
2.4.1.2 – Corrections à effectuer sur les axes des rues	270
2.4.2 – Vérifications et corrections des données géographiques maillées	271
2.4.2.1 – Corrections à effectuer sur les altitudes	271
2.4.2.2 – Corrections à effectuer sur les clutters	272
2.4.3 – Vérifications et corrections des données techniques	272
2.4.4 – Création de nouvelles données géographiques	273
2.4.4.1 – Fusion de données	273

2.4.4.1.1 - Regroupement de bâtiments.....	273
2.4.4.1.2 - Regroupement de zones de même pente : création de facettes de montagnes.....	276
2.4.4.1.3 - Création d'un MNT 3D par un Réseau Triangulaire Irrégulier : le TIN.....	278
2.4.4.2 - Ajout de nouvelles données géographiques.....	280
2.4.4.2.1 - Images à Haute ou Très Haute Résolution Spatiale, Photographies aériennes.....	280
2.4.4.2.2 - Données topographiques à grande échelle.....	282
2.4.4.2.3 - Données socio-économiques géolocalisées.....	284
2.4.5 - Transformations géométrique de données.....	286
2.4.5.1 - Rastérisation de données vectorielles : transformation de la BD Topo IGN en données mailles fines (1 à 10 mètres de résolution).....	286
2.4.5.2 - Vectorisation de données maillées : conversion d'un Modèle Numérique de Sursol en données vectorielles.....	289
3 – De nouvelles variables géographiques pour la modélisation de la propagation des ondes radio : les indicateurs morphologiques.....	293
3.1 – Introduction.....	293
3.2 – Présentation de la démarche scientifique adoptée.....	296
3.2.1 - Présentation de la méthode de calcul des surfaces de visibilité optique : Le lancer de rayon.....	297
3.3 - Les mesures morphométriques de base.....	299
3.3.1 - La longueur.....	299
3.3.2 - La hauteur.....	299
3.3.3 - La surface.....	299
3.3.4 - Le volume.....	299
3.3.5 - La densité.....	300
3.3.6 – Les indices de relief.....	300
3.3.6.1 - La courbe hypsométrique.....	300
3.3.6.2 - Les altitudes caractéristiques.....	301
3.3.6.2.1 - Les altitudes maximale et minimale.....	301
3.3.6.2.2 - L'altitude moyenne.....	301
3.3.6.2.3 - L'altitude médiane.....	301
3.3.6.3 – La pente.....	302
3.3.6.3.1 - La pente moyenne.....	302
3.3.6.3.2 - L'indice de pente i_p	302
3.4 – Les indicateurs morphologiques globaux : la rugosité.....	304
3.5 - Les indices de forme arithmétiques.....	305
3.5.1 – Présentation des indices de forme.....	305
3.5.2 - L'indice d'aplatissement.....	307
3.5.3 - L'indice de compacité.....	308
3.5.4 – Le coefficient de compacité de Gravélius.....	309
3.5.5 - L'indice de circularité de Miller.....	310
3.5.6 – L'indice de forme de Morton.....	312
3.5.7 – L'indice d'élongation de Schumm.....	313
3.5.8 – L'indice elliptique de Stoddart.....	313
3.5.9 - L'indice B.K.....	314
3.5.10 - Le coefficient de forme K_f	315
3.5.11 – Etude algorithmique et implémentation du calcul des indices de forme.....	316
3.5.11.1 - Etude algorithmique : implémentation du calcul des indices de forme géographiques.....	316
3.5.11.2 - Algorithme de calcul de la largeur Maximale pour un polygone quelconque.....	320
3.5.12 - Synthèse : Formule calculatoire des indices de forme.....	322
3.5.13 – Application du calcul des indices de forme pour l'agglomération de Strasbourg.....	323
3.5.13.1 - Visualisation des résultats.....	323
3.5.13.1.1 - Test : Visualisation des résultats pour 9 points de calcul.....	323
3.5.13.1.2 - Visualisation des résultats pour la campagne de mesure « STRASBOURG » sous ArcView.....	328
3.5.13.1.3 - Visualisation des résultats pour la campagne de mesure COST-CNET2, trajet IMPG sous ArcView.....	331
3.5.13.2 – Présentation des résultats numériques obtenus.....	333
3.5.13.2.1 – Valeurs numériques obtenues pour les 9 indices de forme.....	333
3.5.13.2.1.1 – Essai 1 : Valeurs des indices de Miller et Gravélius pour 9 points de calcul.....	333
3.5.13.2.1.2 - Valeurs des indices de Forme pour la campagne de mesure STRASBOURG, trajet VOODLY.....	334
3.5.13.2.1.3 - Valeurs des 9 indices de Forme pour la campagne de mesure COST-CNET2, trajet IMPG.....	335
3.5.13.3 - Validation géographique et radioélectrique des résultats.....	336
3.5.13.4 - Intérêts et utilisation des indicateurs morphologiques en modélisation radioélectrique.....	348
3.5.13.5 – Conclusion du troisième chapitre.....	350
4 – Le modèle OpenMorph.....	351
4.1 – Optimisation des modèles de propagation d'ondes radio.....	352
4.1.1 – Optimisation du modèle de propagation d'ondes radio de Okumura-Hata.....	352
4.1.1.1 – Introduction.....	352
4.1.1.2 - Présentation du modèle de propagation de Okumura-Hata.....	353
4.1.1.3 – Typologie du milieu géographique pris en compte par Okumura et Hata pour mettre au point leur modèle de propagation d'ondes radio.....	357
4.1.1.4 – Implémentation du modèle de propagation à l'aide du Système d'Information Géographique.....	359

4.1.1.5 – La démarche méthodologique mise en œuvre	360
4.1.1.5.1 - Présentation de la démarche méthodologique	360
4.1.1.5.2 - Principe d'affectation d'une classe d'occupation du sol radio dépendante	363
4.1.1.6 - Présentation des résultats obtenus pour chaque classe d'occupation du sol radio dépendante.....	366
4.1.1.6.1 - Modélisation en milieu Urbain Très Dense (Centre-ville).....	368
4.1.1.6.2 - Modélisation en milieu Urbain Dense	372
4.1.1.6.3 - Modélisation en milieu périurbain.....	376
4.1.1.6.4 - Modélisation en milieu rural.....	380
4.1.1.7 – Synthèse des résultats : coefficients de correction à ajouter au modèle de Hata selon le milieu géographique et gain en performances	384
4.1.1.8 – Conclusions pour le modèle de Hata	386
4.1.2 – Optimisation et validation d'un autre modèle de propagation d'ondes radio : le modèle COST-LD	387
4.1.2.1 – Introduction.....	387
4.1.2.2 – Présentation du modèle de propagation COST-LD	388
4.1.2.2.1 - Le modèle macro cellulaire CNET-UHF (également appelé modèle LD)	388
4.1.2.2.2 - Le modèle micro cellulaire COST-CNET	389
4.1.2.3 - Synthèse des résultats : coefficients de correction à ajouter au modèle COST-LD selon le milieu géographique et gain en performances.....	391
4.1.3 – Résultats numériques obtenus : Comparaison des résultats de calcul de l'affaiblissement radio pour les deux modèles de propagation d'ondes radio par rapport aux mesures d'affaiblissement sur le terrain	393
4.1.3.1 - En Milieu Urbain Dense	393
4.1.3.2 - En Milieu Urbain	394
4.1.3.3 - En Milieu Périurbain.....	395
4.1.3.4 - En Milieu Rural	396
4.2 – Le modèle OpenMorph.....	397
4.2.1 – La plateforme d'ingénierie radiomobile OpenMorph	399
4.2.1.1 - Introduction	399
4.2.1.2 – Les modules dédiés à l'ingénierie et à la visualisation	399
4.2.1.3 - L'importation/l'exportation de données, de mesures radio.....	406
4.2.1.4 – Conclusion	408
4.2.2 - Le module d'Analyse Spatiale : modélisation géographique du milieu de propagation des ondes radio	409
4.2.2.1 – De l'importance des données géographiques pour la modélisation radiomobile.....	409
4.2.2.1.1 – Introduction	409
4.2.2.1.2 – L'intérêt de l'Analyse Spatiale pour l'ingénierie radio :	410
4.2.2.1.3 – Les apports de l'Analyse Spatiale sous SIG pour les radiocommunications	410
4.2.2.2 – Applications en cours de développement et recherches futures	412
4.2.2.2.1 – Le profil horizontal.....	413
4.2.2.2.1.1 - La modélisation des espaces vides	413
4.2.2.2.1.2 - La modélisation des places en milieu urbain.....	414
4.2.2.2.1.3 - La généralisation du calcul des surfaces de visibilité.....	415
4.2.2.2.2 – Le profil vertical.....	416
4.2.2.2.2.1 - La modélisation du bâti et des espaces vides	416
4.2.2.2.2.2 – Cas particulier : Modélisation des arbres.....	417
4.2.2.2.3 – La troisième dimension, le volume	418
4.2.2.2.3.1 - La modélisation des espaces vides en 2.5D.....	418
4.2.2.2.3.2 - La modélisation des objets urbains : le bâti.....	420
5 - Conclusion de la troisième partie	423
CONCLUSION GENERALE	425
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	431
LEXIQUE.....	443
LISTE DES FIGURES	457
ANNEXES	465
<i>Sommaire des Annexes</i>	<i>466</i>
<i>1 – Les différents types d'antennes radio émettrices.....</i>	<i>467</i>
<i>2 – Exemple de mesures radio impulsionnelles</i>	<i>469</i>
<i>3 - Les formats des données géographiques</i>	<i>470</i>
3.1 – Les fichiers ASCII.....	470
3.2 - Les fichiers pour ArcView	471
<i>4 – Les courbes des valeurs calculées pour les indices de formes, l'aire des surfaces de visibilité et l'affaiblissement mesuré pour les campagnes de mesures sur Strasbourg, Trajet IMPG</i>	<i>472</i>
<i>5 – Implémentation du modèle de Hata.....</i>	<i>482</i>
<i>6 – Algorithme de calcul de l'élongation (la Longueur Maximale) pour un polygone quelconque.....</i>	<i>483</i>
<i>7 - Programmation sous ArcView 3, en langage Avenue, des formules calculatoires des indices de forme</i>	<i>484</i>

8 - Présentation des scripts « Avenue » pour le calcul des indices de forme géographiques.....	486
9 - Estimation du temps de calcul des surfaces de visibilité, du lancer de rayon et des indices de forme	487
RESUME	489

Première partie

Géographie des Télécommunications : Aspects historiques, géopolitiques, socio-économiques, Aménagement du Territoire

De tout temps l'Homme a toujours ressenti
le besoin de partager ses pensées
avec un Autre, de Communiquer.



Sources : Michel Ange, 1510, *La création d'Adam*, fresque de la Chapelle Sixtine du Vatican à Rome.

Figure 1 : Extrait de la fresque de la Chapelle Sixtine réalisée par Michel-Ange.

Introduction de la première partie

Le développement et les mutations rapides des moyens de télécommunication à l'heure actuelle suscitent un renouveau d'intérêt, et donc de nombreuses recherches scientifiques, pour les questions relatives à l'information, aux télécommunications et aux médias.

L'apparition des « médias électriques » il y a un peu plus d'un siècle, est à l'origine des bouleversements du monde actuel, dont les géographes, les sociologues, les historiens, les économistes, les philosophes, prennent de plus en plus conscience, et dont les hommes perçoivent aujourd'hui les conséquences : forte croissance du télétravail, diffusion en temps réel de l'information, développement de technopoles, mondialisation des échanges (commerciaux, idées, mode, culture, actualité, découvertes scientifiques, etc.), délocalisation des services (centres d'appels, infographie, ingénierie, etc.) vers les pays où les coûts de la main d'oeuvre sont moins élevés, forte croissance du commerce électronique, etc.

Lorsqu'on étudie l'avènement des télécommunications, on se rend compte qu'il se situe dans la ligne historique du développement des moyens de communication, et de l'abolition des barrières de l'espace et du temps. C'est également ce que pense Marshall Mac Luhan² lorsqu'il dit : « L'âge de l'électronique, qui succède à l'âge typographique et mécanique des cinq cents dernières années, nous met face à de nouvelles formes et à de nouvelles structures d'interdépendance humaine... Il est certain que la découverte de l'électromagnétisme a recréé la simultanéité de champ de tout ce qui concerne l'homme, de telle façon que la grande famille humaine vit désormais comme « un village global ». L'espace où nous vivons s'est rétréci, il est unique et résonne du son des tam-tams de la tribu ». Cette thèse de l'abolition des frontières de l'espace que permettent les télécommunications modernes, est expliquée en détail par Marshall Mac Luhan en 1968 dans son ouvrage³ « *Pour comprendre les médias* ». Il y explique le phénomène de « retribalisation » qui serait provoqué selon lui par les « nouveaux médias électriques ».

C'est une idée analogue qui est émise par Joël de Rosnay⁴ qui écrit dans son ouvrage intitulé « *Le Macrocosme* » : « La vitesse d'évolution et l'impact des moyens de télécommunications sont tels qu'il me paraît utile de discuter dès aujourd'hui des conditions et des conséquences de l'avènement possible d'une nouvelle forme d'organisation sociale : la société en temps réel. »

Nous proposons, dans cette première partie, d'étudier le développement des télécommunications au cours du XIX^{ième} et du XX^{ième} siècle.

Cette première phase de travail a consistée en une réflexion sur l'impact du développement des télécommunications sur l'espace géographique français : études des moyens de télécommunications (fixe, mobile, satellite, Internet), les implications sociales et géographiques, la répartition des réseaux téléphoniques publics et privés sur le territoire français (centralité, desserte, discontinuité). Un état des lieux des études menées dans le domaine de la Géographie des Télécommunications et des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication a été mené. Nous avons analysé l'histoire du développement des moyens de télécommunications et de la construction des réseaux de télécommunications afin de comprendre pourquoi et comment se sont développés les télécommunications sur le territoire français. Nous allons également analysés l'impact sociologique et humain sur notre société, de l'apparition depuis les années 90 des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (NTIC).

² In Marshall Mac Luhan, 1967, *La Galaxie Gutemberg*, Editions HMH, Paris.

³ In Marshall Mac Luhan, 1968, *Pour comprendre les médias*, Editions Mame/Seuil, Paris.

⁴ In Joël de Rosnay, 1975, *Le Macrocosme*, Editions du Seuil, Paris.

Chapitre 1 : Histoire des Télécommunications

« Le premier outil est la parole »

Jacques Attali⁵



Sources : Exposition⁶ « Chine, un autre monde des mots », 2004, Belfort.

Figure 2 : Ecriture du mot « aimer » en langage idéographique chinois.

En poursuivant cette même idée de Jacques Attali, on pourrait rajouter que : « *Le second outil est l'écriture* ». La figure 2 représente l'écriture idéographique chinoise d'un des plus beaux mots que l'Homme ait créé, c'est-à-dire le mot « *aimer* ».

1 – Le développement des moyens de télécommunication depuis ses origines

1.1 - Introduction

L'existence de certains modes de « télécommunication », c'est-à-dire de « communication à distance », remonte à une époque très ancienne. En effet, dès la plus haute antiquité les hommes ont utilisés des moyens de communication à distance (tam-tam, feux, marathonnier, coursier à cheval, etc.).

Cependant, on peut considérer que l'histoire des « télécommunications modernes » commence à la fin du XVIII^{ième} siècle avec l'invention du télégraphe optique par l'ingénieur français Claude Chappe.

Le XIX^{ième} et le XX^{ième} siècles ont été marqués par de grandes inventions dans le domaine des télécommunications (télégraphie sans fil, téléphone, télévision, radar, radiocommunications, etc.), et plus récemment par le développement prodigieux des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication⁷ (Internet, Téléphonie mobile, Vidéo et Photographie numériques, etc.). Toutes ces inventions ont changé la manière de vivre des hommes (Marshall Mac Luhan⁸).

⁵ Sous le terme « outil » il faut entendre « outil de communication entre les Hommes ». In Jacques Attali, 1975, *La Parole et l'Outil*, Presses universitaires de France, Paris.

⁶ Exposition « Chine, un autre monde des mots », du 10 juin au 28 août 2004, présentée à la Bibliothèque municipale de Belfort, Forum des 4 As. Exposition présentée dans le cadre de la manifestation « L'Année de la Chine dans le Territoire de Belfort ».

⁷ NTIC : confère Lexique

⁸ In Marshall Mac Luhan, 1964, *Understanding media*, Editions Mac Graw Hill, New-York, USA. Traduction française: 1968, *Pour comprendre les média*, Editions Mame/Seuil, Paris.

Etrangement, le terme de « télécommunication » est d'origine assez récente : il ne fut proposé par Edouard Estaunié qu'au début du XX^{ième} siècle.

Nous proposons, dans ce premier chapitre, de retracer l'évolution technique des télécommunications en abordant tout d'abord l'utilisation des communications à distance durant l'Antiquité, l'essentiel du chapitre 1 sera consacré à l'étude du développement des télécommunications au cours du XIX^{ième} et du XX^{ième} siècles.

1.2 - L'Homme et la communication

Nous pensons qu'il est important de commencer notre étude du développement des télécommunications par l'analyse des moyens de communication qui furent employés par les hommes selon les époques. Cette vision des choses est également partagée par l'Union Internationale des Télécommunications⁹ qui déclarait en 1965¹⁰ « L'histoire des télécommunications est inséparable de l'histoire des moyens de communication en général. Elle s'insère dans un processus continu de découvertes scientifiques et d'innovations techniques ». Il est donc utile de rappeler comment ont évolué les langages, parlé et écrit, qui forment la base même de la communication entre les hommes et qui constituent le contenu essentiel des télécommunications.

1.2.1 – La parole : premier moyen de communication

La communication, c'est tout d'abord la parole.

Pierre Charnu¹¹ estime que la genèse du langage se perd dans la nuit des temps (entre cinquante mille ans et un million d'années selon les chercheurs).

L'émergence de la parole est elle-même le fruit d'une longue évolution. En ce sens nous rejoignons les idées développées par Marshall Mac Luhan¹² (ses travaux portent sur l'analyse de la nature des médias et leur influence sur l'homme et la société) lorsqu'il dit : « qu'il est bien possible que le pouvoir qu'a la voix de moduler l'air et l'espace en formes verbales ait été précédé d'une expression moins spécialisée comme le cri, le grognement, le geste, le commandement ou la danse ».

Pour Jacques Attali¹³, qui a travaillé sur les concepts d'énergie et d'information, « le premier outil est le langage. C'est lui qui, en permettant de désigner le signifié, l'objet, a permis de réduire suffisamment l'incertitude sur l'état du monde pour permettre d'élaborer le cadre des concepts organisant le progrès scientifique, l'élaboration des cultures et l'organisation des rapports de production...L'analyse du discours ne prend son sens que par rapport au code car, sans lui, on en reste au stade du message : pour des étrangers sans interprète, et ne comprenant pas notre langue, tout ce que nous disons et écrivons n'est que du bruit ».

Au cours des âges, les hommes ont sans cesse cherché à perfectionner les moyens de codage de l'information - qu'elle soit orale, graphique ou écrite - de façon à accroître l'efficacité des messages et à faciliter l'acquisition des connaissances.

⁹ UIT : confère Lexique

¹⁰ In Union Internationale des Télécommunication, 1965, *Du sémaphore au satellite*. Ouvrage publié à l'occasion du centenaire de l'UIT.

¹¹ In Pierre Charnu, 1974, *De l'histoire à la prospective*, Editions Robert Laffont, Paris.

¹² In Marshall Mac Luhan, 1964, *Understanding media*, Editions Mac Graw Hill, New-York, USA. Traduction française : 1968, *Pour comprendre les médias*, Editions Mame/Seuil, Paris.

¹³ In Jacques Attali, 1975, *La Parole et l'Outil*, Presses universitaires de France, Paris.

Mais, quelle que soit la primauté de la parole, ce n'est qu'avec l'invention de l'écriture que l'homme franchira une nouvelle étape de son évolution et qu'apparaîtront les civilisations. Ce sera les débuts de l'Histoire.

1.2.2 – L'avènement de l'écriture

L'apparition de l'écriture n'est pas le résultat de mutations brusques, c'est l'aboutissement de longues et complexes recherches ; ainsi coexistent parfois au sein d'une même écriture des aspects pictographiques, idéographiques, syllabiques et phonétiques.

Grâce aux découvertes archéologiques effectuées depuis deux siècles, il est possible de situer de façon relativement précise l'apparition de cette nouvelle technique qu'est l'écriture. C'est au cours du quatrième millénaire avant notre ère qu'on en découvre les premiers signes, en particulier dans les vestiges des civilisations sumérienne et égyptienne.

La figure 3 représente l'alphabet hiéroglyphique utilisé dans l'Egypte ancienne. Cet alphabet n'est pas constitué de lettres ayant une valeur phonétique, mais de signes graphiques appelés hiéroglyphes¹⁴, représentant chacun un objet bien précis.

signe	trans- cription	objet représenté	son approximatif	signe	trans- cription	objet représenté	son approximatif
	3	vautour	aleph hébreu		h	cour de maison	h
	y	roseau fleuri	y		h	écheveau de lin tressé	h emphatique
		double roseau fleuri			h	placenta (?) Kh	peut-être ch
		double trait oblique			h	queue d'un mammifère	comme dans l'allemand ich
		avant-bras		ayin hébreu	(z)	verrou	ich
	w	petite caille	ou		(s)	étouffe pliée	s
		abréviation hiératique du signe			s	bassin d'eau	ch
	b	pied	b		k	corbeille à anse	k
	p	siège	p		g	support de jarre	g
	f	vipère à cornes	f		t	galette de pain	t
	m	chouette	m		t	pilon	
		côte de gazelle (?)			t	corde pour entraver les animaux	tch
	n	filet d'eau	n		d	main	d
		couronne rouge			d	serpent	dj
	r	bouche	r				

Sources : Guy Rachet, 1998, Dictionnaire de la Civilisation égyptienne, Editions Larousse, Collection Les Référents, Paris, 268 pages.

Figure 3 : L'Alphabet hiéroglyphique.

L'évènement marquant dans l'histoire du langage écrit fut l'invention de l'alphabet phonétique. Nous préférons cependant parler de maturation plutôt que d'invention, car le travail d'analyse et de simplification qui a été nécessaire pour parvenir à cet ultime

¹⁴ Hiéroglyphe : confère Lexique.

perfectionnement de l'écriture a été une œuvre de plusieurs siècles des peuples du Proche-Orient (les Phéniciens).

La technique graphique la plus efficace (pour les langues non sémitiques) consista à créer pour chaque voyelle un signe particulier qui pouvait s'adjoindre facilement aux consonnes. C'est ce que fit le peuple grec dès le VIII^{ème} siècle avant J.-C. La figure 4 représente les 24 lettres de l'alphabet grec. Louis-Joseph Libois¹⁵ déclara à ce sujet : « L'avènement de l'alphabet phonétique grec marque donc une étape décisive dans l'évolution du langage, grâce aux possibilités nouvelles qu'apporte cet alphabet, à cause notamment de son efficacité, on pourrait dire de sa productivité. En effet, il n'est pas absurde de comparer l'apparition de cet alphabet à celle d'une nouvelle technologie nettement plus performante que les précédentes et n'exigeant, en particulier, qu'un apprentissage beaucoup plus court ».

A	α		alpha	N	ν		nu
B	β	β ^{1, 3}	bêta	Ξ	ξ		ksi
Γ	γ		gamma	Ο	ο		omicron
Δ	δ		delta	Π	π	π ^{1, 3}	pi
E	ε		epsilon	Ρ	ρ		rhô
Z	ζ	ζ ³	dzêta	Σ	σ	ς ²	sigma
H	η		êta	Τ	τ	τ ³	tau
Θ	θ	θ ^{1, 3}	thêta	Υ	υ		upsilon
I	ι		iota	Φ	φ		phi
K	κ		kappa	Χ	χ		khi
Λ	λ		lambda	Ψ	ψ		psi
M	μ		mu	Ω	ω		oméga

1. S'emploie seulement au commencement d'un mot.
2. S'emploie seulement à la fin d'un mot.
3. Ne s'emploie plus dans la composition du grec moderne.

Le grec ancien comporte à la fois des esprits (esprit rude ' , esprit doux ') et des accents (aigu ' , grave `) ainsi que le circonflexe ~ (voyelles longues) et le iota souscrit.

Le grec moderne simplifie l'accentuation; les esprits ont pratiquement disparu et il ne subsiste que l'accent aigu.

Sources : In Jean-Luc Vialla et al, 2002, *Lexique des règles typographiques en usage à l'imprimerie nationale*, Presses de l'Imprimerie Nationale, 197 pages.

Figure 4 : L'Alphabet Grec

Pierre Charnu¹⁶ écrira également à propos de l'avènement de l'écriture phonétique que : « le gain que représente l'écriture est immense. L'écriture, c'est la possibilité de transmettre un code au lieu de la totalité de l'acquis, à chaque génération. Trois mille ans après l'écriture

¹⁵ In Louis-Joseph Libois, 1983, *Genèse et croissance des télécommunications*, Editions Masson, Collection Technique et scientifique des Télécommunications, Paris, 415 pages.

¹⁶ In Pierre Charnu, 1974, *De l'histoire à la prospective*, Editions Robert Laffont, Paris.

idéographique, l'alphabet permet un gain supplémentaire dans le rapport de dix à un, dans le temps nécessaire à l'acquisition du code ».

Si la découverte de l'alphabet phonétique fut celle d'une technologie de pointe révolutionnaire, qui eu un impact très important sur l'histoire de l'humanité, est-ce à dire que l'écriture idéographique n'est plus qu'un vestige du passé ? Certainement pas, les exemples du Japon et de la Chine, qui utilisent encore actuellement une écriture idéographique, nous prouvent le contraire. D'ailleurs certains linguistes se demandent si un retour partiel aux principes de l'écriture idéographique ne permettrait pas un jour de dégager les bases d'un langage universel. Il y eu bien une tentative de création d'un langage phonétique universel- l'espéranto- mais ce fut globalement un échec.

La figure 5 représente la traduction du mot « télécommunication » et du mot « aimer » en écriture idéographique chinoise et japonaise.

Écriture du mot en syllabaire japonais	Écriture du mot en caractères chinois	Transcription de la prononciation japonaise en alphabet latin	Traduction en français
愛する	あいする	ai suru	aimer
交信	こうしん	kôshin	télécommunications

Sources : F. Bernaudeau, 1996, Les mots du Japonais¹⁷.

Figure 5 : Deux exemples d'écriture idéographique : les caractères chinois et japonais.

Ces réflexions sur la nature des langages parlés et écrits et sur les bases possibles d'un langage universel ne sont pas uniquement le fait des chercheurs contemporains. Depuis longtemps d'éminents penseurs se sont intéressés à cette question. Ainsi déjà en 1637, le mathématicien et philosophe français René Descartes¹⁸ écrivait : « Si quelqu'un avait bien expliqué les idées simples qui sont dans l'imagination de l'homme, desquelles se compose tout ce qu'il pense, j'oserais espérer ensuite une langue universelle fort aisée à apprendre, à prononcer et à écrire ; et ce qui est le principal, elle aiderait le jugement, en lui représentant si distinctement toutes choses, qu'il lui serait presque impossible de se tromper, et je tiens que cette science est possible ».

On pourrait penser de prime abord que ces considérations historiques et philosophiques à propos de la genèse du langage nous éloignent de notre sujet d'étude, qui est le développement des moyens de télécommunication. Nous ne le pensons pas, car le langage parlé ou écrit constitue le contenu même du message, le « quoi », ou, si l'on préfère « la matière première » par excellence des télécommunications et mérite, à ce titre, une attention particulière. La définition internationale du terme « télécommunication » qui fut donnée par l'Union Internationale des Télécommunications¹⁹ traduit d'ailleurs cette même idée : « On désigne par télécommunication toute transmission, émission ou réception de signes, de signaux, d'écrits, d'images, de sons ou de renseignements de toute nature par fil, radioélectricité, optique ou autres systèmes électromagnétiques ». Cette définition est très générale, puisqu'elle indique que le contenu d'une télécommunication n'est pas limitée à une catégorie particulière d'information ; seul le mode de transport de l'information est limitatif, puisqu'il est précisé dans la définition que le mode de transport de l'information doit

¹⁷ In Florence Bernaudeau, Fabrice Escot, 1996, *Les mots du Japonais*, Editions Ellipses, Paris, 253 Pages.

¹⁸ In René Descartes, 1637, *Le Discours de la méthode*, Editions Livre de Poche, Collection G.F., réédition de 2000, 189 pages.

¹⁹ Définition du terme « télécommunication » donnée par l'UIT en 1865.

appartenir au domaine des ondes électromagnétiques, ce qui exclut, en particulier les transmissions par voie optique (laser), acoustique, sonore ou ultrasonore, qui sont pourtant également considérées comme des télécommunications.

On notera également que cette définition ne prend pas en compte un autre aspect très important des télécommunications, qui ne peuvent pas être réduits à un simple échange d'informations quantifiables. Les aspects qualitatifs de toute communication entre deux personnes, voir même entre deux machines ou ordinateurs, se situent dans un contexte beaucoup plus vaste. Prenons l'exemple des recherches menées sur la synthèse de la parole²⁰ : l'expérience a montré que l'homme refusait certaines formes de synthèse, très performantes du point de vue de la transmission de l'information, mais trop dépersonnalisées. Ces quelques réflexions nous conduisent à penser qu'il est souhaitable, pour le progrès des télécommunications, que des recherches soient menées non seulement sur les modes de transmission utilisées pour acheminer l'information (les moyens de télécommunication) mais également sur le contenu du message (structure de la parole, de l'écriture, etc.) ainsi que sur les aspects psychologiques de la transmission de l'information.

1.2.3 – L'invention de l'imprimerie

L'invention de l'écriture a permis à l'humanité de faire un autre grand bond en avant ; mais la diffusion du savoir et des connaissances n'en demeurait pas moins limitée à la vitesse d'écriture des copistes (dans les monastères, etc.), et ne concernait guère qu'une élite, civile, religieuse ou militaire. L'apparition de textes imprimés constituera une véritable révolution dans la diffusion des connaissances.

C'est Johannes Gensfleisch dit Gutenberg (1394-1468) qui mis au point l'ensemble du procédé d'impression typographique : confection de caractères métalliques, composition des textes et impression sur presse à bras. Les premiers textes imprimés par Gutenberg furent réalisés à Strasbourg en l'an 1436.

L'invention de Gutenberg constitue indéniablement une étape décisive dans la diffusion de la pensée écrite et marque encore profondément notre civilisation. Depuis cinq siècles, la typographie a imprégné tous les aspects de notre culture (l'art, la science, etc.). Marshall Mac Luhan²¹ déclare à propos de l'imprimerie : « elle a fait apparaître l'industrialisme, les marchés de masse, l'alphabétisation et l'instruction universelle ».

Un premier constat nous amène à distinguer différentes étapes importantes dans la diffusion rapide d'un message.

Si la parole et l'écriture, les sons, les images et les données numériques constituent la matière première des télécommunications et méritent à ce titre une grande attention, il n'en reste pas moins que le problème des télécommunications reste, principalement, un problème de « contenant » et non de « contenu ». C'est l'acheminement des messages qui compte ici et non les messages eux-mêmes. Nous aborderons donc l'histoire des télécommunications dans cette optique.

²⁰ Notamment les recherches effectuées par Christel Sorin. Elle a exercé les fonctions de Vice-présidente (2003) de France Télécom North America. Actuellement (2005), elle est Membre du Conseil Supérieur de la Recherche et de la Technologie au sein du Ministère délégué à la Recherche et à l'Enseignement Supérieur. Elle a publié de nombreux articles et ouvrages sur la synthèse automatique de la parole et la reconnaissance automatique des caractères typographiques.

²¹ In Marshall Mac Luhan, 1964, *Understanding media*, Editions Mac Graw Hill, New-York, USA. Traduction française: 1968, *Pour comprendre les médias*, Editions Mame/Seuil, Paris.

1.2.4 – Histoire des moyens de télécommunications avant « l'ère électrique »

Si l'invention de l'imprimerie entraîna un grand progrès dans la diffusion du savoir, en revanche la vitesse de diffusion de ce savoir, la vitesse de communication, restait encore très lente : ce n'est qu'avec l'apparition des moyens de transport électromagnétique de l'information qu'apparaîtra une brusque accélération de la diffusion du savoir qui deviendra alors instantanée. Marshall Mac Luhan déclara à ce propos en 1964 que : « les moyens électriques de transport de l'information transforment notre culture aussi radicalement que l'imprimerie avait modifié la culture scolastique médiévale ».

Pendant des millénaires, la vitesse de communication, de transmission de l'information, est restée celle du coureur, du coursier à cheval, ou celle de l'acheminement par voie d'eau (bateau). Cependant, déjà à cette époque, l'homme cherchait des moyens pour accroître la vitesse de transmission de l'information.

Les feux et la fumée, par exemple furent souvent utilisés comme moyens de communication à distance, notamment dans le domaine militaire. On trouve de nombreux exemples historiques de transmissions de signaux par le moyen des feux. Dans la Grèce Antique le poète tragique Eschyle²², dans sa pièce Agamemnon, décrit en détail un système de relais lumineux, qui étaient situés au sommet de montagnes, tels le mont Athos, le mont Cithéron, le mont Egiplancte, etc. : ce qui fait en tout 8 relais de feux, représentant quelque 550 kilomètres de distance ! N'est-ce pas là une préfiguration, plusieurs millénaires à l'avance, de nos actuels faisceaux hertziens, composés de relais espacés en moyenne de 60 à 80 kilomètres ?

La figure 6 illustre une utilisation des feux comme moyen de communication à distance dans le bassin méditerranéen.



Sources : Musée de l'Imagerie d'Epinal, Vosges, France.

Figure 6 : La transmission des nouvelles dans l'Antiquité : utilisation des feux²³

²² In Eschyle, 500 Av. J.-C., *Agamemnon*, scène I, acte I, traduit du Grec par P. Mazon, 2002, Editions Les Belles Lettres, Collection des Universités de France, 12^{ième} édition, 415 pages.

²³ Reconstitution d'après un bas-relief de la colonne Trajane à Rome.

Les feux ont été utilisés dès la plus Haute Antiquité, à travers tout le Bassin Méditerranéen et l'Empire Romain, comme poste de signalisation, comme moyen de communication à distance (le feu la nuit, la fumée le jour).



Sources : Scène tirée du film²⁴ *Le Seigneur des Anneaux : Le retour du roi*, de Peter Jackson, 2004, USA.

Figure 7 : Transmission d'un message par relais lumineux situés aux sommets de hautes montagnes.

La figure 7 est extraite du film *Le Seigneur des Anneaux*, réalisé par Peter Jackson. On y voit une scène de transmission des nouvelles par l'intermédiaire de feux situés au sommet de hautes montagnes.

Ainsi, ces procédés de communication à distance correspondent à des moyens optiques de transmission de l'information, qui sont en quelque sorte les précurseurs du télégraphe optique de Chappe. Il y eu aussi des procédés de transmission de l'information grâce à des moyens acoustiques : le tam-tam africain en est un exemple classique ; on trouve également des exemples de transmissions d'informations à grande distance de façon vocale. Bien que ce type de communication sorte de la définition officielle des télécommunications donnée par l'UIT (« transmissions par voie électromagnétique »), elle n'en mérite pas moins d'être signalée en tant que moyens de communication à distance. Au début du XIX^{ème} siècle, un chercheur français prénommé M. Sudre chercha à perfectionner les moyens de transmission de l'information par voie acoustique. Monsieur Sudre présentait son invention en tant que « langue musicale universelle ». Il utilisait pour cela un instrument ayant une bonne portée, le clairon, et un code musical composé de quatre notes bien distinctes (sol, ut, mi, sol). Il fit plusieurs démonstrations de ce nouveau moyen de communication acoustique, notamment dans le domaine militaire : des liaisons expérimentales furent réalisées par l'Armée sur le Champ de Mars, en 1829, puis par la Marine en 1841.

On notera que le mot « téléphonie » fut inventé par M. Sudre. On en retrouve l'emploi dans ses écrits et dans les rapports de l'Institut Royal de France sous le terme « téléphonie, ou télégraphie acoustique ». En 1833, une commission de l'Institut Royal de France examine

²⁴ In Peter Jackson, 2004, *Le Seigneur des Anneaux : Le retour du Roi*, Chapitre 14 (*Les feux de Gondor*), USA, Film réalisé d'après le roman : John Ronald Revel Tolkien, *Le Seigneur des Anneaux : Le retour du Roi*, réédition de 2004, *Le seigneur des Anneaux*, Troisième partie : *Le retour du roi*, Editions Bourgeois, 1280 pages.

cette invention, et on peut lire dans ce rapport²⁵ : « Il faut comparer le système de M. Sudre à ce qu'il y a de plus parfait dans les autres méthodes, c'est-à-dire la télégraphie telle qu'elle a été inventée par Chappe. Pour désigner l'emploi analogue de la « langue musicale », il faut un nom analogue, c'est ce que représente le mot « téléphonie », son qui s'entend au loin, comme « télégraphie » désigne l'écriture qui se voit de loin ».

Le procédé de télécommunication par voie acoustique n'aura guère d'applications, car dans la seconde moitié du XIX^{ème} siècle la découverte de l'électricité et des moyens de transmission électrique viendra remplacer tous les moyens de transmission de l'information qui existaient auparavant, donc aussi bien le télégraphe optique de Chappe que l'ébauche téléphonique de Sudre.

1.2.5 – Naissance des télécommunications modernes

Les hommes ont, depuis toujours, cherché à s'affranchir des barrières de l'espace et du temps. Ils se sont efforcés d'améliorer les communications entre les différents groupes composant leurs collectivités, en allant des plus restreintes aux plus étendues (famille, tribu, cité, nation, groupe de nations, etc.).

L'avènement des télécommunications et des nouveaux médias, notamment les médias audiovisuels et informatiques, ne remonte guère à plus d'une soixantaine d'années, ce qui donne l'impression que le développement des moyens de communication et l'accroissement de leur efficacité sont un phénomène récent. En fait, ce phénomène n'est que la prolongation d'une évolution, certes assez lente, mais qui, en réalité a été marquée au cours des siècles par de profondes mutations dans notre civilisation.

La découverte de l'électricité et des moyens de transmission électroniques de l'information au XIX^{ème} siècle marquera le début des télécommunications modernes. Ce sera le début d'une ère nouvelle fondée sur l'avènement de nouveaux médias, dont les effets marqueront profondément notre civilisation et notre culture.

L'histoire des télécommunications modernes depuis la fin du XVIII^{ème} siècle jusqu'à nos jours sera exposée en détail dans la seconde partie du chapitre 1.

²⁵ In Institut Royal de France, 1833, *Rapport concernant le procédé de téléphonie de M. Sudre*, Paris.

1.2.6 – Evolutions futures des recherches scientifiques dans le domaine des télécommunications

Le développement et les mutations rapides des moyens de télécommunication à l'heure actuelle suscite un renouveau d'intérêt, et donc de nombreuses recherches scientifiques, pour les questions relatives à l'information, aux télécommunications et aux médias.

L'apparition des « médias électriques » il y a un peu plus d'un siècle, est à l'origine des bouleversements du monde actuel, dont les géographes, les sociologues, les historiens, les économistes, les philosophes, etc., prennent de plus en plus conscience, et dont les hommes perçoivent aujourd'hui les conséquences : forte croissance du télétravail, diffusion en temps réel de l'information, développement de technopoles, mondialisation des échanges (commerciaux, idées, mode, culture, actualité, découvertes scientifiques, etc.), délocalisation des services (centres d'appels, infographie, ingénierie, etc.) vers les pays où les coûts de la main d'oeuvre sont moins élevés, forte croissance du commerce électronique, etc.

Lorsqu'on étudie l'avènement des télécommunications, on se rend compte qu'il se situe dans la ligne historique du développement des moyens de communication, et de l'abolition des barrières de l'espace et du temps. C'est également ce que pense Marshall Mac Luhan²⁶ lorsqu'il dit : « L'âge de l'électronique, qui succède à l'âge typographique et mécanique des cinq cents dernières années, nous met face à de nouvelles formes et à de nouvelles structures d'interdépendance humaine... Il est certain que la découverte de l'électromagnétisme a recréé la simultanéité de champ de tout ce qui concerne l'homme, de telle façon que la grande famille humaine vit désormais comme « un village global ». L'espace où nous vivons s'est rétréci, il est unique et résonne du son des tam-tams de la tribu ». Cette thèse de l'abolition des frontières de l'espace que permettent les télécommunications modernes, est expliquée en détail par Marshall Mac Luhan en 1968 dans son ouvrage²⁷ « *Pour comprendre les médias* ». Il y explique le phénomène de « retribalisation » qui serait provoqué selon lui par les « nouveaux médias électriques ».

C'est une idée analogue qui est émise par Joël de Rosnay²⁸ qui écrit dans son ouvrage intitulé « *Le Macrocosme* » : « La vitesse d'évolution et l'impact des moyens de télécommunications sont tels qu'il me paraît utile de discuter dès aujourd'hui des conditions et des conséquences de l'avènement possible d'une nouvelle forme d'organisation sociale : la société en temps réel. »

Des chercheurs appartenant à des laboratoires de grands organismes de télécommunications étudient également l'impact social du développement des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication. C'est le cas notamment de la France où un des Laboratoires de Recherche de France Télécom Recherche et Développement a pour mission d'explorer l'avenir des systèmes de communication et de télécommunication d'un point de vue global, en intégrant les aspects sociologiques et les impacts socio-économiques des nouveaux systèmes et des nouveaux services offerts. Gordon B. Thompson²⁹, qui fut responsable d'une équipe de recherches sur le rôle et la valeur sociale des systèmes de télécommunication, a souligné dès 1969 l'intérêt de ce secteur d'études et de recherches en sciences sociales en ces termes : « La prospective et la planification des systèmes futurs de

²⁶ In Marshall Mac Luhan, 1967, *La Galaxie Gutenberg*, Editions HMH, Paris.

²⁷ In Marshall Mac Luhan, 1968, *Pour comprendre les médias*, Editions Mame/Seuil, Paris.

²⁸ In Joël de Rosnay, 1975, *Le Macrocosme*, Editions du Seuil, Paris.

²⁹ In Gordon B. Thompson, 1969, *Moloch or Aquarius*, Editions du Bell Northern Electric Laboratories, Ottawa, Canada.

communication sont, sans doute, l'une des activités les plus importantes pour la société humaine, car elles conditionnent en grande partie son avenir. Cette activité est extrêmement significative et de grande importance, mais elle n'a pas été abordée de façon convenable dans le passé. Il est particulièrement souhaitable d'entreprendre ces recherches aujourd'hui, car nous avons la possibilité de choisir entre différents futurs possibles. Cette possibilité de choix est réelle ; elle est de notre compétence et de notre devoir. Les enfants de nos enfants nous en tiendront pour responsables ».

Thompson rejoint ainsi Gaston Berger³⁰, qui fut à l'origine de la Prospective, lorsqu'il dit : « L'avenir n'est plus seulement ce qui peut arriver ou ce qui a le plus de chance de se produire ; il est aussi dans une proportion qui ne cesse de croître, ce que nous aurons voulu qu'il soit ».

³⁰ In Gaston Berger, 1964, *Phénoménologie du temps et prospective*, Presses Universitaires de France, 278 pages.

2 – Histoire de l'évolution technique des moyens de télécommunication depuis deux siècles

Dans cette partie nous allons traiter de l'évolution des technologies de télécommunications au cours des deux derniers siècles. Nous allons évoquer les différents personnages (inventeurs, politiciens, etc.) qui ont joué un rôle important dans le développement des télécommunications en France durant cette période, les faits marquants, les technologies mises au point, ainsi que les aménagements du territoire induits par le développement de ces moyens de télécommunication modernes (télégraphe, etc.).

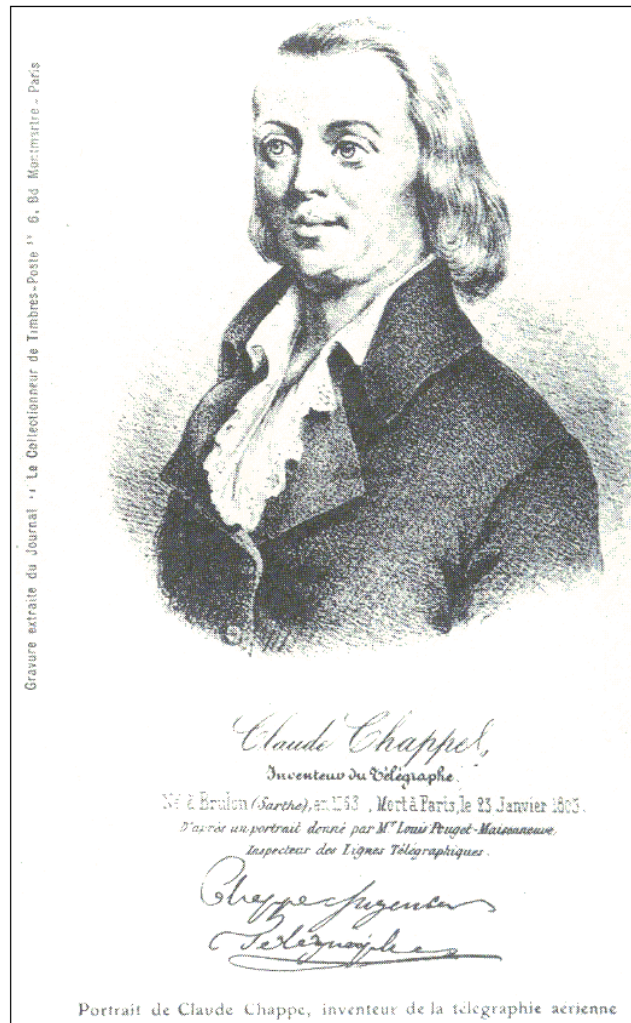
2.1 – L'invention du télégraphe

Ce n'est qu'au 17^{ième} siècle lorsque les lois de l'optique furent comprises, et après l'invention du télescope, que l'on eut quelque espoir de communiquer rapidement sur de grandes distances. Le télescope permettra alors de visualiser des messages codés sous forme visuelle. Le physicien et astronome Robert Hooke (1635 – 1703) fut le premier à exposer la télégraphie visuelle, lors d'un discours prononcé en 1684 à la Royal Society de Londres. Malheureusement, son système ne fut jamais mis en application.

2.1.1 – Le Télégraphe aérien de Claude Chappe

Ce n'est qu'un siècle plus tard qu'un jeune ingénieur français, Claude Chappe (1763 – 1805) entama des recherches sur la télégraphie optique. Son but était de mettre au point une véritable machine télégraphique. Les premiers essais du télégraphe aérien (figure 9) de Claude Chappe eurent lieu en 1790. Il poursuivit ses expériences pendant deux ans, mais à deux reprises ses appareils télégraphiques installés à Paris, Place de L'Etoile et à Ménilmontant, furent détruits.

Mais Claude Chappe (figure 8) n'était pas homme à se décourager à la première déconvenue ; il vit ses efforts récompensés, lorsqu'un député, intéressé par ses expériences, porta l'affaire devant la Convention. L'assemblée accorda un crédit sur les « fonds libres de la guerre » pour que Chappe puisse poursuivre ses essais et améliorer son système. Chappe fut nommé « ingénieur télégraphe » par un décret de la Convention en juillet 1793 et se vit confier la direction de la construction d'une ligne télégraphique entre Paris et Lille ; la Convention souhaitait être tenue rapidement informée des opérations militaires qui se déroulaient dans le Nord de la France. Cette première liaison, longue de 230 km, fut construite très rapidement et fut mise en service en août 1794. Le télégraphe Chappe ne prendra vraiment son essor que quelques années plus tard, lorsque la deuxième liaison (figure 10) sera construite sur l'axe stratégique Paris - Strasbourg. Cette liaison, qui comprenait 50 stations, fut mise en service en 1798. Après la ligne de l'Est, une autre ligne fut établie, pour la Marine, entre Paris et Brest en 1798, puis une autre en direction du midi en 1799. La liaison Paris – Lyon, commandée par Napoléon, sera achevée en 1806, et prolongée jusqu'à Turin, puis en 1809 jusqu'à Milan. A la même époque, la ligne du Nord sera prolongée jusqu'à Bruxelles en 1802, puis Anvers en 1809. Ainsi, dès le début du 19^{ième} siècle le territoire français était relié par un réseau télégraphique aérien. En 1844, la France disposait d'un réseau de 534 stations de sémaphore couvrant près de 5000 km ; ce réseau, qui était essentiellement un réseau stratégique à usage politique et militaire, était centré sur Paris, malheureusement, il ne fut jamais ouvert au public.



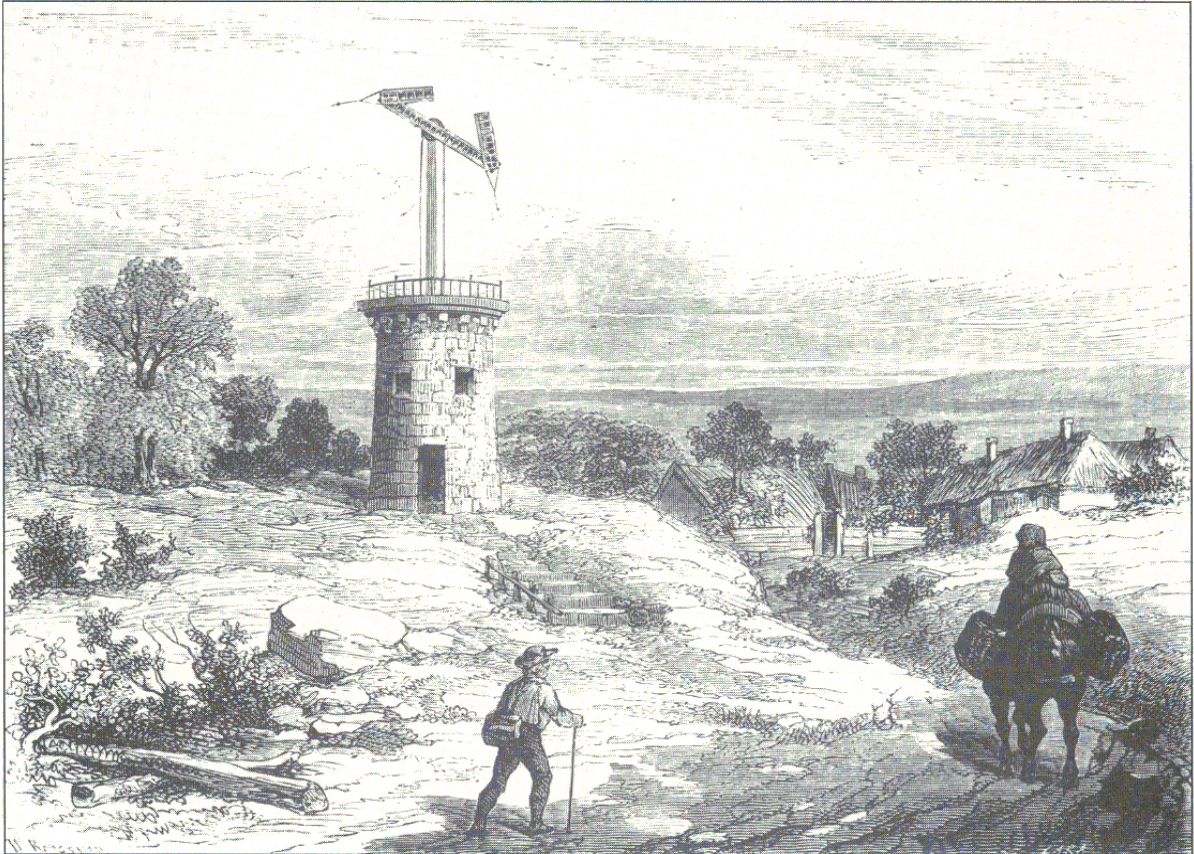
Sources : Claude Perardel et al., 1991, *Coup de fil. Le téléphone en Lorraine (1884 - 1991)*, Editions de l'Est.

Figure 8 : Portrait de Claude Chappe.

A l'étranger, la découverte de Claude Chappe eut un grand retentissement. L'Espagne et l'Italie adoptèrent sans modification le système télégraphique de Chappe. L'Angleterre et la Suède, dont le climat est plus humide et brumeux, construisirent des machines plus compliquées pour contourner ce problème de visibilité optique. La Belgique, la Hollande et le Danemark adoptèrent également le système de télégraphie aérienne de Chappe. En Russie, le tsar Nicolas I^{er} fit appel à un ingénieur français pour établir des lignes entre Saint-Petersbourg, Varsovie et Cronstadt : en 1838 la ligne Moscou – Varsovie fut achevée, elle comportait 220 stations télégraphiques desservies par 1320 opérateurs.

Après 1845, le télégraphe électrique prendra peu à peu la place du télégraphe optique ; en France la dernière ligne du réseau de télégraphie aérienne sera retirée du service en 1859.

La naissance, la vie et le déclin d'un réseau de communication sont le résultat de facteurs divers : l'histoire, la politique, les contraintes sociales, économiques et technologiques, etc. Une étude dans le temps d'un réseau, met en évidence non pas une continuité, mais plutôt des périodes continues, suivies de phénomènes de ruptures, puis de reprises et de croissance ou de décroissance du réseau (au sens de remplacement du réseau de communication par un nouveau réseau plus performant).



Sources : Claude Pérardel et al., 1991, *Coup de fil. Le téléphone en Lorraine (1884 - 1991)*, Editions de l'Est.

Figure 9 : Poste de télégraphie aérienne.

Prenons l'exemple de l'impact de l'histoire sur le développement du télégraphe aérien de Chappe. A la fin du 18^{ème} siècle, la France est composée de provinces, et une administration bien structurée maintient, au nom du Roi, l'unité du territoire. En 1789 a lieu la Révolution Française. Les premières assemblées révolutionnaires vont substituer à la notion de royauté, celle de nation. Le peuple est le nouveau souverain, mais l'unité du pays est menacée d'éclatement. L'ébranlement de toutes les structures sociales, par des réformes rapides et brutales, oblige alors la Convention à proclamer très rapidement la République « une et indivisible » (25 septembre 1792).

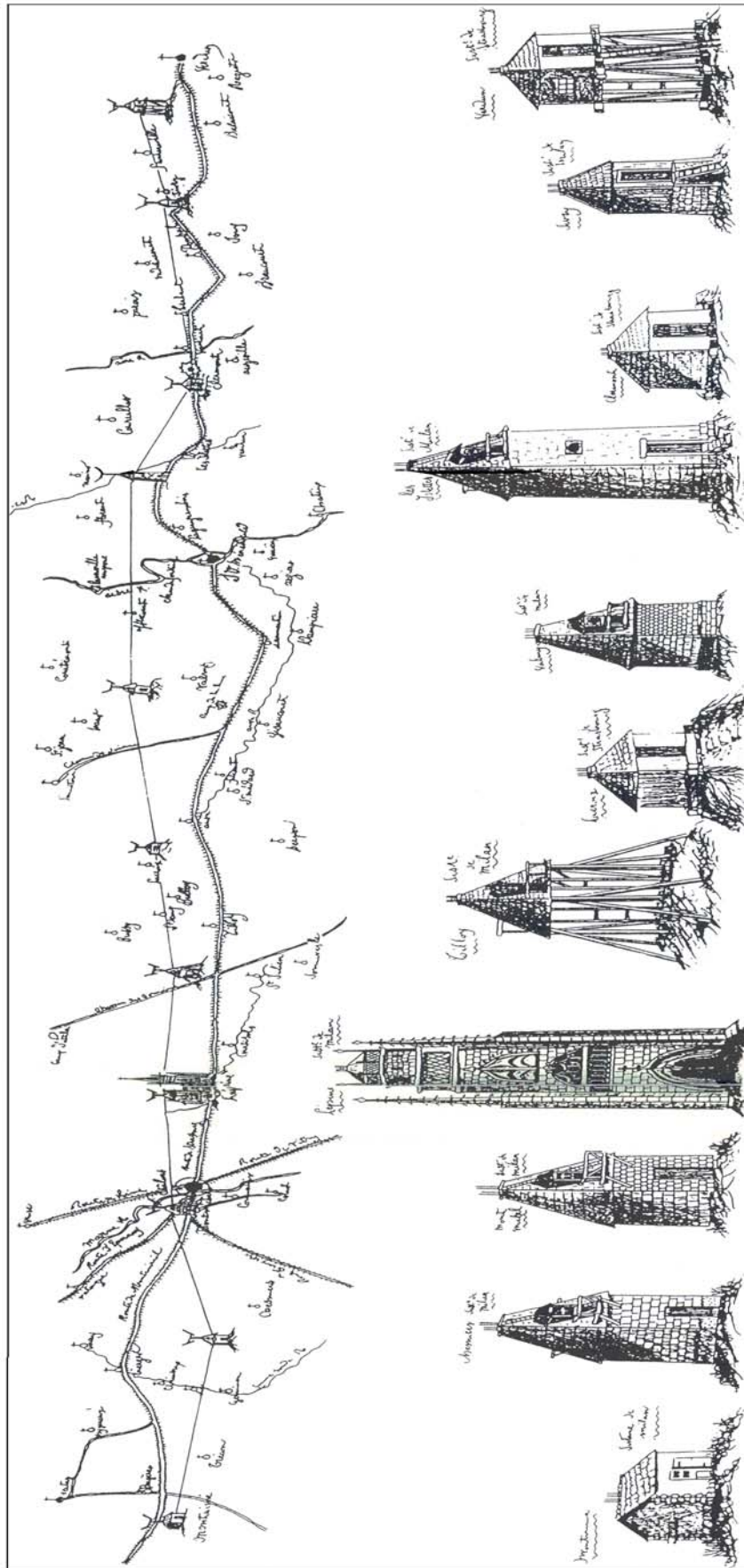
Comme le dit si bien Claude Pérardel³¹ dans son ouvrage consacré aux télécommunications en Lorraine : « La formule n'aurait eu qu'une valeur incantatoire, si elle n'avait pas été doublée de mesures permettant aux assemblées parisiennes de maîtriser le transport de l'information.

Information descendante : il faut pour les réformateurs conforter leur position, en faisant rayonner les idées nouvelles sur tout le territoire.

Information montante : il est nécessaire de connaître l'état d'esprit des provinces empoisonnées par les sirènes de la contre-révolution et du fédéralisme....

On comprend donc pourquoi le 1^{er} avril 1793, le député Gilbert Romme, rappelle à la Convention « la nécessité d'un moyen rapide et sûr de correspondre à grandes distances » et annonce que le citoyen Chappe a proposé « un moyen ingénieux d'écrire en l'air en y déployant des caractères très peu nombreux ». »

³¹ Claude Pérardel et al. , 1991, *Coup de fil. Le téléphone en Lorraine (1884 - 1991)*, Editions de l'Est, Collection Reflets et Racines, Jarville-La-Malgrange, 190 pages.



Sources : Claude Perardel et al., 1991, *Coup de fil. Le téléphone en Lorraine (1884 - 1991)*, Editions de l'Est.

Figure 10 : Ligne télégraphique reliant Paris à Strasbourg.

2.1.2 – Le Télégraphe électrique de Samuel Morse

L'inventeur du télégraphe électrique est l'américain Samuel Finley Morse (1791 – 1872). Morse n'était pas un ingénieur mais un peintre, spécialisé dans les scènes historiques. C'est en 1832 qu'il eut l'idée d'utiliser un électro-aimant comme élément actif d'un télégraphe électrique. Il réussit à faire fonctionner son premier appareil de télégraphie électrique en 1837.

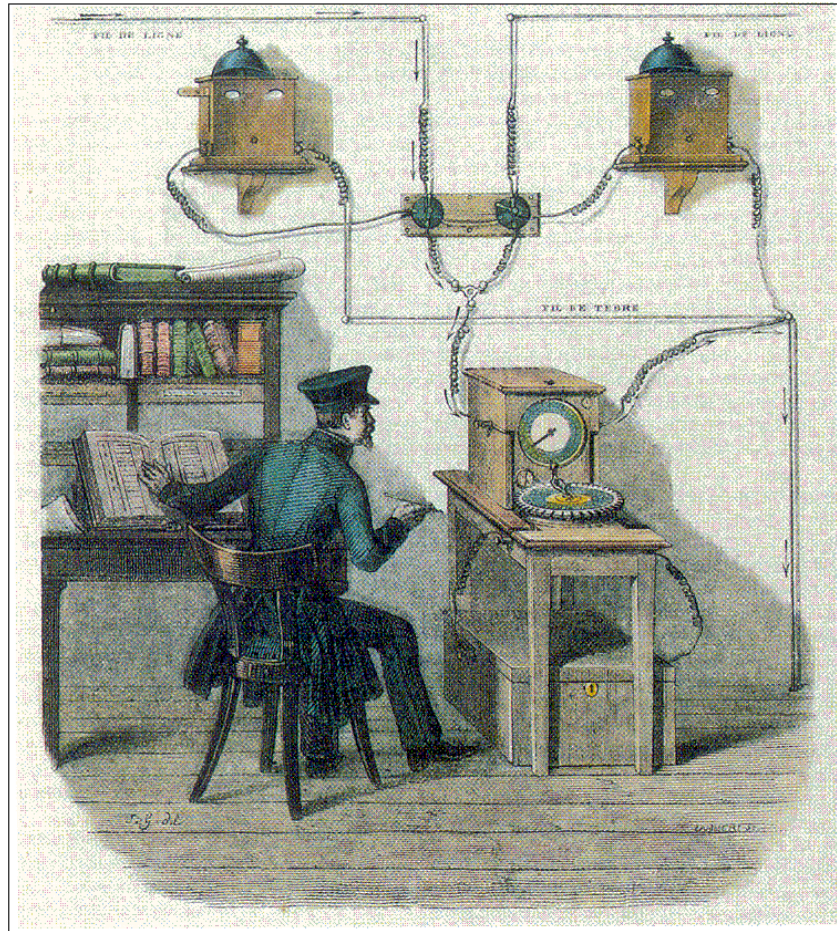


Sources : France Télécom, Direction Générale/Délégation à la Communication., 1995, *France Télécom. Mémoires pour l'action*, Editions France Télécom.

Figure 11 : Portrait de Samuel Finley Morse.

En même temps Morse mis au point un nouveau type de codage de l'information, le fameux « code morse » ; ce code est fait de « traits » et de « points », les signes les plus simples correspondant aux lettres de l'alphabet les plus fréquemment utilisées. Le génie de Morse est d'avoir inventé un dispositif dont le principe est d'une remarquable simplicité (à l'émission un manipulateur et, à la réception, un électro-aimant, un crayon et une bande de papier à déroulement régulier) et surtout d'avoir été le premier à utiliser ce que l'on appelle un « code série », c'est-à-dire un code fait de combinaisons séquentielles et non simultanées. L'invention de ce code séquentiel par Morse a permis l'utilisation d'une seule ligne de transmission ; il s'adaptera aussi parfaitement à la « lecture au son », lorsque sera inventé la radiotélégraphie. Enfin, en adoptant un code série pour la transmission des signaux en ligne, alors que le télégraphe de Chappe utilisait un « code parallèle », Morse ouvrait la voie à la télégraphie moderne. Ce type de code annonçait déjà tous les codes séquentiels, qui sont utilisés de nos jours en téléphonie numérique, en microinformatique, etc.

En 1843 la première ligne télégraphique électrique Morse fut construite aux Etats-Unis entre Washington et Baltimore.



Sources : France Télécom, Direction Générale/Délégation à la Communication., 1995, *France Télécom. Mémoires pour l'action*, Editions France Télécom.

Figure 12 : Les agents du Télégraphe Electrique

Le télégraphe électrique allait connaître dans la seconde moitié du 19^{ième} siècle, un très grand développement, aussi bien en Europe qu'aux Etats-Unis.

En France, Louis Bréguet (1804 – 1883) invente et met au point un télégraphe électrique à cadran en 1845. Il est alors chargé par le gouvernement de la construction d'une ligne de télégraphie électrique le long de la ligne de chemin de fer Paris – Rouen.

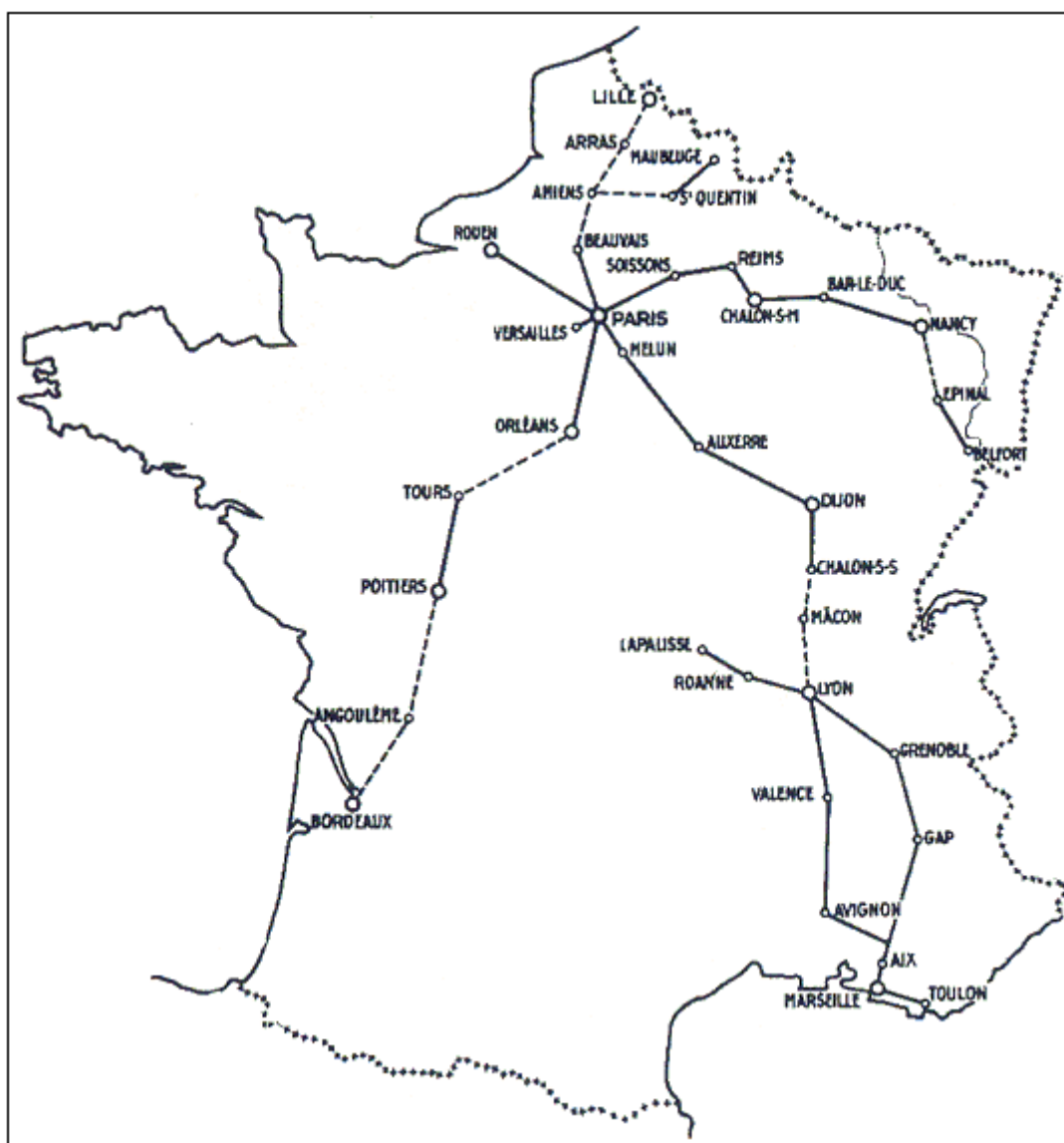
2.1.3 – Perfectionnements du télégraphe électrique

Deux perfectionnements fondamentaux furent apportés par la suite au télégraphe : l'un concerna l'impression du message en clair à la réception (la télégraphie à impression, inventée par un ingénieur américain, David E. Hughes, en 1854), et non plus sous forme de traits et de points ou de nombre d'impulsions comme dans les appareils de Morse et de Bréguet, l'autre fut l'apparition du système de codage à cinq moments et de la transmission multiple (le système de télégraphie multiple, appelée « multiplex », fut inventé par un employé de l'Administration des Télégraphes français, Emile Baudot, en 1874) de plusieurs messages sur une même ligne.

Par la suite furent mis au point des appareils télégraphiques « arithmiques » dont les organes d'émission et de réception fonctionnent seulement lorsque le signal est réellement transmis.

Ces appareils, apparus en Grande-Bretagne au début des années 1920, sont plus connus sous le nom de « téléimprimeurs ».

Ces appareils rythmiques ont permis de réaliser progressivement de véritables réseaux, avec des centres de commutation³², d'abord manuels, puis automatiques. Grâce à l'action du Comité consultatif international télégraphique et aux recommandations qu'il proposa en matière de codage de l'information, un véritable réseau mondial interconnectable a pu être progressivement constitué : le réseau télex³³. Les premiers réseaux télex datent des années 30 ; en France le réseau télex fut ouvert en 1946. Dès que les transistors furent disponibles industriellement, vers 1955, le Centre National d'Etudes des Télécommunications (CNET) commença l'étude d'un téléimprimeur dit « électronique ». Cet appareil, mis au point à la fin des années 50, connu un grand succès durant plus de 30 ans.



Sources : France Télécom, Direction Générale/Délégation à la Communication., 1995, *France Télécom. Mémoires pour l'action*, Editions France Télécom.

Figure 13 : Le réseau de télégraphie électrique français :
Les principales branches et nœuds du réseau à la fin des années 1870

³² Commutation : confère lexique

³³ Télex : confère lexique. Le mot « télex » provient d'une contraction de deux termes anglais *Teletyping Exchange*.

2.1.4 – Développement des réseaux télégraphiques

2.1.4.1 - Genèse du réseau télégraphique français

L'extension du réseau des lignes télégraphiques françaises est décidée le 1^{er} mars 1851 en même temps que son ouverture au public. Avec ses 5 000 km de lignes et ses 556 stations, le réseau français est à l'époque le plus long et le plus dense du monde et son administration la plus développée.

En 1853, le vicomte de Vougy est nommé directeur de l'administration du télégraphe. Sous son impulsion, le réseau télégraphique va connaître une croissance rapide : des 5 000 km de lignes à son arrivée, on passera à 23 000 en 1864 et 55 000 en 1877. Pour la même période, le nombre des bureaux s'accroît de 610 à 4 587. Désormais, préfetures, sous-préfetures, chefs-lieux de canton, sur l'ensemble du territoire français sont reliés entre eux.

2.1.4.2 - Le développement mondial des réseaux de télégraphie

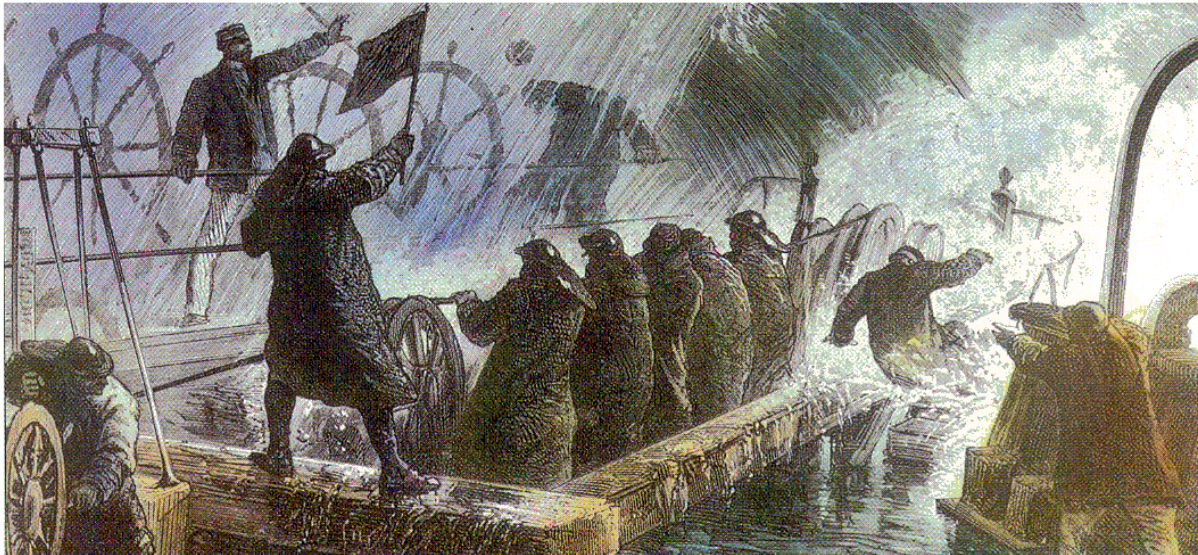
Aux Etats-Unis dès 1866, la Western Union possédait déjà 2 250 bureaux et ses lignes s'étendaient sur 120 000 km. Pour l'ensemble des pays qui étaient alors membres de l'Union Télégraphique Internationale, la longueur totale des lignes télégraphiques dépassait 500 000 km et le nombre total des télégrammes expédiés en une année d'au moins trente millions. En 1873, le développement total des lignes atteignait deux millions de kilomètres et, en 1913, la longueur des lignes dépassait sept millions de kilomètres. Quand au trafic annuel, il était, en 1913, de l'ordre de cinq cents millions de télégrammes.

2.1.4.3 - La pose des premiers câbles télégraphiques sous-marins

Dès 1850 furent tentés les premiers essais de pose de câbles télégraphiques sous-marins. En août 1850, le remorqueur *Goliath* posait le premier câble sous-marin entre le cap Gris-Nez, en France, et le cap Southerland, en Angleterre. En 1851, la liaison entre la France et l'Angleterre fut définitivement établie.

Entre 1860 et 1914, on assiste alors à une véritable explosion du développement des câbles télégraphiques sous-marins intercontinentaux. Il s'agit de prolonger le télégraphe sur l'ensemble du globe, au moment où se construisent les grands empires coloniaux anglais et français et, pour cela, il faut aller au fond des mers. Ainsi, dès 1860, une liaison est établie entre Londres et le continent indien. Mais le câble le plus important restait encore à poser : celui qui devait traverser l'Océan Atlantique. Près de dix années d'efforts inlassables (de 1857 à 1866) et de persévérance sans faille furent nécessaires pour surmonter tous les obstacles. Cette grande première mondiale allait ouvrir la voie aux télécommunications intercontinentales. En 1869, la France, entra à son tour dans la compétition et posait son premier câble transatlantique entre Brest et Saint-Pierre et Miquelon. Entre 1880 et 1920, la III^{ème} République posera la majorité des câbles du réseau.

En 1912, est créé le Service des Câbles sous-marins, rattaché à l'administration des Postes et Télégraphes. En 1921, le réseau télégraphique français, avec ses 74 252 km de câbles, est le troisième du monde, après ceux des Etats-Unis et de la Grande-Bretagne.



Sources : France Télécom, Direction Générale/Délégation à la Communication., 1995, *France Télécom. Mémoires pour l'action*, Editions France Télécom.

Figure 14 : Pose d'un câble sous-marin : les hommes au travail sur le pont du navire câblé.

L'époque historique qui a vu l'essor du télégraphe, bien avant l'apparition du téléphone, et qui correspond au début de l'ère des télécommunications, mérite, à plusieurs égards, de retenir notre attention.

Que constatons-nous en effet ? Une floraison d'idées nouvelles et ingénieuses, en Europe et aux Etats-Unis, sont le fait d'un certain nombre de chercheurs, d'ingénieurs, de mécaniciens, et même d'amateurs. Parallèlement, des chefs d'entreprises, publiques ou privées, et des financiers audacieux, n'hésitent pas à se lancer dans l'aventure, même si les obstacles à surmonter sont considérables et les échecs fréquents. Quant à la collaboration internationale, tous les responsables des services de télégraphie en comprennent très vite la nécessité.

Au plan technique, on remarquera que les débuts des télécommunications coïncident aussi avec l'utilisation du codage de l'information (alphabet Morse, code Baudot).

On notera également que les notions de codage et de transmission par « tout ou rien », qui étaient très liées à la nature du signal télégraphique, subiront une très longue éclipse avec l'apparition du téléphone et le développement des systèmes de modulation et de transmission de type « analogique » directement liés à la nature du signal téléphonique. Il faudra attendre la fin de la décennie 1960-1970 et les possibilités technologiques nouvelles offertes par les dispositifs à semi-conducteurs pour que les techniques dites « numériques » fassent à nouveau leur entrée en télécommunications, en transmission d'abord, avec les systèmes de « modulation par impulsions et codage » (MIC), et en commutation ensuite, grâce à la commutation électronique.

2.2 – L’invention du téléphone

Dans cette partie nous présenterons l’invention du téléphone analogique et l’étape suivante : la construction des premiers réseaux de lignes téléphoniques, qui permirent de relier les postes téléphoniques dispersés à travers tout le territoire français et le reste de l’Europe et du monde.

2.2.1 - Premières expériences de propagation des ondes acoustiques

Les premières expériences, de transmission de son à grande distance, par voie acoustique, ont été réalisées par le savant anglais Robert Hooke, plus connu pour ses recherches sur le télégraphe optique. Robert Hooke écrira dans ses mémoires : « En employant un fil tendu, j’ai pu transmettre instantanément le son à une grande distance et avec une vitesse, sinon aussi rapide que la lumière, du moins incomparablement plus grande que celle du son dans l’air. Cette transmission (en 1667) peut être effectuée non seulement avec le fil tendu en ligne droite, mais encore quand le fil présente plusieurs coudes ».

On fait remonter à la même époque l’invention du « téléphone à ficelle ». Le dispositif comprenait, à chaque extrémité, un tube de forme conique, fermé par une membrane tendue en parchemin, au milieu de laquelle était fixée la ficelle. Lorsqu’une personne parlait en face de l’un des tubes, les vibrations de la membrane émettrice étaient transmises par le fil à une membrane réceptrice fixée à l’autre extrémité de la ficelle. On parvenait ainsi à transmettre les sons à plusieurs centaines de mètres.

On peut citer aussi les travaux d’un bénédictin de l’abbaye de Cîteaux, Dom Gauthey, qui adressa, en 1782, un mémoire à l’Académie des sciences de Paris, concernant « un moyen rapide, simple, facile et direct de s’entretenir avec des personnes placées à des distances quelconques ». Le système de Dom Gauthey reposait sur les propriétés de la propagation des ondes acoustiques dans les tuyaux. Le rapport fut présenté à l’Académie des sciences par Concordet, qui estima que « ce moyen de communication lui paraissait nouveau, praticable et ingénieux et qu’il pouvait s’étendre jusqu’à la distance de trente lieues, sans station intermédiaire ». A la suite de ce rapport favorable, des essais furent entrepris, à Paris, sur un conduit de près de 800 mètres destiné à la distribution de l’eau. Les résultats furent satisfaisant ; mais, malgré tous les efforts déployés par Dom Gauthey pour essayer de poursuivre ses expériences sur des distances beaucoup plus grandes, l’affaire en resta là. C’est donc par des moyens acoustiques que l’on essaya d’abord de transmettre la parole à distance.

2.2.2 - Premières essais de mise au point d’appareils téléphoniques

De même que l’avenir du télégraphe n’était pas dans l’utilisation de moyens optiques, de même le téléphone acoustique était très limité dans ses applications. En fait, ce n’est qu’avec la découverte de l’électricité que débiteront réellement les premiers essais de mise au point du téléphone. Ainsi, deux physiciens américains, Henry et Page, découvrirent, en 1837, qu’une tige métallique soumise à des aimantations et des désaimantations très rapides pouvait émettre des sons en vibrant et que la hauteur de ces sons était en rapport avec la fréquence des émissions de courant qui les provoquaient.

En 1860, Philipp Reis, un professeur de physique et de musique allemand, réalisa la première transmission électrique d’une mélodie sur une certaine distance. Reis utilisait un cône imitant l’oreille humaine, sur lequel il avait tendu une membrane ; sur cette membrane était fixé, par de la cire cacheter, un fil de platine, qui lui-même faisait partie d’un circuit alimenté par une batterie d’accumulateurs. A l’autre extrémité, les conducteurs arrivaient à une bobine enroulée

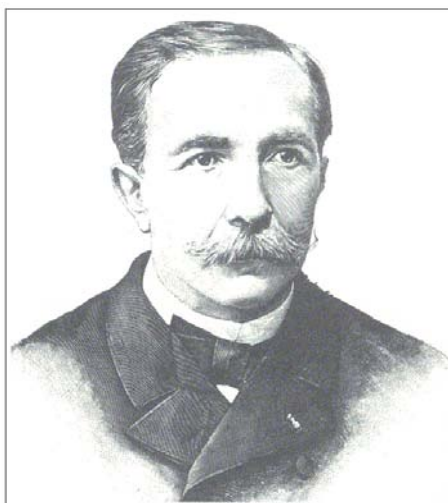
autour d'une aiguille à tricoter dont les modifications de l'état magnétique reproduisaient les sons.



Sources : Claude Pérardel *et al.*, 1991, *Coup de fil. Le téléphone en Lorraine (1884 - 1991)*, Editions de l'Est.

Figure 15 : Portrait de Philipp Reiss.

Enfin, en France, un agent de l'Administration des télégraphes au bureau de la Bourses de Paris, Charles Bourseul, formula pour la première fois, en 1854, l'idée de principe du téléphone, dans un article paru dans le journal *L'Illustration*, en ces termes : « Je me suis demandé si la parole elle-même ne pouvait pas être transmise par l'électricité, si l'on ne pourrait pas parler à Vienne et se faire entendre à Paris. La chose est praticable, voici comment Les sons, on le sait, sont fournis par des vibrations et apportés à l'oreille par ces mêmes vibrations reproduites par les milieux intermédiaires. Mais l'intensité de ces vibrations diminue très rapidement avec la distance, de sorte qu'il y a, même au moyen des porte-voix, des tubes et des cornets acoustiques, des limites assez restreintes, qu'on ne peut dépasser. Imaginez que l'on parle près d'une plaque assez flexible pour ne perdre aucune des vibrations produites par la voix, que cette plaque établisse et interrompe successivement la communication avec une pile, vous pourrez avoir à distance une autre plaque qui exécutera en même temps exactement les mêmes vibrations. » L'Administration française ne donna aucune suite à cette proposition et c'est bien dommage ; mais n'oublions pas qu'à cette époque, en France, il n'existait encore aucun laboratoire permettant d'expérimenter les thèses de Charles Bourseul.



Sources : Claude Pérardel *et al.*, 1991, *Coup de fil. Le téléphone en Lorraine (1884 - 1991)*, Editions de l'Est.

Figure 16 : Portrait de Charles Bourseul

2.2.3 - L'invention du téléphone

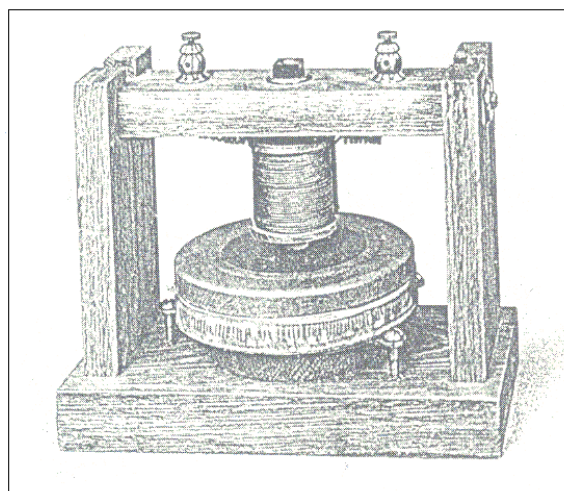
Les débuts du téléphone ne commencent, en réalité, qu'en 1876 aux Etats-Unis, avec les travaux et l'invention du poste téléphonique par l'Ecossais Alexander Graham Bell.

La date officielle de naissance du téléphone peut être fixée au 14 février 1876. C'est, en effet, ce jour que Bell déposa, à l'Office des brevets des Etats-Unis, sa demande de brevet accompagné d'un mémoire décrivant son appareil. Il s'agissait d'un appareil magnétique constitué par une bobine entourant un aimant permanent devant lequel pouvait vibrer une membrane en fer doux ; les vibrations communiquées par la parole à la membrane du transmetteur entraînaient des variations de flux magnétique d'un barreau aimanté, ce qui provoquait des courants d'induction très faibles qui, recueillis par la bobine du récepteur, modifiaient le champ créé par l'aimant permanent et faisaient ainsi vibrer la membrane du récepteur en accord avec celle de l'émetteur.



Sources : France Télécom, Direction Générale/Délégation à la Communication., 1995, *France Télécom. Mémoires pour l'action*, Editions France Télécom.

Figure 17 : Portrait de Alexander Graham Bell, l'inventeur du téléphone



Sources : Claude Pérardel et al., 1991, *Coup de fil. Le téléphone en Lorraine (1884 - 1991)*, Editions de l'Est.

Figure 18 : Poste téléphonique expérimental de Bell

Ce même jour de l'année 1876, mais deux heures plus tard, un dénommé Elisha Gray, électricien à Chicago, déposait une demande de brevet concernant un appareil, analogue dans son principe à l'appareil de Reiss, qui transmettait la parole à distance. La demande était accompagnée de dessins et d'un mémoire, décrivant l'appareil de manière claire, nette et précise. L'objet de l'invention était donc le même que celui de Bell. Ce fut donc Bell qui obtint le brevet concernant le premier téléphone.

En France, le premier poste téléphonique date de 1879 ; il est dû à l'ingénieur Clément Ader. Le poste à colonne de Clément Ader sera appelé « poste téléphonique portatif » par opposition aux téléphones muraux.



Sources : Claude Pérardel *et al.*, 1991, *Coup de fil. Le téléphone en Lorraine (1884 - 1991)*, Editions de l'Est.

Figure 19 : Portrait de Clément Ader



Sources : Claude Pérardel *et al.*, 1991, *Coup de fil. Le téléphone en Lorraine (1884 - 1991)*, Editions de l'Est.

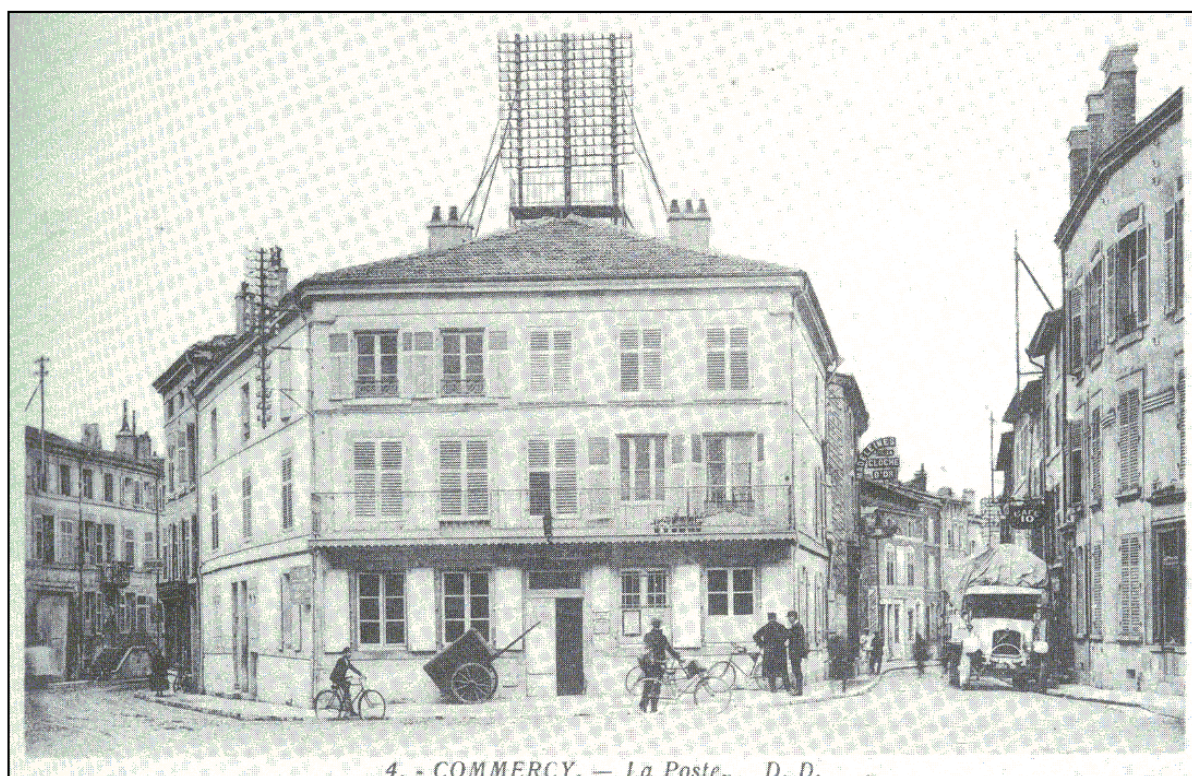
Figure 20 : Poste téléphonique Midlé, 1893.

2.2.4 - La construction des réseaux de lignes téléphoniques

Aux Etats-Unis, le 09 octobre 1876, Bell parvenait à établir une première liaison téléphonique longue de 2 milles entre Boston et la ville voisine de Cambridge Port. A partir de cet instant, le réseau téléphonique américain connu un rapide essor : dès le début de l'année 1878 un premier standard téléphonique commercial desservant 21 postes était mis en service à New-Haven (Connecticut). En 1880, la première ligne téléphonique était inaugurée ; elle reliait Boston à Providence. On ouvrit ensuite les lignes Boston – New York (1885), New York – Chicago (1892), New York – Denver (1911) et New York – San Francisco (1915). Dès 1892, le premier central téléphonique automatique était inauguré dans l'Indiana : il desservait 75 abonnés.

Jusqu'au début du 20^{ème} siècle, la transmission à grande distance de la parole se faisait exclusivement à l'aide de lignes aériennes constituées par des fils de cuivre très épais et très espacés les uns des autres. En utilisant des fils d'un diamètre énorme (5 millimètres), on arrivait à franchir 750 kilomètres : c'était à l'époque la longueur maximale des lignes téléphoniques à grande distance.

Au cours des années suivantes, le réseau des câbles téléphoniques s'étendit sur des distances de plus en plus longues. Cette extension fut plus rapide aux Etats-Unis qu'en Europe ; cependant, vers 1925, la France comptait quelques 1500 kilomètres de câbles téléphoniques, l'Allemagne 7400, la Grande-Bretagne 9600 et la Suisse environ 1600.



Sources : Claude Pérardel et al., 1991, *Coup de fil. Le téléphone en Lorraine (1884 - 1991)*, Editions de l'Est.

Figure 21 : Arrivée des lignes téléphoniques sur les toits des bureaux de poste



Sources : France Télécom, Direction Générale/Délégation à la Communication., 1995, *France Télécom. Mémoires pour l'action*, Editions France Télécom.

Figure 22 : Les téléphonistes dans un central téléphonique à la fin du 19^{ème} siècle.

2.2.5 - Genèse du téléphone en France

En 1879, les Etats-Unis comptent déjà quelques 25 000 abonnés au téléphone. En France, c'est cette même année que les premières demandes de concessions pour la construction de réseaux téléphoniques sont formulées. Elles sont déposées par trois sociétés privées : Hébrard, Foucher de Carel et Berthon. En 1880, ces trois sociétés fusionnent pour donner naissance à la Société générale des téléphones. Cette société va alors réorganiser le réseau téléphonique de Paris, et construire ceux de Bordeaux, Marseille, Nantes et Le Havre. 1880 marque ainsi le début du téléphone en France. A partir de ce moment le téléphone se développe rapidement. Parallèlement, les compagnies de chemin de fer voyant dans le téléphone un moyen d'augmenter la sécurité des transports se livrent à des recherches.

En 1881 a lieu « l'Exposition d'électricité » à Paris. Cette exposition va contribuer de façon notable à la vulgarisation de cette nouvelle technique. La Société générale des téléphones organise, au palais de l'Industrie, des auditions théâtrales téléphoniques en provenance de l'Opéra et du Théâtre français : le « Théâtrophone » sera l'un des plus grands succès de l'exposition.

A partir de 1882, la Société générale des téléphones obtient du gouvernement l'autorisation de desservir par une même ligne, à abonnement réduit, deux abonnés d'un même immeuble. La société entreprend alors d'installer des petits réseaux destinés à des services intérieurs, et l'on voit apparaître les premiers tableaux avec « annonceurs ». En 1883, les grandes compagnies des chemins de fer adoptent aussi le téléphone comme appareil avertisseur, tout en conservant le télégraphe.

Devant ce développement important des réseaux téléphoniques en France, le gouvernement commence à s'intéresser au téléphone. En 1882, le ministre des Postes et Télégraphes obtient un crédit destiné à expérimenter l'exploitation d'un réseau téléphonique. L'administration désire réaliser d'abord une expérience et, pour ce premier essai, choisit Reims ; le Premier avril 1883 est mis en service le réseau public de cette ville, avec 150 abonnés et cabines dans les gares, bureaux de postes et établissements municipaux.

En 1884, à Paris et dans quelques villes de province, commence l'installation de cabines téléphoniques dans les bureaux des Postes et Télégraphes et dans les bureaux centraux de la Société générale des téléphones. Le premier janvier 1885, ce nouveau service est ouvert au public. C'est également à partir de 1885 que les abonnés du réseau de Paris peuvent expédier et recevoir par téléphone leurs dépêches télégraphiques.

Par ailleurs, le gouvernement met en service, au cours de cette même année, une liaison à grande distance entre Rouen et le Havre : les abonnés de ces deux villes peuvent ainsi correspondre entre eux, depuis leur domicile. L'année suivante, l'Etat fait construire des lignes entre Paris et Reims, Lille, Roubaix, Tourcoing.

Au début de 1887, le téléphone franchit les limites du territoire national : une première « correspondance téléphonique » est inaugurée, le 24 février, entre Paris et Bruxelles, sur une distance de 300 kilomètres. Les techniciens du téléphone venaient de remporter là une belle victoire ; il ne restait plus aux gouvernements français et belge qu'à établir des conventions fixant les tarifs d'abonnement et de correspondance.

A cette époque, les liaisons interurbaines nationales se multiplient et la taxation se précise.

Pendant toute cette période, l'Etat n'a donc pas le monopole de la transmission des signaux téléphoniques, mais en contrepartie, la Société générale des téléphones doit lui verser 10 % des recettes brutes de tous les réseaux qu'elle possède ; elle paie également à la ville de Paris une redevance, calculée au mètre, pour droit de passage des fils téléphoniques dans les égouts.

2.2.6 - Nationalisation du téléphone en France

Qu'allait faire l'Etat devant l'extension des réseaux téléphoniques et les immenses perspectives qu'ils ouvraient ? Les concessions, qui avaient été établies pour 5 ans, expiraient en 1884. A l'expiration de ce premier contrat elles furent prolongées pour une nouvelle période de 5 ans. Mais, l'idée d'une nationalisation du téléphone devenait de plus en plus évidente et nécessaire pour l'Etat, afin de disposer d'un réseau téléphonique français couvrant l'ensemble du territoire, y compris les zones rurales moins peuplées.

Ainsi, en 1889, l'Assemblée Nationale décide de transférer à l'Etat la gestion du téléphone et, au mois de juillet, l'administration des Postes et Télégraphes prend possession des bureaux centraux de la Société générale des téléphones. Les « correspondances téléphoniques » deviennent effectivement service public.

Ce tableau (figure 23) retrace l'évolution du nombre des postes téléphoniques de toute nature, en France et dans le monde, au cours de la période qui a précédé la nationalisation.

<i>Années</i>	<i>Etats-Unis</i>	<i>Europe</i>	<i>France⁽¹⁾</i>	<i>Autres pays</i>
1877	2 600	0	0	0
1878	9 300	50	0	0
1879	16 000	1 000	0	0
1880	31 000	1 900	0	0
1881	47 900	5 600	800	2 200
1882	71 400	13 400	2 107	3 000
1883	97 700	25 000	3 573	5 400
1884	123 600	39 000	4 739	9 500
1885	147 700	58 000	5 127	11 800
1886	155 800	77 000	5 789	14 300
1887	167 100	99 000	6 558	17 100
1888	180 700	122 000	7 505	23 300
1889	195 000	150 000	8 205	26 500
1890	211 500	177 000	9 129	31 500
			12 141 ⁽²⁾	

Sources : France Télécom, Direction Générale/Délégation à la Communication., 1995, *France Télécom. Mémoires pour l'action*, Editions France Télécom.

(1) Nombre d'abonnés de la Société générale des téléphones.

(2) Somme totale des abonnés téléphoniques, possédant des postes téléphoniques de toute nature (mural, etc.)

Figure 23 : Nombre de postes téléphoniques de toute nature en France et dans le monde pour la période 1877-1890.

Que constate-t-on sur ce tableau ? Un démarrage assez rapide du téléphone en France, puis un ralentissement vers 1885. En, 1890, le nombre des postes téléphoniques en France ne représente que 6,8 % du « parc » des postes européens. Un certain retard d'équipements semble donc se manifester en France dès cette époque.

De 1890 jusqu'à la Première Guerre mondiale, le téléphone allait se développer assez rapidement en Europe et en France. Nous pouvons voir sur le tableau ci-dessus qu'au début de 1890 la France comptait quelque 12 000 postes de toute nature (177 000 en Europe). En 1900, le nombre de postes passait en France à 62 000 et atteignait déjà 800 000 en Europe ; en 1910, 212 000 en France et 2 752 000 en Europe, ce qui correspond à un taux de croissance de 13 % par an du nombre de postes téléphoniques nouvellement créés. Pendant la même décennie (1900-1910) le nombre d'abonnés aux Etats-Unis était multiplié par 7, ce qui correspond à une croissance moyenne annuelle de 21 %. L'Europe est donc à la traîne par rapport aux Etats-Unis en matière d'équipement téléphonique dès le début du 20^{ème} siècle.

Pendant toute cette période, tandis que les premiers centraux téléphoniques automatiques font leur apparition aux Etats-Unis, au contraire, en Europe et en France, le téléphone demeure manuel. Les premières critiques à l'égard du téléphone en France apparaissent alors.

2.2.7 - L'automatisation du téléphone

La « téléphonie automatique » a fait son apparition en Europe aux alentours de 1910. Aux Etats-Unis, le téléphone automatique est déjà en place avec le « système Strowger » depuis les années 1892. Ce système a été progressivement perfectionné, avec l'invention du présélecteur de lignes. Les centraux automatiques, qui étaient jusqu'alors encombrants et coûteux, se simplifièrent et devinrent compétitifs vis-à-vis des centraux manuels. A partir de 1907, un grand nombre de villes des Etats-Unis commencent à les préférer aux centraux manuels.

En Europe, le premier central public automatique a été celui de Hildesheim, en Allemagne, ouvert en 1908 avec 900 abonnés. En Angleterre, le premier central automatique est mis en service à Epsom, en 1912, avec 500 abonnés. En France, un premier central téléphonique automatique est installé en 1913 à Nice. La Première Guerre mondiale retardera malheureusement beaucoup les réalisations qui devaient suivre : un second central Strowger devait être construit à Orléans dès 1912, il ne verra le jour qu'en 1919. Une dizaine d'autres centraux automatiques Strowger furent mis en service entre 1921 et 1931.

Mais les premiers centraux automatiques n'apparaissent ni suffisamment au point ni assez économiques pour l'emporter indiscutablement sur les centraux manuels. Aussi pensa-t-on à doter les opératrices du téléphone de dispositifs automatiques qui permettaient de diminuer sensiblement leur nombre et d'augmenter leur rendement. Il s'agissait en fait d'une exploitation « semi-automatique ». Mais la solution « semi-automatique » était vite apparue comme une solution sans grand avenir. Un autre système semi-automatique, dit « automatique rural » aura un développement beaucoup plus important, on peut même dire beaucoup trop important.

Si le système Rotary semi-automatique n'eut qu'une durée de vie limitée, il n'en fut pas de même du système Rotary proprement dit. Le premier central Rotary entièrement automatique fut mis en service à Nantes en 1927 ; il a fonctionné jusqu'en 1959. Un autre central Rotary légèrement différent, fut installé à Marseille, en 1928, certaines parties de ce central étaient encore en service au début des années 70.

2.2.7.1 - Le développement de la commutation automatique à Paris

A Paris, les études préalables à l'introduction de centraux automatiques commencèrent en 1925. A cette époque, l'administration française disposait, d'une part d'une expérience acquise sur les premiers centraux téléphoniques en province et, d'autre part, des renseignements recueillis par les missions qui avaient été envoyées à l'étranger. En effet, outre New York, Berlin et Londres, de très grandes villes étaient déjà automatisées ou en passe de l'être : San Francisco, Los Angeles et Sydney, en système Strowger ; Munich, Amsterdam et Lausanne, en Strowger Siemens ; Anvers, Bruxelles, La Haye, Bâle et Genève en Rotary ; Stockholm et Rotterdam, en système Ericsson.

Dans son livre *Des ondes et des Hommes*³⁴, Maurice Deloraine retrace la « saga du Rotary – la bataille de Carnot ». Cet ouvrage nous rappelle dans quel contexte fut prise la décision d'adopter le Rotary pour Paris et comment furent menées à bien la construction et l'installation du premier central automatique sur Paris (le central Carnot). La mise en service du central Carnot, à la fin de 1928, marque une étape importante dans l'évolution du réseau téléphonique en France et, plus spécialement, en région parisienne. Un effort remarquable sera effectué à Paris pendant 5 ans, de 1929 à 1934 : 14 000 lignes automatiques seront

³⁴ Maurice Deloraine, 1974, *Des Ondes et des Hommes*, Editions Flammarion, Paris.

installées en 1929, pour finir avec 44 000 lignes installées en 1934, soit un équipement total de 300 000 lignes. La guerre de 1939-1945 marque une rupture qui se traduit par un ralentissement brutal de l'équipement et un plafonnement du nombre de lignes automatiques installées ; il faudra attendre plus de 30 ans pour retrouver à Paris le rythme d'équipement du début de l'automatisation. Le plan dont nous venons de parler concernait l'équipement de la ville de Paris elle-même. Quant aux abonnés de la banlieue parisienne, ils dépendirent, jusqu'en 1926, du bureau de poste de leur commune ; leurs communications étaient établies par la téléphoniste locale. Il y avait ainsi un grand nombre de réseaux téléphoniques, d'importances très inégales, dotés d'un équipement varié, le plus souvent désuet, et dont l'exploitation était difficile.

Les premiers autocommutateurs de la zone suburbaine de Paris seront mis en service en 1933. L'automatisation des centres téléphoniques de Paris ne fut achevée qu'en 1938. Quant à la zone suburbaine, son automatisation ne sera achevée qu'en 1955.

Cependant, le développement de l'urbanisation dans la région parisienne rendait plus dense le tissu urbain entre des villes comme Versailles et la banlieue de la zone urbaine. C'est la raison pour laquelle, au cours des années 30, l'administration des PTT et ses techniciens se préoccupèrent d'étendre l'exploitation automatique au-delà de la proche banlieue : on fut amené ainsi à définir une zone dite « zone régionale n°1 » (ou ZRI) qui constitua une couronne concentrique dont les limites s'étendirent à une dizaine de kilomètres au-delà de la zone suburbaine. En 1935, il fut décidé d'équiper également cette zone en Rotary. Il faudra attendre 1975 pour que l'automatisation de la région parisienne soit complètement achevée.

2.2.7.2 - Le développement de la commutation automatique en province

L'administration française souhaitait en matière de télécommunications, ne pas dépendre uniquement de techniques étrangères ; des travaux furent donc entrepris dans des laboratoires français sur différents types d'équipements de commutation.

En septembre 1928, un premier central automatique de conception française entra en fonctionnement expérimental à Troyes, avec une capacité de 2 000 abonnés : il s'agissait d'un nouveau système de commutation, qui fut désigné par la suite sous le sigle « R 6 » (Rotary n°6).

Le R 6 a connu un développement important en province : le premier central de Troyes, mis en service en 1928, a fonctionné jusqu'en 1964 ; vinrent ensuite, en 1929, ceux de Nîmes et d'Epinal qui ont été en service respectivement jusqu'en 1971 et 1972. En 1974, 500 000 lignes R 6 étaient encore en fonctionnement.

A partir de 1933, une nouvelle génération de R 6 avec enregistreurs faisait son apparition et permettait d'équiper les grandes villes. Ainsi, pour automatiser l'importante agglomération de Lille-Tourcoing-Roubaix, c'est le système R 6, perfectionné par des enregistreurs à 5 ou 6 chiffres, qui fut retenu en 1930. Plusieurs centraux automatiques de ce type furent mis en service à partir de 1933 dans la zone urbaine et suburbaine de l'agglomération lilloise. Mais, comme pour Paris, les restrictions budgétaires, qui intervinrent à partir de 1934, ne permirent pas de réaliser, comme prévu, le programme d'automatisation des villes de province.

2.2.7.3 - Le développement de la commutation automatique en milieu rural

Le troisième plan de l'équipement téléphonique français concernait les zones à faible densité de population, les zones rurales. Quelles solutions convenait-il d'adopter, afin de desservir au mieux ces populations rurales ?

Lorsque le téléphone prit naissance dans les campagnes françaises, on se contenta d'installer, dans le bureau de poste de chaque commune, un commutateur « manuel » auquel aboutissaient, sur « annonceurs », les lignes des abonnés locaux. Un ou plusieurs « circuits locaux » le reliaient à un bureau de poste plus important et il en était ainsi, de proche en

proche, jusqu'à la sous-préfecture ou jusqu'à une localité assez importante pour être dotée d'un central téléphonique disposant de circuits interurbains. Cette exploitation des « tableaux manuels » par les employés de la poste était loin de donner une grande qualité de service.

Les procédés automatiques apparurent alors assez vite en mesure d'apporter des solutions à ce problème. Puisque les communications locales bénéficiaient de l'automatisme, les dépenses entraînées par la transformation des postes d'abonnés, le remaniement ou la création des lignes et circuits nécessaires, n'apparurent justifiées que dans les zones à densité téléphonique suffisante, telles que les banlieues de grandes villes.

Restait à trouver une solution spécifique pour les campagnes où le téléphone, comme la population, était alors très dispersé ; sur les 25 000 réseaux locaux existant, plus de la moitié comportaient moins de cinq abonnés. Le projet d'équipement, qui fut proposé par l'administration des PTT, prévoyait de remplacer les petits commutateurs manuels des bureaux de poste ou « centres locaux » par de simples armoires contenant chacune un « semi autocommutateur » robuste et d'entretien facile, pour concentrer l'exploitation manuelle dans un « centre de groupement » disposant d'un effectif spécialisé et assurant la permanence du service. C'est le système, appelé couramment « automatique rural », qui fut adopté en 1935. L'équipement des réseaux ruraux fut entrepris dans toute la France au début de l'année 1936. Dénommé « automatique rural », bien qu'il soit en réalité semi-automatique, le système répondait aux espoirs mis en lui, tant que les zones équipées restaient vraiment rurales, c'est-à-dire à faible densité téléphonique et desservies par des lignes aériennes et tant que l'exploitation automatique interurbaine n'était pas introduite au niveau du centre de groupement. Mais, à partir du moment où un centre de groupement était doté d'un autocommutateur établissant des communications interurbaines et où la densité et le trafic téléphonique atteignait un certain volume, le système rural n'était plus justifié.

Quand il devint nécessaire de passer du service semi-automatique au service automatique intégral, il fallut donc reprendre entièrement la constitution des réseaux ruraux et diminuer fortement le nombre de points de commutation.

Certes, la généralisation de l'automatique rural a rendu moins urgente l'automatisation des campagnes, mais, en revanche, elle a retardé notablement l'automatisation intégrale du territoire français.

2.2.8 - Evolution des techniques de transmission du signal vocal

En retraçant l'évolution du téléphone en France depuis ses origines, nous nous sommes surtout attachés à montrer l'importance que représente, pour un réseau téléphonique, le choix des systèmes de commutation, qui correspondent aux nœuds dans un réseau téléphonique. La commutation est, en effet, un élément fondamental de la structure, de la qualité et de l'économie générale d'un réseau téléphonique : c'est, en quelque sorte, l'« industrie lourde » des télécommunications.

Mais, bien entendu, les liens qui permettent de relier entre eux les nœuds du réseau, jouent également un rôle essentiel. Dans un réseau téléphonique filaire ces liens correspondent aux systèmes de transmission. L'évolution des systèmes de transmission, notamment des systèmes à grande distance, joue ainsi aussi un rôle essentiel. C'est grâce aux perfectionnements techniques et technologiques très importants des équipements de transmission que le coût de revient au kilomètre d'une liaison téléphonique à grande distance a pu être abaissé dans des proportions considérables au cours du temps.

On se souvient que l'invention, en 1900, de « bobines de charges » par Pupin avait permis de réduire l'affaiblissement subi par des signaux à fréquences vocales sur les câbles téléphoniques souterrains.

La triode, inventée par Lee de Forest en 1900, et utilisée d'abord en radiotélégraphie, fut une véritable révolution technique, car elle offrait la possibilité de réaliser une véritable amplification des signaux vocaux transmis en ligne. Au début, les amplificateurs insérés sur les lignes de transmission jouèrent un rôle analogue à celui des relais télégraphiques qui « répétaient » les signaux : aussi furent-ils couramment appelés « répéteurs téléphoniques ».

En France, le premier câble souterrain à grande distance fut posé entre Paris et Strasbourg : les travaux débutèrent en 1924 et la mise en service des premiers circuits eut lieu en 1926. Les stations d'amplification étaient distantes de 80 à 120 kilomètres.

Comparés aux circuits aériens, les circuits en câbles présentaient, grâce à leur fort isolement et à l'équilibrage des conducteurs, une grande stabilité de fonctionnement, et un rapport signal/bruit élevé.

La pose des câbles se déroula jusqu'en 1939, à une cadence très régulière, à raison de 700 kilomètres de câbles par an. La technique des « courants porteurs » faisait ainsi son apparition en France.

En 1939, le réseau français comprenait environ 10 000 kilomètres de câbles à grande distance et une centaine de centres d'amplification : ce réseau câblé était constitué essentiellement par 12 artères principales rayonnant à partir de Paris et par quelques câbles sur des itinéraires transversaux tels que Angoulême – Lyon et Bordeaux – Toulouse – Avignon. Les 8 000 circuits interurbains en service à cette date avaient une longueur totale de plus d'un million de kilomètres. En 1974, le nombre de circuits interurbains en France atteignait 160 000, soit 20 fois plus, alors que le nombre d'abonnés principaux était multiplié par moins de 6, ce qui montre l'expansion extraordinaire du trafic interurbain depuis la dernière Guerre mondiale. En 1980, le nombre de circuits interurbains dépassait 500 000, ce qui traduit une croissance moyenne de plus de 20 % par an au cours de cette période.

En conclusion, que constatons-nous en France, au cours de cette période, qui commence au lendemain de la Première Guerre mondiale et s'achève à la fin des années 30 ?

Tout d'abord, une prise de conscience des déficiences de l'équipement téléphonique français qui incite les pouvoirs publics à engager un important plan de redressement et de rénovation, particulièrement efficace à Paris. Ensuite, à partir du milieu des années 30, les conséquences indirectes de la grande crise économique se font sentir ; l'effort d'équipement téléphonique se ralentit et l'insuffisance des moyens financiers conduit à l'adoption de solutions, certes peu coûteuses dans l'immédiat, mais dont les effets pervers se manifesteront à long terme. Le développement excessif de l'« automatique rural » est, à cet égard, très significatif.

De 1880 à 1920 le parc téléphonique français correspondait à 8 % du parc européen. Les actions entreprises après la Première Guerre mondiale ont permis de porter cette proportion à 11 %. Mais, ce ratio baissera à nouveau au lendemain de la Seconde Guerre mondiale et même au cours de la grande période d'expansion des années 60. Il faudra attendre le vigoureux effort de redressement des années 70 pour que le réseau téléphonique français retrouve enfin un rang honorable en Europe.

2.3 – L’invention des radiocommunications

Dans cette sous partie nous allons présenter la découverte des ondes électromagnétiques ainsi que les technologies de télécommunication mises au point grâce à l’utilisation de ces ondes radioélectriques, c’est-à-dire les radiocommunications.

2.3.1 - La découverte des ondes électromagnétiques

L’une des plus grandes découvertes de la fin du siècle dernier et du début de ce siècle, est celle de la propagation des ondes électromagnétiques et de ses applications à la radiotélégraphie, puis à la radiotéléphonie et à la radiodiffusion.

On ne peut évoquer l’immense domaine de la propagation des ondes sans citer les noms de grands savants du 19^{ème} siècle. Tout d’abord, le physicien et ingénieur français Augustin Fresnel (1788 – 1827), dont les célèbres lentilles sont toujours employées dans les phares côtiers. Fresnel entreprit une série d’expériences avec des moyens pourtant fort précaires. En 1818, Fresnel rassemble les résultats de ses recherches et établit que la nature ondulatoire de la lumière est seule capable d’expliquer de façon claire les phénomènes de diffraction, d’interférences, et les fameux anneaux colorés qui apparaissent dans les lames minces. Fresnel démontre aussi que la lumière est composée de vibrations transversales, c’est-à-dire perpendiculaires à la direction de propagation.

Si Fresnel est connu pour ses travaux sur les ondes lumineuses, c’est à Faraday que l’on doit un grand nombre de découvertes fondamentales sur l’électricité. Michael Faraday (1791 – 1867), prenant la suite des travaux d’Ampère et d’Arago en France, et de Oersted au Danemark, il fut un expérimentateur génial. Il découvrit, notamment, en 1831, les lois de l’induction électromagnétique, qui avaient échappé aux autres physiciens par une suite malencontreuse d’erreurs.

Ces lois fondamentales montrent que si un courant électrique produit des effets magnétiques, inversement un aimant peut produire un courant électrique. D’une façon générale, les « lois de Faraday » décrivent comment il est possible d’induire un courant dans un circuit, en déplaçant par rapport à lui un autre circuit également parcouru par un courant. C’est de ce principe que sont sorties toutes les machines électriques, moteurs, dynamos, alternateurs, etc. Faraday a bien d’autres découvertes à son actif, en particulier les lois de l’électrolyse et les interactions entre la lumière polarisée et un champ magnétique (effet Faraday), ce qui semble l’avoir conduit, vers la fin de sa vie, à envisager comme l’avait d’ailleurs imaginé cent ans auparavant Euler, un certain degré de parenté entre le magnétisme et la lumière ; mais Faraday n’alla pas plus loin dans son intuition.

Le relais allait être repris, un certain nombre d’années plus tard, de façon magistrale par un physicien et mathématicien de génie, l’écossais James Clerk Maxwell (1831 – 1879).

Il était définitivement acquis à cette époque, que la lumière était un phénomène ondulatoire. La vitesse des ondes lumineuses avait d’ailleurs pu être mesurée avec un très bon degré de précision ; Foucault avait déjà effectué des mesures sur la vitesse de la lumière en 1850. Maxwell pressentait que le phénomène de la lumière était lié à des phénomènes électriques et magnétiques. Au prix de laborieuses mesures, remarquablement précises pour l’époque, il chercha à déterminer le rapport existant entre deux constantes physiques (constante diélectrique et perméabilité magnétique) qui fixent respectivement l’effet du champ électrique et celui du champ magnétique. Il trouva, aux erreurs de mesure près, que ce rapport était égal à la vitesse de la lumière.

Dès lors Maxwell put en conclure que ces deux champs, électrique et magnétique, représentaient les deux constituants de la lumière. En 1864, Maxwell fit une communication devant la Royal Society et exposa les bases de sa « théorie sur l’électricité et le magnétisme ».

La théorie de Maxwell, résumée dans quatre équations célèbres, d'une admirable simplicité, apparut alors aussi révolutionnaire que devait l'être 40 ans plus tard, la théorie de la relativité d'Einstein. En 1873, Maxwell³⁵ publia son *Traité sur l'électricité et le magnétisme*. Louis de Broglie écrivit, en 1954, lors du soixantenaire de l'École Supérieure d'Électricité : « Et puis vint James Clerk Maxwell qui, de 1860 à 1875, réunira toutes les lois connues de l'électromagnétisme dans une vaste synthèse qui porte son nom, la Théorie de Maxwell, et, par une intuition géniale, fera rentrer tous les phénomènes lumineux, toute l'optique, dans le cadre de l'électromagnétisme. Cette merveilleuse fusion de deux domaines de la physique jusqu'alors totalement séparés, fusion qui va permettre quelques années plus tard de comprendre la nature des ondes hertziennes et le rôle de l'électricité à l'échelle atomique, constitue le couronnement d'une épopée qui, en moins d'un siècle, de Coulomb à Maxwell, avait conduit les physiciens à la connaissance de toutes les lois macroscopiques de l'électricité et du magnétisme. »

La confirmation expérimentale de la Théorie de Maxwell ne vint que 23 ans plus tard, le jour où un professeur de physique de Karlsruhe, Heinrich Rudolf Hertz, réussit à produire et à détecter des ondes électromagnétiques. Hertz écrivait à Helmholtz, en 1887 : « Je viens d'accomplir un nouveau pas en avant qui établit, à mon sens, de façon durable le lien entre la lumière et l'électricité. Il me tarde de vous en faire part. »

Cette lettre peut être considérée comme l'acte de naissance des « ondes hertziennes ».

Mais, si son mérite est éclatant comme père incontesté des ondes qui portent désormais son nom, Hertz n'eut pas l'idée de les employer comme moyen de communication.

2.3.2 – L'invention de la télégraphie sans fil

Lorsque l'on évoque l'invention de la télégraphie sans fil, la TSF, on pense surtout aux travaux d'Edouard Branly en France, d'Aleksandr Popov en Russie et, bien entendu, à ceux de Guglielmo Marconi en Italie et en Grande-Bretagne.

C'est à Marconi (1874 – 1937) que revient, sans conteste, le mérite d'avoir été le véritable promoteur de la télégraphie sans fil. Il reçut d'ailleurs, pour ses travaux le prix Nobel de physique en 1909.

Guglielmo Marconi avait été instruit en Italie par des précepteurs, il s'intéressait surtout aux sciences et à la musique. En 1895, à l'âge de 21 ans, il commença à faire des expériences : il avait eu l'idée que l'on pourrait établir des transmissions au moyen des ondes hertziennes en les manipulant selon les points et les traits de l'alphabet Morse. En 1896, Marconi quitte l'Italie pour aller à Londres exploiter son invention. Fin 1896 et début 1897, Marconi effectue un certain nombre d'expériences : avec une antenne montée sur un cerf-volant, à Salisbury Plain, il réalise une transmission sur 7 kilomètres ; en mai 1897, des essais sont effectués au-dessus de l'eau (le canal de Bristol), sur une distance de l'ordre de 15 kilomètres.

Marconi, ce jeune homme d'allure romantique, au regard rêveur, se révéla non seulement un brillant inventeur mais aussi un homme d'action remarquable et un homme d'affaires avisé. Il avait une très grande foi dans les possibilités d'avenir de la télégraphie sans fil et n'hésita pas à fonder, dès 1897, à Londres, la Wireless Telegraph and Signal Company qui devait, à partir de 1900, connaître un grand développement et détenir pratiquement un monopole dans ce secteur en Grande-Bretagne et au Canada.

Une date importante à rappeler est celle du 12 décembre 1901 : ce jour-là, à Terre-Neuve, Marconi et son assistant entendirent les trois points de la lettre S en Morse ; le signal avait traversé l'Atlantique par télégraphie depuis Poldhu, en Cornouailles.

C'est dans ce domaine des liaisons maritimes que la TSF connut les développements les plus rapides. A partir de 1900 les armateurs commencèrent à équiper leurs bateaux ; Marconi ne se

³⁵ Equations de Maxwell : confère Deuxième Partie.

contenta plus de fabriquer et de vendre du matériel, il édifia ses propres stations d'émission et plaça ses propres opérateurs à bord des navires dotés d'équipements de sa fabrication.

Dans les premiers temps de la TSF, les ondes utilisées étaient des ondes longues et c'est la propagation par trajet direct de ces ondes y était mise en œuvre ; mais, pour obtenir des transmissions à grande distance, des puissances d'émission considérables étaient nécessaires et la transmission des signaux téléphoniques paraissait même impossible à cette époque. Un premier essai de transmission radiotéléphonique entre la Grande-Bretagne et les Etats-Unis eut lieu en 1923 : l'émetteur de la Western Electric ne comportait pas moins de 20 tubes de 10 kilowatts en parallèle ; la longueur d'onde utilisée était de l'ordre de 5 000 mètres !

2.3.3 - La découverte de l'ionosphère

Une découverte relative à la propagation des ondes courtes allait révolutionner les télécommunications intercontinentales et permettre le développement de la radiotéléphonie à très grande distance. Les premières communications transatlantiques réalisées par Marconi révélèrent, en effet, que la propagation des ondes longues autour de la terre était bien meilleure que ne les laissaient prévoir toutes les théories de la diffraction autour d'une sphère isolée.

En 1902, Olivier Heaviside, en Angleterre, et Kennelly, aux Etats-Unis, suggérèrent que les ondes pouvaient contourner la terre par réflexion sur des couches ionisées de la très haute atmosphère. Cette hypothèse fut défendue en France par André Blondel (1903) et Henri Poincaré (1904). Ces couches, dont l'existence fut démontrée quelques années plus tard, forment des nappes ionisées entre 80 et 400 kilomètres d'altitude ; elles constituent ce que l'on appelle l'« ionosphère ». Leur hauteur et leur densité varient constamment en fonction de la position du soleil. Des variations saisonnières³⁶ ont aussi été mises en évidence.

La connaissance de l'ionosphère et des conditions de propagation des « ondes courtes » ou « ondes décamétriques » rendirent possibles, après la Première Guerre mondiale, un développement rapide des communications radiotéléphoniques à très grande distance. Ce n'est qu'avec l'apparition des câbles sous-marins à amplificateurs immergés, en 1956, puis des télécommunications par satellites, en 1962, que de nouveaux et puissants moyens de communication à très grande distance viendront relayer les transmissions par « ondes courtes ».

2.3.4 - L'invention de la triode

L'évènement fondamental qui a permis à la radiotélégraphie puis à la radiotéléphonie et aux télécommunications en général de se développer de manière prodigieuse, c'est l'apparition, au début de ce siècle, de ce que l'on appellera par la suite « l'électronique ».

A la fin du siècle dernier, en 1884, Edison qui étudiait les lampes à incandescence avait déjà mis en évidence l'effet thermoélectrique. On notera que cet « effet Edison » avait été étudié dès 1879 par Hittorf, physicien allemand auteur de la découverte des rayons cathodiques. Ce n'est toutefois qu'en 1901 que Richardson démontra que cet effet était dû à l'émission de corpuscules négatifs identifiés depuis sous le terme « électrons ».

La première application pratique est due à John Ambrose Fleming, qui était professeur d'électrotechnique à l'University College de Londres et conseiller scientifique de la Compagnie Marconi. Fleming travaillait sur « l'effet Edison » et s'aperçut qu'un tube à vide

³⁶ Les variations saisonnières : l'influence des taches solaires et des grands bouleversements de la haute atmosphère est maintenant assez bien connue et des « prévisions ionosphériques » peuvent être effectuées. Ces prévisions sont confiées à un ensemble de stations, réparties sur tout le globe terrestre, qui effectuent régulièrement des « sondages » à l'aide d'émetteurs à impulsions.

composé de deux électrodes, un filament chauffé et une plaque, permettait de détecter les ondes électromagnétiques. En 1904, il déposa le brevet de la première lampe à deux électrodes, ou diode. Mais, c'est deux ans plus tard, en 1906, que l'étape décisive est franchie, avec l'invention, par l'ingénieur américain Lee de Forest, de la lampe à trois électrodes, ou triode. Le brevet de la triode, déposé en 1906, fut délivré le 15 février 1907. C'est une date mémorable, car elle marque, en fait, le début de l'ère de l'électronique.

Lee de Forest, avec sa « bouteille de verre pleine de rien », a sans doute contribué plus que tout autre au développement rapide de la radio et de l'électronique. Vers le milieu du 20^{ème} siècle on fabriquait dans le monde plus de 200 millions de « tubes de radio » par an. La triode ne servit pas seulement à amplifier les signaux de faible intensité arrivant au récepteur, mais, combinée avec un oscillateur, comme le fit l'ingénieur français A. Meissner en 1913, elle commençait à remplacer l'arc des « émetteurs à étincelles » comme générateur d'ondes entretenues.

Pendant 50 ans, la triode, puis la pentode et tous les « tubes à vide » en général, allaient régner souverainement sur le domaine de l'électronique et des télécommunications. Ce n'est qu'en 1948 que commença une ère nouvelle avec l'invention du transistor et le développement de l'électronique que nous utilisons actuellement.

2.3.5 – Le développement des radiocommunications durant la première moitié du 20^{ème} siècle

Après l'avènement et le développement des télécommunications par fil au cours de la seconde moitié du 19^{ème} siècle, l'apparition de la radiotélégraphie, puis l'essor des radiocommunications, constituent l'un des faits marquants du début du 20^{ème} siècle. Là aussi, le développement de la coopération internationale a été remarquable en temps de paix ; mais les radiocommunications ont été, en outre, un moyen essentiel de télécommunication en temps de guerre. Comme en télégraphie, la coopération et la réglementation internationale en matière de radiocommunications se révélèrent rapidement nécessaires, d'autant plus qu'en radiotélégraphie se posait la question du brouillage entre émissions radioélectriques. Ces brouillages étaient le plus souvent involontaires. La conférence radiotélégraphique internationale qui se réunit à Washington en 1927 permis d'entériner la Convention radiotélégraphique internationale, où était indiqués les droits et les devoirs de chaque pays en matière de télécommunications (fréquence, puissance des émetteurs, localisation des antennes, etc.). Avant 1932, il existait deux entités juridiques différentes en matière de télécommunication, la Conférence internationale télégraphique et la Conférence internationale radiotélégraphique. En 1932, ces deux conférences fusionnèrent pour constituer l'Union Internationale des Télécommunications, l'IUT³⁷, qui existe encore de nos jours.

Trois progrès scientifiques importants avaient été réalisés en 30 ans de recherche dans le domaine des radiocommunications : le plus important était la diffusion, et non plus seulement la transmission d'un point à un autre, de messages par radio ; les deux autres étaient le développement des liaisons avec les avions en vol et l'extension du spectre des fréquences aux ondes courtes (fréquences supérieures à 3 mégahertz).

2.3.5.1 - Le développement de la radiodiffusion sonore en France

On ne peut parler des inventions du début du 20^{ème} siècle, qui a vu le développement de la télégraphie militaire, de la TSF, puis de la radiodiffusion sonore, sans évoquer le général Gustave Ferrié (1868 – 1932) qui porta le télégraphe militaire français au premier rang dans le monde et qui contribua pour une large part au développement de la Radio en France. Même

³⁷ IUT : confère Lexique.

après la fin de la guerre, il chercha à maintenir et à élargir les liens qui s'étaient noués entre les équipes de radioélectriciens au cours des années précédentes.

Les grands problèmes de la propagation des ondes radio nécessitaient, en outre, la création d'organisations étendant leur action sur le monde entier. C'est pourquoi le général Ferrié créa l'Union de Radiotélégraphie Scientifique Internationale (URSI).

On ne peut évoquer l'œuvre du général Ferrié sans souligner aussi l'importance prise par le poste de TSF de la Tour Eiffel. En décembre 1903, M. Eiffel avait proposé de mettre la tour à la disposition du Génie militaire comme support d'antenne. Le poste de la tour Eiffel, à l'origine pauvrement équipé, fut alors transformé en station permanente de grande puissance ; il deviendra le porte-drapeau de la TSF française pendant 30 ans. Après la guerre, le général Ferrié installa, en février 1922, un studio provisoire dans le pilier Nord de la tour ; c'est ainsi que débutèrent les premières émissions régulières de radiodiffusion en France.

Au plan de la technique, la Première Guerre mondiale avait provoqué un développement industriel extraordinaire des « lampes de TSF » et des équipements de radiotélégraphie. Des sommes importantes et une énergie considérable avaient été dépensées pendant la guerre pour la TSF. Après l'armistice, tous les éléments étaient en place pour l'avènement de la radiodiffusion. En Grande-Bretagne, la BBC commença en novembre 1922 à émettre des programmes quotidiens à partir de sa station de Londres ; en France, après quelques premières expériences faites en 1921, c'est aussi en 1922 que commencèrent les premières émissions régulières de la tour Eiffel. Le nombre de stations de radiodiffusion devait croître ensuite très rapidement : en 1927, on comptait déjà plus de 700 stations de radiodiffusion sur le seul territoire des Etats-Unis.

2.3.5.2 - Le développement du radar

Si la Première Guerre mondiale avait accéléré le développement de la TSF et préparé celui de la radiodiffusion, les progrès techniques et technologiques que suscita la Seconde Guerre mondiale sont à l'origine d'une mutation encore plus grande. C'est, en particulier, le cas du radar dont la mise au point technique et le développement auront, par la suite, des répercussions importantes dans le domaine des applications civiles (développement des faisceaux hertziens pour les télécommunications, apparition de nouveaux systèmes de navigation, perfectionnement de la télévision, etc.).

L'idée de détecter des obstacles par des moyens radioélectriques fut étudiée en France à partir de 1934. Le Laboratoire national de radioélectricité expérimenta ce que l'on appellera les « barrages David » du nom de son inventeur, Pierre David, spécialiste bien connu des transmissions radioélectriques. Ces « barrages » firent l'objet de premières expériences au Bourget pendant l'été 1934 ; ils permettaient alors de détecter des avions à 7 ou 8 kilomètres de distance. Ils avaient pris une certaine extension en France à la veille de la guerre.

Des radars à impulsion en ondes métriques furent expérimentés en France avant 1940 : en 1938, la Marine française demanda aux laboratoires de la société Le Matériel Téléphonique (LMT) d'étudier et de réaliser un dispositif de détection à grande portée. Un émetteur fonctionnant en ondes métriques, à 50 mégahertz, et pouvant délivrer des impulsions de 500 kilowatts de puissance de crête, fut effectivement réalisé et installé, au début de 1940, dans l'île de Port Cros ; mais, du fait de la guerre, il n'eut qu'une existence éphémère. C'est à la même époque qu'un ingénieur français de LMT, Paul Gloess, qui fut par la suite ingénieur du Centre National d'Etudes des Télécommunications (CNET), conçut en laboratoire le dispositif à oscilloscope cathodique qui, sous le nom de PPI (*Plan Position Indicator*), devint le procédé classique de représentation des échos radar.

En Grande-Bretagne, c'est également vers la même époque, en janvier 1935, que le gouvernement demanda à Sir Robert Watson-Watt, alors chef du département radio du National Physical Laboratory, d'effectuer des recherches en radiodétection à des fins

militaires. Watt déclara alors qu'on pourrait avoir intérêt à mettre au point le repérage des avions à distance grâce aux ondes radioélectriques. Cette suggestion fut bien accueillie et le gouvernement britannique fit installer des laboratoires secrets sur la côte Est de l'Angleterre, où des recherches furent entreprises dans la bande des 30 mégahertz (10 mètres de longueur d'onde).

Ainsi naquit le radar (le mot « radar » est l'abréviation du terme *Radio Detection And Ranging*). En 1939, les radars anglais pouvaient détecter un avion, volant à 3 000 mètres d'altitude, à une distance de 150 kilomètres. A cette même date, le Microwave Committee des Etats-Unis recommandait l'emploi des ondes centimétriques pour la détection des obstacles. L'ère du radar commençait. Après la guerre, les applications civiles du radar se développèrent rapidement ; depuis, ce système de détection et de localisation est devenu l'un des piliers de la sécurité des transports maritimes, terrestres et aériens.

2.3.5.3 - Le développement de la télévision

La télévision a subi une éclipse pendant la guerre de 39-45. Pourtant ses débuts avaient été prometteurs. En Grande-Bretagne, Baird avait mis au point un dispositif de télévision à analyse mécanique utilisant le disque de Nipkov et la BBC l'avait adopté, dès 1929, pour ses premières émissions expérimentales.

En France, Barthélemy réalisa, en 1928, à la Compagnie des compteurs, une caméra à 30 lignes avec un récepteur à disque perforé et une lampe au néon.

Mais, là aussi, l'électronique devait triompher ; le mérite en revient à un ingénieur électronicien d'origine russe, Vladimir Kosma Zworykin, travaillant aux Etats-Unis. En 1934, Zworykin réalisa le premier « iconoscope » ; des émissions expérimentales de télévision à haute définition commencèrent alors dans différents pays, notamment, en France, en Grande-Bretagne, aux Etats-Unis, en Allemagne, en Italie, en URSS et au Japon.

En France, c'est Georges Mandel, alors ministre des PTT, qui fit installer, en 1934, le premier studio de télévision. La définition des images était de 180 lignes ; ce studio, installé rue de Grenelle, était relié par câble à un émetteur, situé sur la tour Eiffel. Cet émetteur demeura en service jusqu'en 1938, puis fut remplacé par un émetteur très puissant (30 kilowatts). Construit par LMT, cet émetteur était, à cette époque le plus puissant du monde. Tout était prêt pour que la télévision prenne son essor après la fin de la Seconde Guerre mondiale.

L'essor et le succès prodigieux de la télévision dans le monde, constituent, sans aucun doute, l'un des événements les plus importants de l'histoire des communications. On notera, à ce sujet, que cet essor n'a été possible que grâce à la découverte des radiocommunications. Certes, aujourd'hui, dans un certain nombre de pays, la télévision par câble occupe une place de plus en plus importante, mais, elle est fortement concurrencée par la télévision par satellite et depuis 2005 en France par la Télévision Numérique Terrestre, la TNT.

D'une manière générale, on peut dire que radiocommunications et télécommunications par fil ont progressé ensemble, depuis le début du siècle, en s'épaulant mutuellement. Il s'agit donc plus de complémentarité que de concurrence entre ces deux grands moyens de communication.

Complémentarité au niveau des services procurés : c'est une évidence d'affirmer que sans les radiocommunications il n'y aurait pas de télécommunications avec les mobiles (GSM, UMTS, etc.) ; il est également certain, que la diffusion sonore et la télévision n'auraient pas atteint le niveau des « mass médias » sans l'utilisation de la propagation radioélectrique.

Cette complémentarité se retrouve aussi dans le domaine des télécommunications entre stations fixes. Faisceaux hertziens et câbles souterrains se partagent désormais l'écoulement du trafic à grande distance. De même, câbles sous-marins et satellites assurent ensemble l'essentiel des liaisons intercontinentales.

2.4 – Le renouveau des télécommunications après 1945

Dans cette sous partie nous allons présenter la reprise du développement des télécommunications durant les quinze premières années après la Seconde Guerre mondiale. Cette période charnière fut marquée par l'apparition de nouvelles technologies de télécommunication.

2.4.1 – Evolution des télécommunications durant la Seconde Guerre mondiale

La guerre avait pratiquement arrêter l'expansion du téléphone dans le monde entier, sauf en Amérique du Nord et dans quelques pays neutres. De 1939 à 1946 la croissance du nombre de postes téléphoniques sera de 40 % en Amérique du Nord. On constatera une forte diminution du nombre de postes téléphoniques en service dans les pays les plus gravement touchés par les destructions de guerre : Allemagne, Pays de l'Est, Japon, etc. On constatera au contraire une forte croissance du nombre de postes téléphoniques dans les pays neutres : 43 % en Suisse et 55 % en Suède. Même en France, les raccordements se poursuivront et l'accroissement du nombre de postes téléphoniques de toute nature sera de 20 %.

On connaît les progrès techniques et technologiques remarquables de l'électronique pendant la guerre, en Grande-Bretagne et aux Etats-Unis. Mais, il serait injuste de ne pas mentionner ce qui a été fait en France à la même époque, malgré l'occupation ennemie.

Les laboratoires français, en effet, parvenaient à mener, dans une semi clandestinité, des recherches, notamment dans quelques domaines de pointe tels que les ondes décimétriques, la télévision à très haute définition, le radioguidage et le radar.

Les laboratoires de l'administration des PTT, eux aussi, poursuivaient les études déjà engagées sur les systèmes de transmission à grande distance par courants porteurs et sur un nouveau système « d'autocommutateurs SRCT ».

La reconstruction des branches du réseau téléphonique et télégraphique français détruites ou endommagées pendant la guerre commença dès la Libération. Grâce à l'effort soutenu de son personnel, techniciens et ingénieurs, l'administration des PTT parvint à remettre en état très rapidement son réseau interurbain, mais des travaux importants durent être effectués dans les centraux téléphoniques, détruits ou très saturés.

2.4.2 – L'invention du transistor

C'est en 1947 que fut inventé le transistor par trois chercheurs américains du Bell Telephone Laboratories : John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley.

Le transistor fut présenté pour la première fois en public par le Bell Telephone Laboratories de New York en 1948. Il s'agissait alors d'un transistor à pointes au germanium. Trois ans plus tard, William Shockley découvrit le transistor à jonction qui allait révolutionner toute la technique de l'informatique, des télécommunications et de l'électronique en général. De même que la première moitié du 20^{ème} siècle avait été dominée par l'invention de la triode, en 1906, par Lee de Forest, et par la génération des « tubes radio » qui en dérivait, de même la seconde moitié du 20^{ème} siècle sera dominée par le transistor et par tous les dispositifs à semi-conducteurs de plus en plus complexes et de plus en plus performants qui apparaîtront progressivement sur le marché et qui modifieront profondément toutes les techniques électroniques. Mais il faudra presque une dizaine d'années pour que l'on prenne conscience de l'importance de cette découverte, son utilisation systématique ne commencera, en effet, qu'en 1955, lorsque les Bell Telephone Laboratories mettront au point le « transistor à base

diffusée ». En 1956, Bardeen, Brattain et Shockley recevront le prix Nobel de physique pour cette découverte.

La période d'après-guerre a été marquée, en télécommunication par un maintien de la croissance aux Etats-Unis, par une croissance rapide et régulière de l'Europe et par une ascension fulgurante du Japon qui a réussi à tenir, pendant un quart de siècle, le rythme de croissance, le plus rapide qu'un pays ait jamais connu sur une période aussi longue. En 1975, l'Amérique du Nord, l'Europe et le Japon rassemblaient 90 % du parc téléphonique mondial.

2.4.3 – Mise en place de nouveaux systèmes de commutation

2.4.3.1 – Développement de nouveaux systèmes de commutation automatiques

Tout réseau de télécommunication comprend trois types d'équipement : les appareils terminaux du réseau (postes téléphoniques ou équipements terminaux pour les réseaux télex ou de transmission de données), les centres de commutation (centres locaux, urbains, interurbains, de transit), les lignes de transmission et leurs équipements (lignes d'abonnés, câbles ou faisceaux hertziens interurbains, équipements associés). Le poste téléphonique est, en quelque sorte, la partie visible de cet immense iceberg que constitue un réseau de télécommunications. A ce titre, il mérite beaucoup d'attention, car c'est le point de contact entre l'administration et ses clients et, par conséquent, l'un des éléments importants de l'image de marque du service téléphonique. Toutefois, l'essentiel des problèmes d'un réseau de télécommunications réside dans la transmission des signaux, à courte ou à grande distance, et dans l'acheminement des communications par le moyen des centres de commutation.

Après la Seconde Guerre mondiale, tandis que se déroulait l'automatisation de la région parisienne en système Rotary, l'administration des PTT commençait à équiper les zones rurales avec un système seulement semi-automatique, plus connu sous le nom « d'automatique rural ». Mais ce système avait ses limites. Des études menées par le Service de Recherches et du Contrôle des PTT (SRCT), aboutirent à la réalisation, en 1950, d'un premier « autocommutateur », c'est-à-dire un commutateur automatique, capable d'équiper de nombreux groupements ruraux dans de bonnes conditions techniques et économiques. Mais en 1961, soit 10 ans après la naissance des autocommutateurs, le nombre d'abonnés ruraux bénéficiant de l'automatique intégral atteignait à peine 80 000. En revanche, l'automatique rural, qui n'exigeait que des investissements assez réduits, se développait rapidement. Mais l'automatique rural, avec ses petits autocommutateurs installés dans des bureaux de poste, conduisit à une véritable prolifération des « points de commutation » sur le territoire français, soit près de 30 000 en 1948 ! Le problème des zones rurales ne constituait à la Libération qu'un problème parmi d'autres. Il fallait aussi adopter, pour les villes moyennes de province, un système normalisé.

Malgré les économies réalisées grâce aux autocommutateurs, le programme proposé par l'administration des PTT, mais non retenu par le « Plan de modernisation et d'équipement » mis en place par l'Etat français au lendemain de la guerre, eut le même sort dans la région parisienne qu'en province. De 1955 à 1963 inclus, le nombre de lignes d'abonnés installées dans les zones urbaine et suburbaine de Paris n'a été que de 35 000 par an environ, avec une pointe à 42 000 lignes en 1959. On ne retrouva pas le niveau de production des années 30, qui avait atteint alors près de 70 000 lignes en 1932.

La téléphonie automatique avait d'abord été réservée aux communications entre abonnés d'une même agglomération. L'établissement de communications interurbaines nécessitait toujours l'intervention de deux opératrices au moins : l'une au central de départ, l'autre au central d'arrivée. L'établissement intégralement automatique des communications posait des

problèmes nombreux et complexes : signalisation entre centraux, information de l'abonné demandeur, plan de numérotage régional et national, taxation... C'est pourquoi, jusque vers 1950, l'exploitation interurbaine automatique ne fut mise en œuvre que dans un petit nombre de pays (Suisse, Belgique) ou dans des zones limitées (Bavière, Côte d'azur). De grands pays, comme les Etats-Unis et la Grande-Bretagne, y étaient opposés, préférant l'interurbain semi-automatique où les opératrices de départ établissaient et taxaient les communications.

En France, la généralisation des systèmes « à courants porteurs » permit de mettre en œuvre d'autres méthodes. Dès lors, avec une avance de plusieurs années sur les Etats-Unis et la Grande-Bretagne, la France allait ouvrir l'ère de « l'interurbain automatique ». L'administration française a été la première, en novembre 1951, à automatiser entièrement une liaison aussi importante que Paris – Lyon, soit plus de 50 circuits sur 550 kilomètres. Puis, ce fut l'automatisation d'une grande liaison par câble coaxial (Paris – Toulouse). On utilisa, pour cela, le câble mis en service en 1947.

Hélas, si les dispositions techniques étaient satisfaisantes, la cadence de développement de tous ces équipements et circuits souffrait des limitations budgétaires. En fait, si l'administration française des PTT disposait des moyens techniques nécessaires, ce n'est qu'avec le cinquième et le sixième Plan qu'elle parviendra à obtenir de l'Etat les moyens financiers qui lui permettront de développer l'automatisation du trafic interurbain et de construire les « centres de transit régionaux » (CTR) indispensables à la modernisation du réseau de télécommunication français.

Quelques années plus tard, la généralisation de l'exploitation interurbaine automatique au plan national amenait l'administration française à se préoccuper d'un plan de numérotage. Un plan à 8 chiffres fut arrêté en 1955. Ce plan de numérotage national demeura valable pendant une trentaine d'années. Il ne sera remanié qu'au début des années 80.

2.4.3.2 – Développement de nouveaux centraux téléphoniques : les systèmes CROSSBAR

Au début des années 50, les télécommunications françaises disposaient de moyens techniques modernes, tout au moins en transmission, car, en commutation, le problème de l'adoption d'un nouveau système devait bientôt se poser ; il apparaissait, en effet, que le système « L 43 » avait des possibilités limitées et que le Rotary « 7 B I » ne pouvait être généralisé.

Une mission d'ingénieurs français se rendit en Suède, à la fin de l'année 1949, puis, quelques mois après aux Etats-Unis. Les ingénieurs français firent alors connaissance avec ce que l'on appelait le matériel « crossbar » ; dans ce matériel, sans organes rotatifs, la connexion s'effectue en actionnant une barre horizontale de sélection correspondant à une ligne puis une barre verticale correspondant à une autre ligne, afin d'assurer au point de croisement de ces deux barres les contacts nécessaires entre les deux lignes (d'où le nom de « crossbar » ou « barres croisées »).

Le principe de la connexion crossbar a été inventé en 1913 par l'américain J. N. Reynolds, puis repris en 1917 par le suédois Betulander. En 1949 qu'un premier central urbain de type crossbar fut construit dans la ville de Malmö en Suède ; aux Etats-Unis, à la même époque, les multisélecteurs crossbar étaient déjà fabriqués industriellement ; toutefois, leur utilisation n'était pas encore complètement maîtrisée.

En France, les PTT commandèrent, en 1954, un premier central de 2 000 lignes, qui fut mis en service en juillet 1955 à Melun. Parallèlement, la société française des téléphones Ericsson mettait au point un système crossbar, dit CP 400, qui utilisait un multisélecteur suédois adapté aux besoins français. Le premier central CP 400 entra en service, à Beauvais, en mars 1956.

2.4.4 – Développement des liaisons à grande distance en France

2.4.4.1 – Réseau de lignes à grande distance par câbles (les câbles coaxiaux)

Pendant la guerre, surtout en 1944, le réseau interurbain subit des dégâts importants. A la Libération, on comptait 2 000 coupures et, sur 130 centres principaux, 45 étaient entièrement détruits ou avaient leur gros œuvre fortement endommagé ; les 85 autres avaient également subi des dégâts. Au début de cette période et jusqu'en 1948, la tâche du Service des lignes à grande distance consista essentiellement à remettre en l'état l'ensemble du réseau. En ce qui concerne les câbles, il fallait rétablir leur continuité, reprendre leur « équilibrage » pour permettre la reprise de l'exploitation du réseau câblé.

Grâce au dévouement du personnel et à l'organisation méthodique des travaux, cinq mois après la libération de Paris, 90 % des circuits de 1939 étaient rétablis, mais la longueur totale de ces circuits ne représentait encore que 60 % de celle d'avant-guerre.

Mais l'événement le plus marquant de cette époque fut la mise en service du premier câble coaxial du réseau français. C'est à la veille de la guerre qu'avait été entreprise la pose d'un câble coaxial de gros diamètre (5/18 mm), prévu pour 600 voies téléphoniques, sur l'itinéraire Paris – Toulouse – Bordeaux. Mais les hostilités entraînèrent l'arrêt des travaux ; ce n'est qu'en 1947 que la première liaison Paris – Toulouse par câble coaxial sera effectivement mise en service.

En fait, c'est seulement à partir de 1950 que l'administration française s'engagera résolument dans le développement des artères à grande distance par câbles coaxiaux. Le premier câble coaxial, conforme aux nouvelles recommandations du CCITT sera posé entre Lyon et Grenoble. A partir du second semestre de l'année 1954, le rythme des travaux s'accélère et le réseau français de câbles coaxiaux se développe très rapidement jusqu'en 1955, grâce aux programmes d'infrastructure financés par l'OTAN. Au cours de l'année 1954, on posera 1400 kilomètres de câbles ; mais il faudra attendre près de 20 ans (1972) pour retrouver cette cadence.

L'utilisation généralisée des câbles coaxiaux pour les liaisons à grande distance constitue, dans le domaine de la transmission, l'événement le plus important de cette période d'après-guerre.

2.4.4.2 – Réseau de liaisons à grande distance par ondes radioélectriques (faisceaux hertziens)

En France, malgré la guerre et l'occupation, les chercheurs ne restèrent pas inactifs : ainsi, des études entreprises au Laboratoire Central des Télécommunications conduisirent à la réalisation, dès 1944, d'un équipement de faisceau hertzien³⁸ tout à fait remarquable pour l'époque. Une liaison expérimentale fut établie par le Service des recherches et du contrôle technique des PTT entre Paris et Montmorency.

Une première liaison par faisceau hertzien est mise en exploitation, en 1947, entre Calenzana, en Corse, et Grasse, sur la Côte d'Azur. A cause de la grande distance à couvrir (plus de 200 kilomètres) et d'une zone de non visibilité importante à franchir (50 kilomètres), les longueurs d'onde utilisées étaient relativement longues, de l'ordre de 3 mètres.

Une liaison plus importante est mise en service, entre Dijon et Strasbourg, à la fin de l'année 1951. Cette liaison comportait quatre stations : une station terminale au Mont Afrique, près de

³⁸ Le faisceau hertzien mis au point en 1944 : c'était un système à 12 voies téléphoniques, à modulation de fréquence, utilisant un tube à « modulation de vitesse » fonctionnant dans la gamme 9-10 centimètres et délivrant une puissance importante : 20 à 30 watts.

Dijon, deux stations relais, l'une à Montfaucon près de Besançon, l'autre au sommet du Grand Ballon de Guebwiller, à 1400 mètres d'altitude, et une station terminale à Strasbourg. La liaison Dijon-Strasbourg, fut inaugurée officiellement le 23 février 1952.

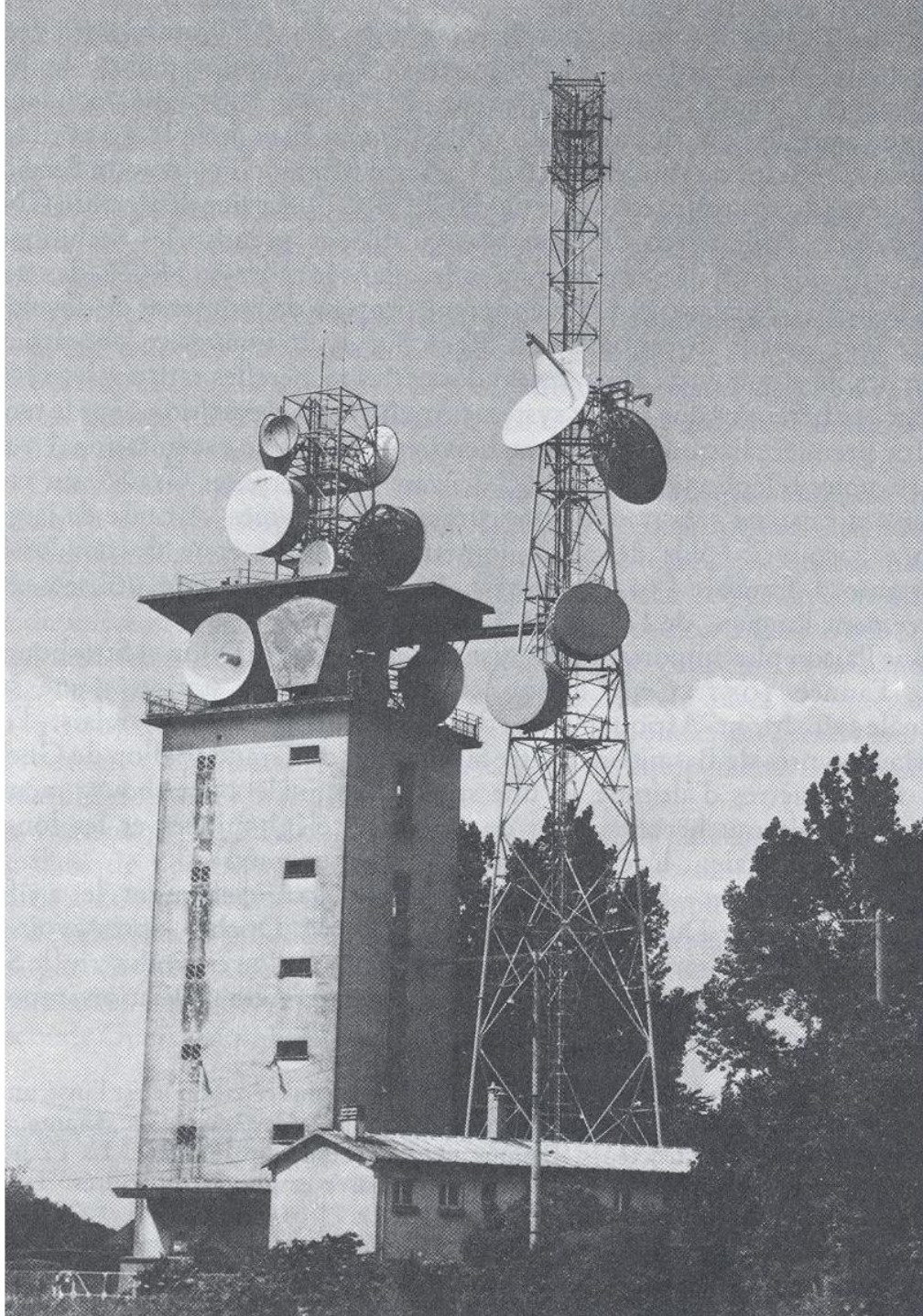
C'est également à la même époque, en 1951, qu'est installé, en France, le premier faisceau hertzien de télévision, mis en service par la Radiodiffusion-Télévision française, entre Paris et Lille. Mais le véritable point de départ du réseau de faisceaux hertziens français se situe en 1950, lorsque est décidé la réalisation, sur les principaux axes stratégiques partant de Paris, de faisceaux hertziens à grande capacité, en ondes centimétriques. Comme pour les câbles coaxiaux, le financement fut assuré en grande partie, à cette époque, par les crédits de l'OTAN. L'équipe de faisceaux hertziens du CNET fut chargée des études et de la mise en exploitation des premières grandes liaisons. La première liaison expérimentale, réalisée avec ce système, dit GDH 101 (grande Distance Hertzien), fut établie et essayée en juin et juillet 1951. Le planning de réalisation de la liaison Paris – Lille était très serré, car les administrations française et anglaise des PTT et de Radiodiffusion et Télévision avaient mis sur pied un projet ambitieux de liaison de télévision Londres – Paris. L'objectif était de transmettre de Londres à Paris les images de la cérémonie du couronnement de la reine d'Angleterre. Les délais furent tenus et, le 2 juin 1953, les images du couronnement d'Elisabeth II parvinrent parfaitement à Paris. La construction du faisceau hertzien Paris – Strasbourg fut menée, elle aussi, rapidement : la mise en service eut lieu en décembre 1953. L'année suivante, c'était Paris – Lyon, liaison qui fut prolongée en décembre 1954 jusqu'à Marseille. Ainsi, ces trois grandes artères de faisceaux hertziens avaient été mises en place en moins de deux ans.

2.4.5 – Développement du réseau Téléx en France

Créé par décret en 1946, le réseau téléx français ne comportait encore que 55 abonnés privés à la fin de 1948, répartis sur quatre centres de commutation manuels (Paris, Lyon, Marseille et Bordeaux). En 1950, vinrent s'ajouter à ces centres Lille et Nancy. Le nombre d'abonnés privés passa alors à 110. En 1955, le nombre d'abonnés était encore modeste, 750, tandis qu'à la même date, en Allemagne fédérale, il atteignait déjà 16 000 ! En revanche, en Grande-Bretagne, il n'y avait, à la même époque, que 2 500 abonnés. La France comblera peu à peu son retard par rapport à la Grande-Bretagne, puisque, à la fin de 1975, les densités en abonnements principaux téléx étaient très sensiblement les mêmes dans les deux pays (un poste principal pour 1 000 habitants). Au contraire, l'Allemagne fédérale consolidera son avance, non seulement en Europe, mais même dans le monde, son réseau téléx étant, à lui seul, presque aussi important que celui des Etats-Unis.

Telles sont les techniques de transmission et de commutation sur lesquelles a reposé le développement du réseau français de télécommunications au cours des années 50. Certaines étaient apparues dans d'autres pays avant la guerre (câbles coaxiaux, systèmes crossbar), d'autres étaient nées de la guerre (faisceaux hertziens). Mais, sur le plan technologique, aucune véritable révolution ne s'était produite depuis le début de l'ère de l'électronique. Pourtant, l'événement fondamental qui devait marquer le début d'une ère nouvelle, l'invention du transistor, date du début des années 50. Mais ces découvertes sont encore trop récentes, pour modifier profondément les techniques utilisées dans les années 50. C'est au cours de la décennie suivante que l'on pourra réellement mesurer l'ampleur de ce bouleversement technologique, dont les répercussions seront immenses en informatique et en télécommunications.

Au niveau territorial le développement des réseaux de télécommunication a suivi une évolution différente à Paris et en province : on constate un centralisme des équipements et des réseaux de télécommunication de pointe sur Paris ; alors qu'en province on observe des disparités régionales et des équipements moins performants dans les zones rurales, moins peuplées.



Sources: L. J. Libois, 1958, Faisceaux hertziens et systèmes de modulation, Collection scientifique du CNET, Editions Chiron.

Figure 24 : Première tour hertzienne pour faisceaux hertziens à large bande, située à Neuville d'Aumont entre Paris et Lille.

2.5 – Naissance du réseau de télécommunications intercontinentales à partir des années 60

Les années 60 vont marquer un véritable tournant dans la technologie des télécommunications : les travaux des chercheurs et des ingénieurs permettront de renouveler entièrement les techniques dont disposaient jusqu'alors les services d'exploitation des réseaux de télécommunication.

Deux faits essentiels sont à l'origine de cette profonde évolution :

- Le développement et le perfectionnement des dispositifs à semi-conducteurs, notamment après l'apparition des circuits intégrés en 1961.
- L'apparition de l'informatique, dont l'impact sera considérable dans le développement des réseaux de télécommunication au cours des années 60.

2.5.1 – Les liaisons téléphoniques par câbles sous-marins

Les liaisons téléphoniques intercontinentales étaient assurées exclusivement, jusqu'au milieu de ce siècle, par le moyen des ondes hertziennes de courte longueur d'onde. Cependant, l'utilisation des seuls moyens radioélectriques ordinaires ne permit pas, pendant toute la première moitié du 20^{ème} siècle, un très grand développement des liaisons intercontinentales : le prix de la communication demeurait élevé et le trafic était relativement réduit.

Au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, l'American Telephone and Telegraph Company, l'AT&T, décide de se lancer dans la réalisation de liaisons téléphoniques intercontinentales par câbles sous-marins. En 1956 sera mise en service la première liaison téléphonique transatlantique, entre l'Ecosse et Terre-Neuve. Cette liaison (TAT I) est longue de 3 350 kilomètres.

A l'origine, la capacité de la liaison était de 36 communications simultanées. Plus tard, la capacité fut portée jusqu'à 80 communications simultanées. L'excellente qualité du service se traduisit presque immédiatement par une augmentation très rapide du trafic transatlantique. Une seconde liaison (TAT II) fut mise en service entre la France et Terre-Neuve. La longueur de cette liaison était de 3 845 kilomètres.

Pendant que se développait ainsi la technique des grands câbles sous-marins intercontinentaux, la France, de son côté, grâce aux travaux conduits au Centre National d'Etudes des Télécommunications et dans l'industrie des télécommunications mettait au point une technique bien adaptée à des liaisons moins longues, comme celles de la Méditerranée. Un premier câble méditerranéen fut mis en service, par la France, entre Marseille et Alger, à la fin de 1957 et un autre, entre Perpignan et Oran, en janvier 1962.

Pendant les 20 ans qui suivront la mise en place du premier câble transatlantique, la technique des câbles sous-marins à amplificateurs immergés fera des progrès très importants.

En 1963 apparaît une deuxième génération de câbles : le système à câble coaxial unique se généralise et se perfectionne. De nouvelles liaisons transatlantiques de ce type sont mises en service, tous les deux ans environ.

Une troisième génération de câbles basée sur l'utilisation d'amplificateurs transistorisés est en cours de développement : l'année 1970 marquera l'avènement des liaisons sous-marines à grande capacité utilisant des amplificateurs transistorisés. Le TAT V qui reliera les USA à l'Espagne en 1970 appartient à cette troisième génération de câbles

En 1975, la quatrième génération de câbles sous-marins apparaît : les capacités de transmissions dépassent alors les 3 000 communications simultanées, avec les liaisons « régionales » mises en service par la France entre Marseille et Rome, et entre la France et l'Angleterre. Une nouvelle liaison est établie entre les USA et la France (TAT VI) en 1976. La capacité de 4 000 communications simultanées est atteinte (système SG développé par l'AT&T).

Enfin, la cinquième génération de câbles, basée sur l'utilisation des fibres optiques, fut mise en place à la fin des années 80. En 1982, la France posait, à titre expérimental, le premier câble sous-marin à fibres optiques entre Juan-les-Pins et Cagnes-sur-Mer. Au plan international, en 1988 fut posé un câble TAT VIII entre les USA et la France, sa capacité est de plusieurs milliers de communications simultanées. A l'heure actuelle, en ce début de 21^{ème} siècle, c'est encore la technique basée sur les fibres optiques qui est utilisée pour les communications par câbles.

Quant au nombre total de circuits établis par câbles sous-marins il a évolué, lui aussi, très rapidement : de l'ordre de 5 000 en 1965, il atteignait 50 000 en 1975 et approchait 150 000 en 1980.

Ces chiffres montrent l'extraordinaire essor de la technique des câbles sous-marins. Cette expansion est d'autant plus significative qu'à partir du milieu des années 60 l'avènement des télécommunications par satellites a permis aux organismes de télécommunications de mettre en œuvre de nouveaux et puissants moyens de transmission pour acheminer leur trafic intercontinental. Mais la rapidité de croissance du trafic international est telle que câbles sous-marins et satellites sont devenus plus complémentaires que concurrents.

2.5.2 – Les télécommunications par satellites

En 1955, un chercheur américain des Bell Telephone Laboratories, J. R. Pierce, avait proposé dans un article intitulé « *Orbit radio relay* », paru dans la revue *Jet-Propulsion*, d'utiliser des satellites géostationnaires³⁹ pour assurer des liaisons à très grande distance. Ce projet mit cependant une dizaine d'années à être réalisé : en effet, si le lancement du satellite soviétique Spoutnik I date de 1957, il faudra attendre, néanmoins, plusieurs années pour que soit résolue le problème des contraintes techniques liées à la mise sur orbite à très haute altitude d'une charge ayant une masse suffisante.

Toutefois, des expériences de lancement furent entreprises dès 1958 : les Etats-Unis lancèrent sur orbite basse le premier satellite de télécommunications, prénommé « *Score* » (*Signal communication by orbiting relay equipment*) ; il s'agissait en fait d'un relais à transmission différée, réémettant par télécommande un message reçu et enregistré antérieurement : un tel relais ne peut être intégré dans un réseau de télécommunications à transmission instantanée, mais il peut par contre être utilisé pour la collecte ou la diffusion de données, ainsi que pour certaines applications militaires. Le lancement du satellite « *Courrier* », en octobre 1970, permit d'expérimenter plus complètement cette technique de retransmission différée, qui assure une grande discrétion des communications ; sans nul doute, un certain nombre de satellites militaires à mission secrète continuent à utiliser cette technique.

Les premiers essais réalisés avec des satellites en orbite à de hautes altitudes correspondent au satellite réflecteur *Echo I*. Ce satellite est composé d'un ballon plastique métallisé de plus

³⁹ Un satellite géostationnaire est un satellite positionné autour de la Terre, à orbite équatoriale circulaire, dont la période de révolution est égale à la période de rotation de la Terre (c'est à dire géosynchrone). Son altitude est d'environ 36 000 kilomètres.

de 30 mètres de diamètre. Il fut lancé en août 1960, par l'Agence américaine pour l'aéronautique et l'espace (NASA), sur une orbite d'altitude moyenne de 15 000 kilomètres. Plusieurs expériences de télécommunications ont été faites avec le satellite *Echo I*, en particulier entre les Etats-Unis et la France : un signal émis aux Etats-Unis fut reçu à Issy-les-Moulineaux au moyen d'une antenne de 3 mètres de diamètre, puis de 10 mètres. Ces expériences ont permis de vérifier les conditions de propagation des ondes radioélectriques, notamment à incidence rasante, et la dérive de fréquence due à l'effet Doppler ; en outre, elles ont contribué à la mise au point des techniques de poursuite.

Cependant, les véritables expériences de télécommunications ne commencèrent qu'après le lancement du satellite *Telstar I* par la NASA, en juillet 1962. Ce satellite, construit par les Bell Telephone Laboratories, comportait un répéteur actif de télécommunications ; il gravitait sur une orbite elliptique dont l'apogée était située au dessus de l'hémisphère nord à environ 5 000 kilomètres d'altitude.

L'administration française des PTT construisit en quelques mois (octobre 1961 – juillet 1962), grâce à la collaboration de l'AT&T et des Bell Telephone Laboratories, une station terrienne à Pleumeur-Bodou (Côtes du Nord). Cette station, identique à la station de l'AT&T située à Andover (Maine), était opérationnelle au début de juillet 1962 et put ainsi capter les premières images de télévision en provenance des Etats-Unis. Quelques heures plus tard, la station britannique installée en Cornouailles, recevait, elle aussi, les premières images transmises au-dessus de l'Atlantique.

Plusieurs satellites de télécommunications dits « à défilement », par opposition aux satellites géostationnaires, furent lancés par les Etats-Unis après *Telstar I* : ce furent, en 1963 1964, *Relay I*, puis *Telstar II*, puis *Relay II*, dont l'apogée s'est élevé jusqu'à 10 000 kilomètres, augmentant ainsi la durée de visibilité de part et d'autre de l'Atlantique.

Un grand pas fut franchi lorsqu'on démontra la possibilité de maintenir un satellite stationnaire par rapport à la Terre, ce qui fut mis en oeuvre avec les satellites *Syncom*, notamment le satellite *Syncom III*, qui permit de retransmettre, en 1964, les images des jeux olympiques de Tokyo. En 1964, 18 pays formèrent à Washington le Consortium international de télécommunication par satellite, *Intelsat*. En avril 1965, c'était le lancement du premier satellite géostationnaire, *Intelsat I* (prénommé « *Early Bird* »). Ce satellite avait une capacité de transmission de 240 communications simultanées ou d'un canal de télévision. Le lancement d'*Intelsat I* marque le véritable début de l'ère des télécommunications par satellites.

L'utilisation des satellites permit aux pays continentaux, n'ayant pas d'accès direct à l'océan, d'établir leurs liaisons internationales sans transiter par d'autres pays.

Depuis 1965, le développement des télécommunications par satellites a suivi pas à pas le développement des techniques de mise sur orbite et le perfectionnement des satellites et des stations terriennes⁴⁰. Comme dans le cas des câbles sous-marins, la course aux grandes capacités de trafic s'engagea très vite. De 240 communications téléphoniques (ou un canal de télévision) pour les satellites *Intelsat I* et *II* (1965 – 1967), on passa, avec la série *Intelsat V* (début des années 80) à 12 000 communications téléphoniques simultanées et 2 canaux de télévision. Cependant, le développement et le perfectionnement de la technique des télécommunications par satellites ne s'apprécie pas uniquement en fonction de critères quantitatifs. Par exemple, à partir de la génération *Intelsat II*, en 1967, il a été possible de

⁴⁰ Par convention, on appelle « stations terriennes » (*Earth stations*) les stations situées sur Terre et qui communiquent avec des engins spatiaux, par opposition aux « stations terrestres » (*terrestrial stations*) qui assurent des liaisons uniquement à la surface du globe.

disposer de ce qu'on appelle « l'accès multiple » qui permet à un groupe de stations terriennes d'être reliées deux à deux grâce à un seul satellite, alors qu'avec *Intelsat I*, seules, des liaisons point à point (un seul émetteur et un seul récepteur) étaient possibles. Le réseau *Intelsat* est une réussite remarquable. En 1968, on ne comptait encore que 11 pays équipés de stations terriennes, le nombre total d'antennes était alors de 14. En 1975, 72 pays étaient desservis par le réseau *Intelsat*, qui comprenait 114 stations terriennes et 141 antennes.

La souplesse d'exploitation des satellites de télécommunications se développe donc en même temps que leur capacité de transmission s'accroît. Alors qu'un câble sous-marin est essentiellement une artère point à point, un système de télécommunications par satellites, apparaît comme un réseau doté, non seulement d'une fonction de transmission, mais aussi, sous une forme particulière, de certaines fonctions s'apparentant à la commutation.

Depuis le début des années 80 jusqu'à aujourd'hui, l'expansion des réseaux de télécommunications par satellites n'a cessé de s'accroître dans le monde entier et l'on a assisté, en outre, à la mise en place de liaisons par satellites pour des besoins « domestiques » ou « régionaux » dans de nombreux pays : Russie, Canada, Etats-Unis, Inde, Indonésie, Japon, Chine, Europe, etc. Le développement des réseaux régionaux de télécommunications par satellites est un élément important car il introduit une dimension nouvelle dans le concept de réseau de télécommunications. La création, en 1977, aux USA du consortium *Satellite Business Systems (SBS)* regroupant la Comsat, IBM et une société d'assurances, est très significative à cet égard. Ce premier satellite de télécommunication privé fut lancé en 1980. La technologie du système utilisée était particulièrement avancée pour l'époque, puisqu'il utilisait déjà des transmissions sous forme numérique (transmissions de données, de parole et d'images). 200 stations de réception furent rapidement installées sur le territoire américain ; ces stations étant essentiellement destinées à écouler un trafic d'affaires très rémunérateur. L'apparition de ce nouvel opérateur de télécommunication privé (*SBS*) fut non seulement une réussite technique, mais elle constitua aussi un événement qui marqua un tournant dans la structure et l'organisation même des télécommunications. Le monopole de droit ou de fait des grands organismes publics de télécommunications, des opérateurs publics tels que l'AT&T, France Télécom, etc., fut remis en question par la création de tels réseaux privés.

2.5.3 – Complémentarité des satellites et des câbles sous-marins

Le domaine d'application privilégié des télécommunications par satellites demeure, comme pour les câbles sous-marins, celui des grandes liaisons intercontinentales.

Ces deux grands systèmes de télécommunications, sont, assez complémentaires ; ils permettent, en particulier, une diversification des acheminements qui garantit la sécurité d'écoulement du trafic international.

La capacité des liaisons par câbles sous-marins et par satellites a fait des progrès spectaculaires que l'on peut résumer ainsi. En 25 ans (1955 – 1980), la capacité des câbles sous-marins a été multipliée par près de 100 ; en 15 ans (1965 – 1980), celle des satellites a été multipliée par 50. Mais l'augmentation de la capacité n'est qu'un aspect du problème : les économies d'échelle ont conduit, au plan économique, à un abaissement progressif très important du coût unitaire des circuits : pour les câbles sous-marins, le coût unitaire a été divisé par 15 entre 1955 et 1980 et, pour les satellites, par 6 entre 1965 et 1980.

L'évolution du trafic mondial durant les 25 dernières années (1980 – 2005) a vu un développement simultané des deux systèmes (satellites et fibres optiques). L'organisation *Intelsat* a vu son trafic intercontinental quadruplé en seulement 10 ans (1980 – 1990).

En outre, se sont multipliés les satellites « régionaux » (par exemple le réseau *Eutelsat* en Europe : en 1977, à l'initiative de la Direction Générale des Télécommunication française et

de l'opérateur national allemand, les Européens se regroupent au sein d'*Eutelsat* qui aboutit à la mise en place, en 1983, du système *ECS*) et nationaux de télécommunications classiques (y compris de télévision), en particulier dans les pays où la géographie se prête mal à la mise en place de réseaux terrestres.

Quant à la France, elle fit figure de leader dans le domaine des télécommunications par satellites dès les années 80, avec le programme « Télécom I ». Ce programme était destiné à doter la France d'un système à couverture nationale (y compris les départements et territoires d'Outre-Mer), capable d'assurer des missions de télécommunications classiques et surtout, grâce à des liaisons numériques à grand débit, de jouer un rôle important dans les futurs réseaux de télématiques qui apparurent dans les années 90. Ce système fut opérationnel dès 1984. Avec la génération Télécom I et Télécom II, lancé en 1991, les Télécommunications françaises entrent dans le monde de l'image.

Mais, comme l'écrivait Jean Grenier dans un article paru dans la *Revue française des télécommunications* en juillet 1980 : « Le développement des systèmes par satellites ne risque-t-il pas d'être freiné par la limitation de cette « ressource naturelle » que constituent les fréquences radioélectriques et par l'encombrement de ce « boulevard naturel » qu'est l'orbite géostationnaire. On sera sans doute amené à spécialiser les systèmes par satellites dans leurs domaines d'applications privilégiés : communications avec les mobiles, distributions d'informations, liaisons difficiles à réaliser par voie terrestre et sous-marine... ».

2.6 – Evolution des systèmes de transmission du signal

L'évolution des grands systèmes de transmission est-elle terminée ? Certainement pas, car, d'une part le rythme de croissance du trafic téléphonique se maintient, même dans les pays les plus développés, et, d'autre part, de nouveaux types de trafic apparaissent, notamment en matière de transmissions de données et de transmissions d'images. C'est pourquoi la plupart des grands pays industriels poursuivent des recherches et des expériences sur de nouveaux systèmes de transmission à grande largeur de bande et à faible coût de revient.

2.6.1 – Les liaisons par fibres optiques

A peine la technologie de transmission basée sur les guides d'ondes électromagnétiques commençait-elle à sortir de sa phase purement expérimentale, que les techniciens des télécommunications cherchèrent à mettre au point un nouveau procédé de transmission entièrement différent basé sur l'utilisation d'ondes porteuses de fréquences encore plus élevées, c'est-à-dire d'ondes lumineuses, émises par des sources utilisant l'effet « laser ». Ces ondes, modulées par les signaux à transmettre, se propagent à l'intérieur de fibres optiques jouant, en quelque sorte, le rôle de « guides de lumière ».

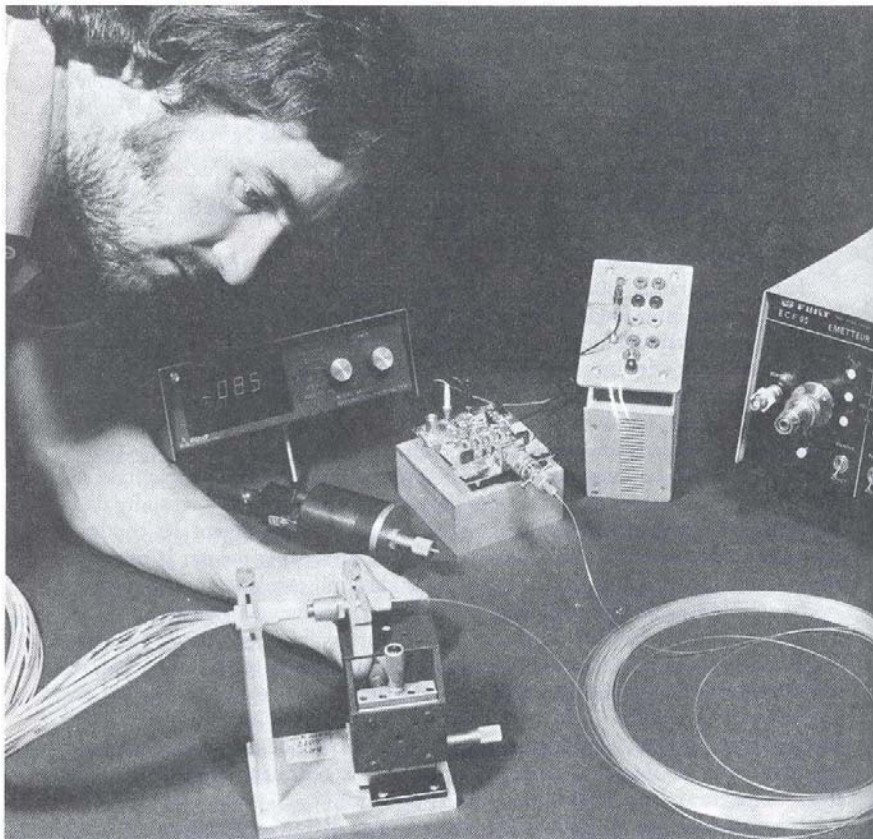
Depuis le milieu des années 60, de nombreux laboratoires poursuivaient des recherches sur la lumière cohérente, sur les dispositifs électroluminescents et sur le guidage de la lumière. Rappelons à ce propos que l'invention du « laser » (abréviation de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) remonte à 1961, bien que le principe en ait été déjà exposé par H. Townes et A. L. Schawlow en 1958.

En dix ans seulement (1965 – 1975), la technologie et la technique des fibres optiques vont faire d'étonnants progrès. En particulier, on parviendra à réduire considérablement les pertes subies sur les lignes ; l'affaiblissement kilométrique deviendra du même ordre que celui du guide d'ondes radio. Quant à la capacité de transmission, elle sera très élevée. La Direction générale des télécommunications décide de passer à la phase industrielle. Une première liaison par fibre optique est commandée à l'industrie française : elle sera installée et mise en

service, en août 1980, sur un parcours d'une longueur de 7,2 kilomètres entre deux centraux téléphoniques parisiens. Le projet le plus important est celui de l'AT&T : il s'agit de la première phase d'un vaste réseau de liaisons par fibres optiques s'étendant sur un millier de kilomètres et destiné à relier Washington à Cambridge (Massachusetts). Cette première liaison à grande distance par fibres optiques sera mise en service en 1983.

Durant les années 75-80, guides d'ondes, puis fibres optiques rivalisent dans la course aux très hautes fréquences et, par conséquent, aux très grandes capacités de transmission. Mais, était-il réaliste et raisonnable d'envisager de pareilles capacités de trafic ? Le développement très important du câble, d'Internet et de l'ADSL depuis le milieu des années 90 n'aurait jamais pu voir le jour sans ces capacités de transmission très élevées. De plus, nous avons déjà noté que l'augmentation du trafic téléphonique, même dans les pays où la densité en postes téléphoniques tend vers la saturation, s'est poursuivi à un rythme soutenu durant les années 80-90, dans la mesure, tout au moins, où la politique tarifaire ne présentait pas un aspect dissuasif. D'autre part, on a vu apparaître des possibilités de trafic nécessitant de grandes largeurs de bande (transmissions d'images animées, visioconférence, etc.). La course aux grandes capacités semble donc loin d'être achevée.

Il est certain que les liaisons par fibres optiques, grâce aux vastes disponibilités en largeur de bande qu'elles procurent, ont favorisés le développement de ces nouveaux types de service depuis le milieu des années 90. On emploie d'ailleurs souvent le terme de « vidéomatique » pour parler de tous ces services, car ils débordent largement du cadre de la « télématique » proprement dite. Ce scénario avait déjà été envisagé par Albert Glowinski dans son ouvrage intitulé : *Télécommunications – Objectif 2000*⁴¹.



Sources : Archives du CNET, 1976, Laboratoire de recherche du CNET de Lannion.

Figure 25 : Banc de mesure de l'atténuation de transmissions d'une fibre optique.

⁴¹ Albert Glowinski, 1980, *Télécommunications – Objectif 2000*, Collection technique et scientifique des télécommunications, Ed. Dunod, Paris.

Des économies d'échelles favorisées par les systèmes de transmission à grande capacité :

Même dans le cadre du scénario « téléphonique » des années 80, il existait déjà un facteur qui poussait à l'utilisation des systèmes de transmission à grande capacité : ce sont les « économies d'échelle » qu'ils rendent possibles.

Il apparaît que ce coût de revient diminue approximativement dans un rapport de 3 lorsque l'on passe de câbles du type 1 000 télécommunications simultanées à des câbles du type 10 000 télécommunications simultanées et, plus globalement, dans un rapport de 10 lorsque l'on passe de câbles à 1 000 télécommunications simultanées à des câbles à 100 000 télécommunications simultanées.

Cette loi mathématique met en relief l'importance des économies d'échelle en télécommunications et, tout particulièrement, en transmission ; elle montre en outre l'intérêt que présente la concentration du trafic sur des câbles de tailles importantes. Les économies d'échelle expliquent également la tendance constatée dans l'évolution des tarifs des communications à grande distance ; au cours du temps ces tarifs ont pu être fortement abaissés dans la plupart des pays. Ainsi, le coût d'une communication devient progressivement de plus en plus indépendant de la distance ; c'est là un facteur très important, qui mérite d'être pris en considération à de nombreux points de vue : aménagement du territoire, substitutions possibles, dans certains cas, des télécommunications aux transports, etc.

2.6.2 – Les systèmes de transmissions multiplex

Un autre fait, au moins aussi important en terme de transmission, est l'apparition d'un nouveau procédé de groupement, ou « multiplexage », des voies sur une même artère. Ce nouveau procédé est basé, non plus sur la répartition des communications dans l'échelle des fréquences, comme dans les systèmes à courants porteurs, mais sur leur répartition dans le temps. On a donc affaire à un système « temporel ».

C'est à la veille de la Seconde Guerre mondiale que les questions de modulation par impulsions et de multiplexage dans le temps commencent à faire l'objet d'études théoriques et de réalisations expérimentales. Différents systèmes furent réalisés à l'époque par l'industrie française. C'est le progrès de l'électronique qui permettra aux systèmes de multiplexage dans le temps, couramment appelés « *systèmes Multiplex* » de prendre leur véritable essor au début des années 60.

Ce sera dans le domaine des liaisons à courte distance que seront utilisés en premier ces nouveaux systèmes multiplex. Un problème se posait en effet dans les grandes agglomérations urbaines, celui de la saturation des câbles entre centraux. Afin d'éviter l'installation de nouveaux câbles et surtout celle de nouvelles canalisations dans les rues, il fallait augmenter la capacité des artères existantes. La « modulation par impulsions et codage » (MIC), c'est-à-dire le codage numérique de l'information sous forme binaire (« 0 » ou « 1 »), allait apporter une très bonne solution technique et économique à ce problème. En France, la première liaison multiplex expérimentale utilisant la « modulation par impulsions et codage » est mise en service en 1966 dans la région parisienne. Depuis cette date, le développement des systèmes numériques s'est poursuivi à un rythme accéléré. En 1970, le CNET installait une première liaison MIC opérationnelle en Bretagne. En 1972, plus de 200 liaisons de ce type étaient déjà en service en France et le rythme de production de ces équipements allait en s'accroissant. De nos jours, tous les systèmes de transmission utilisés sont du type numérique.

En outre, des systèmes à plus grande capacité, destinés à des liaisons interurbaines, ont été étudiés et développés dès les années 1975, aux Etats-Unis, au Canada, en Europe et au Japon.

Il s'agissait de systèmes utilisables sur câbles coaxiaux ou sur faisceaux hertziens. Les débits par canal étaient déjà de plusieurs centaines de mégabits par seconde.

Mais c'est sans doute en France que les techniques numériques progressèrent le plus rapidement. Le programme de « numérisation » du réseau était particulièrement avancé. La Direction Générale des Télécommunications indiquait en 1980, que la part des commandes d'équipements numériques de transmission par rapport à l'ensemble des commandes d'équipements numériques de transmission avait évolué comme suit : 30 % en 1978, 50 % en 1979, 85 % en 1980, et 100 % dès 1982.

Les techniques numériques ont-elles totalement relégué dans l'ombre les techniques analogique ? La tendance semble irréversible : grâce au développement spectaculaire de la microélectronique et de l'informatique, les techniques numériques s'imposent chaque jour d'avantage. C'est le signal numérique codé qui devient le signal de base et lorsque les signaux se présentent sous forme analogique, comme c'est encore le cas pour certains postes téléphoniques ou pour les télévisions à tube cathodique, on procède d'abord à leur conversion et à leur codage. Cette orientation s'affirme dans tous les domaines, qu'il s'agisse de transmission à courte distance ou à grande distance, qu'il s'agisse de câbles de fibres optiques, de faisceaux hertziens ou de satellites.

2.7 – Développement des systèmes de commutation électronique

Seulement deux ans après l'invention du téléphone, on vit apparaître les premiers standards téléphoniques manuels (USA, 1878). La commutation téléphonique manuelle fut mise au point dès 1889. Vers le milieu des années 30, une nouvelle génération de centraux téléphoniques apparurent, avec le développement des premiers centraux à barres croisées, les crossbar. Mais si l'avènement des systèmes crossbar marque une date importante dans l'histoire de la commutation téléphonique, on n'a pas affaire cependant à une véritable révolution technique : les systèmes de commutation demeurent encore électromécaniques.

Cependant, les chercheurs ne se découragèrent pas et plusieurs équipes s'orientèrent, au début des années 40, dans une autre voie : celle du multiplexage en temps. Les principes étaient excellents, mais la technologie de l'époque, basée uniquement sur les tubes à vide, vouait ces tentatives à l'échec. Il faudra attendre, en effet, l'invention de l'électronique, avec l'apparition des transistors, et surtout celle des circuits intégrés, pour que les systèmes de commutation temporelle redeviennent d'actualité.

Après 1950, on voit apparaître deux écoles : l'une préconise un passage progressif de l'électromécanique à l'électronique et propose l'introduction de systèmes semi électroniques l'autre, au contraire, pense qu'il faut éviter de s'engager dans une voie intermédiaire, même si cela doit prendre quelques années de plus.

Depuis 130 ans, le développement technique des télécommunications s'est effectué essentiellement dans deux directions : perfectionnement des moyens de transmission, afin d'améliorer les communications à grande distance et d'en réduire le prix, perfectionnement des moyens de commutation automatique, afin d'éliminer au maximum les opérations manuelles et d'améliorer la qualité et la sécurité de fonctionnement des centraux téléphoniques.

Certes, la préoccupation essentielle des pionniers du téléphone était la transmission de la parole à distance. Mais la technique de « commutation » est apparue très vite d'une grande importance. En effet si, au début, on pouvait se contenter de faire communiquer entre eux quelques usagers en reliant leurs postes téléphonique sur une même ligne (principe de la « ligne partagée ») ou en les reliant deux à deux par des « lignes directes », cela n'était plus possible lorsque le nombre de personnes susceptibles de communiquer entre elles dépassait la dizaine. Il devint alors indispensable de mettre en œuvre d'autres moyens techniques : la fonction « commutation » s'imposa alors d'elle-même.

On peut constater qu'il a fallu un temps particulièrement long entre le début des recherches en laboratoire et le véritable démarrage industriel de la commutation électronique : il a fallu au Bell System, malgré la puissance de ses moyens, une vingtaine d'années pour mettre au point cette nouvelle technique (1945 – 1965).

Le Bell System allait ainsi s'engager à fond dans ce qui sera son plus grand programme de recherches ; à la suite, la plupart des pays industriels se lanceront aussi dans cette grande aventure technique, tous avec la certitude qu'ils ne pouvaient rester à l'écart de ce qui apparaissait déjà, à la fin des années 50, comme une évolution majeure des techniques de télécommunication.

Les premiers travaux importants des Bell Telephone Laboratories commencent donc à la fin de la guerre. A cette époque sont entreprises des études sur les possibilités que l'électronique est susceptible d'apporter à la commutation. Dans l'esprit des chercheurs et des ingénieurs, les vitesses élevées de fonctionnement rendues possible par l'électronique doivent permettre d'ouvrir des voies nouvelles dans la conception même des centraux.

On sait que, dans un système de commutation électromécanique, il est nécessaire de disposer d'un certain nombre d'organes de commande fonctionnant simultanément, pour faire face au trafic qui se présente à heures chargées (de l'ordre de plusieurs dizaines d'appels par seconde dans les grands centraux). L'idée des ingénieurs et des chercheurs fut d'expérimenter un système dans lequel on effectuerait une seule opération à la fois, pour chaque catégorie de fonction (*one at a time operation*). Ce principe sera mis en œuvre, en 1947, dans un système expérimental, baptisé *Experimental Electronically Controlled Automatic Swilching System, ECCASS*.

Un pas important allait être franchi dans l'élaboration des principes fondamentaux de la commutation électronique avec la conception et la réalisation, par les Bell Laboratories, d'un nouveau système, expérimenté en 1951, et connu sous le nom de *Drum Information Assembler and Dispatcher, DIAD*. C'est dans le principe même de la fonction d'exploration que réside l'innovation essentielle de ce système : alors que dans l'*ECASS* on cherchait à adapter le poste téléphonique au concept de base de la commutation électronique (une seule opération à la fois pour un type d'organe), dans le système *DIAD*, on prend les postes téléphoniques tels qu'ils sont et c'est le système central de commande que l'on conçoit en fonction de cette donnée. Dans le système *DIAD*, le temps nécessaire à l'organe de commande et au réseau de connexion pour établir une communication était d'environ 0,02 seconde, ce qui permettait d'envisager la réalisation de centraux téléphoniques d'une capacité de 10 000 lignes et 2 000 circuits.

Les deux systèmes de commutation électronique : temporelle et spatiale :

Si les principes fondamentaux qui seront ceux des futurs systèmes de commutation électronique commencent à se dégager, des doutes subsistent cependant sur la meilleure façon d'aborder le problème de la connexion : serait-il possible d'effectuer cette connexion de façon purement électronique, soit en utilisant un composant approprié à la place d'un relais, soit en mettant en œuvre des moyens plus perfectionnés basés sur le multiplexage des voies téléphoniques à commuter.

C'est dans cette voie que s'étaient engagés, avant 1940, quelques chercheurs, qui pensaient utiliser le multiplexage en fréquence (systèmes à courants porteurs). Techniquement, cette solution s'était révélée irréalisable ; mais d'autres chercheurs estimèrent, au début des années 50, que le multiplexage en temps, utilisant la modulation par impulsion et codage (MIC), ne présentait pas les difficultés du multiplexage en fréquence et qu'il fallait explorer cette voie.

Il existe deux approches distinctes du problème de la commutation électronique : l'approche spatiale et l'approche temporelle.

Dans le premier cas, on dit que l'on a affaire à des systèmes de commutation électronique « spatiale », dans le second, à des systèmes de commutation électronique « temporelle ».

Ces deux concepts méritent quelques explications. En fait, le terme « spatial » signifie simplement que le chemin qui relie, dans un commutateur, une ligne d'entrée à une ligne de sortie, a une réalité matérielle : on peut le suivre, dans l'espace, à travers les contacts d'un certain nombre de relais, électromécaniques en général, mais qui peuvent être aussi de nature purement électronique (on parle dans ce cas de « point de connexion électronique »).

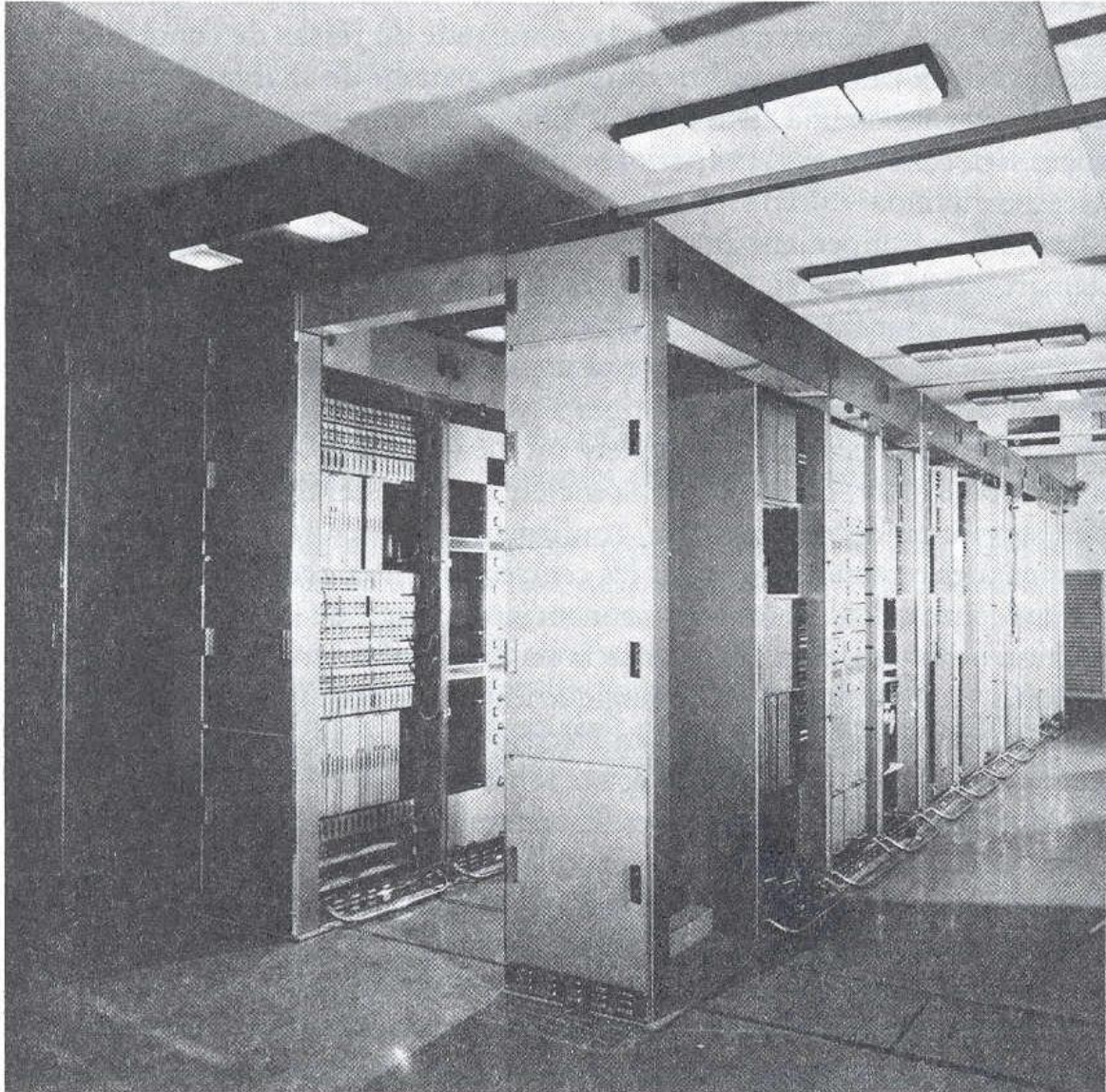
En revanche, en commutation temporelle, le signal n'emprunte plus un chemin ayant une réalité physique, en quelque sorte tangible ; on ne peut en suivre le cheminement dans l'espace, car le signal d'entrée, après échantillonnage et, le plus souvent aussi, après codage, transite par une « voie temporelle », d'un autre multiplex à répartition dans le temps, cette voie est ensuite mise en relation, par des moyens purement électroniques, avec une autre voie temporelle, d'un autre multiplex à répartition dans le temps, qui elle-même est affectée à une ligne de sortie. Il y a en somme « connexion temporelle » et non plus « connexion spatiale ».

Sous une autre forme, on peut dire qu'en commutation spatiale les points de connexion qui définissent le chemin suivi par les communications peuvent être repérés dans un système de coordonnées spatiales, tandis que, dans un système temporel, il faut ajouter une « coordonnée temps ». Là réside, d'ailleurs, l'intérêt fondamental des systèmes temporels qui disposent, au sens propre du terme, d'une dimension supplémentaire : le concept « espace-temps » remplace le concept « espace ». La coordonnée « temps » introduit un degré de liberté supplémentaire. Il semble bien, d'un point de vue plus philosophique, que la notion de séquence, c'est-à-dire d'opérations en série dans le temps, soit un concept fondamental beaucoup plus fructueux, que celui de structure parallèle.

Une nouvelle étape va être franchie par les Bell Laboratories aux USA. Une étude exhaustive des différentes techniques et technologies susceptibles d'être utilisées dans un central téléphonique électronique est lancée par les ingénieurs du Bell System : d'impressionnants moyens de recherche et de développement sont rassemblés sur ce sujet avec comme objectif immédiat la réalisation d'un modèle expérimental de central électronique en laboratoire. Le premier prototype du système de commutation électronique du Bell System (*ESS I*) sera mis en service, en 1965, dans le New-Jersey. Cette date marque réellement le début du développement industriel de la commutation électronique aux USA. Quatre ans après, en 1969, le réseau téléphonique du Bell System comporte déjà 50 centraux de type *ESS I* en service. Les ingénieurs du Bell System ne se contentèrent pas de développer la commutation électronique pour les seuls centraux téléphoniques urbains. Dès le début des années 60, ils s'intéressèrent aux centraux téléphoniques privés, couramment désignés sous le sigle *PBX* (*Private Branch Exchange*). Pour ce faire, un système entièrement électronique fut étudié, puis construit industriellement. Ce système, dénommé *ES 101*, entra en exploitation à partir de 1963. Contrairement à l'*ESS I*, qui était basé sur la commutation de type spatiale, l'*ESS 101* utilisait la commutation temporelle.

Ainsi donc, ce sont les Etats-Unis et la Grande-Bretagne qui sont à l'origine du développement de la commutation électronique.

Dans les autres pays, les techniciens manifestèrent aussi un grand intérêt pour la commutation électronique, mais, c'est seulement après le symposium tenu aux Bell Laboratories en 1957 que les responsables des grands laboratoires décidèrent d'entreprendre des recherches dans ce domaine. Cependant, les problèmes techniques et économiques posés par la commutation étant très importants, l'Europe et le Japon ne s'engageront dans la voie de la commutation électronique qu'à partir de 1965. Finalement, en dehors de la Grande-Bretagne et des Etats-Unis, c'est la France qui s'engagera le plus rapidement dans le développement des techniques de commutation électronique.



Sources : Archives du CNET, 1970, Laboratoire de recherche du CNET de Lannion.

Figure 26 : Premier système de commutation entièrement électronique français, PLATON, développé par le CNET.

2.8 - Mise en œuvre du plan de rattrapage en équipements et réseaux de télécommunications sur le territoire français : le *Delta LP* (1968-1978)

2.8.1 – *Les télécommunications s’émancipent*

Au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, la priorité de l’Etat français était à l’aménagement des structures industrielles. C’est le redressement de l’industrie française qui sera alors une priorité.

La création de la Direction Générale des Télécommunications, la DGT, ne changera pas beaucoup la situation française en matière d’équipement téléphonique, puisque aucun budget spécifique n’y sera octroyé dans le Plan de finance jusqu’en 1969, et que les dépenses en matière de téléphone vont essentiellement aller à la Recherche (Centre National d’Etude des Télécommunications), mais non à la mise en œuvre d’un réseau de télécommunications performant.

Pour Bruno Lasserre⁴², dans le domaine des télécommunications on observe souvent que l’organisation et les débats s’organisent autour de l’offre et non de la demande. Ce serait une constante dans l’histoire des télécommunications. De toute évidence, il faut constater que la notion de service public est un échec au regard du retard séculaire que l’on constate dans les années 1960.

A la fin des années 1960, la demande explose et la France fait le bilan de ses retards en matière de téléphonie. A la même époque, de nombreux pays vivent des crises concernant leur système téléphonique, à cette différence prêt que à l’étranger c’est le vieillissement du parc qui pose problème, alors qu’en France c’est son absence.

Les Jeux Olympiques de Grenoble, en 1968, marquent un tournant dans les télécoms et le premier pas de la grande aventure du rattrapage téléphonique. Des relais pour les transmissions radio et télé et des centaines de lignes téléphoniques sont installés pour que le monde entier puisse profiter de cet événement exceptionnel. En 1968, alors que la liste des doléances téléphoniques des Français s’allonge, on entrevoit enfin les signes tangibles d’un avenir meilleur. La Direction de l’Aménagement du Territoire et de l’Action Régionale, la DATAR, se met enfin à considérer le réseau téléphonique comme une infrastructure importante à mettre en place. La France est en effet seulement au vingt-huitième rang mondial pour le taux d’automatisation de son système téléphonique, au vingtième rang pour le nombre de conversations échangées, au seizième rang pour la densité téléphonique, et les demandes de raccordement au réseau téléphoniques insatisfaites représentent un à deux ans de travail.

C’est à partir de 1969 que va donc se mettre en place le plan de rattrapage, et ce en deux temps. On mettra tout d’abord en place la réforme de l’administration et de son mode de financement, puis en 1974 verra le jour le « *Delta LP* » qui mettra en œuvre un plan de croissance du nombre de lignes principales installées. A partir de 1969, l’Etat français va donc enfin donner une priorité politique au développement du réseau téléphonique français. Le VI^{ème} Plan (1970-1975) va mettre en avant le rôle des télécommunications dans la vie économique française.

Le *Delta LP*, qui constituera pendant plus de 10 ans le projet fédérateur des Télécoms, est né du tableau de bord mis en place pour le suivi du rattrapage téléphonique : c’est un instrument de mesure, un document technique, qui rend compte de l’état d’avancement des travaux de raccordement téléphonique, etc. Mis à jour tous les mois, les chiffres sélectionnés suivant des critères à la fois quantitatifs et qualitatifs, servent désormais à mesurer avec précision l’état d’avancement des travaux dans chacune des régions, de façon à n’oublier aucune parcelle du

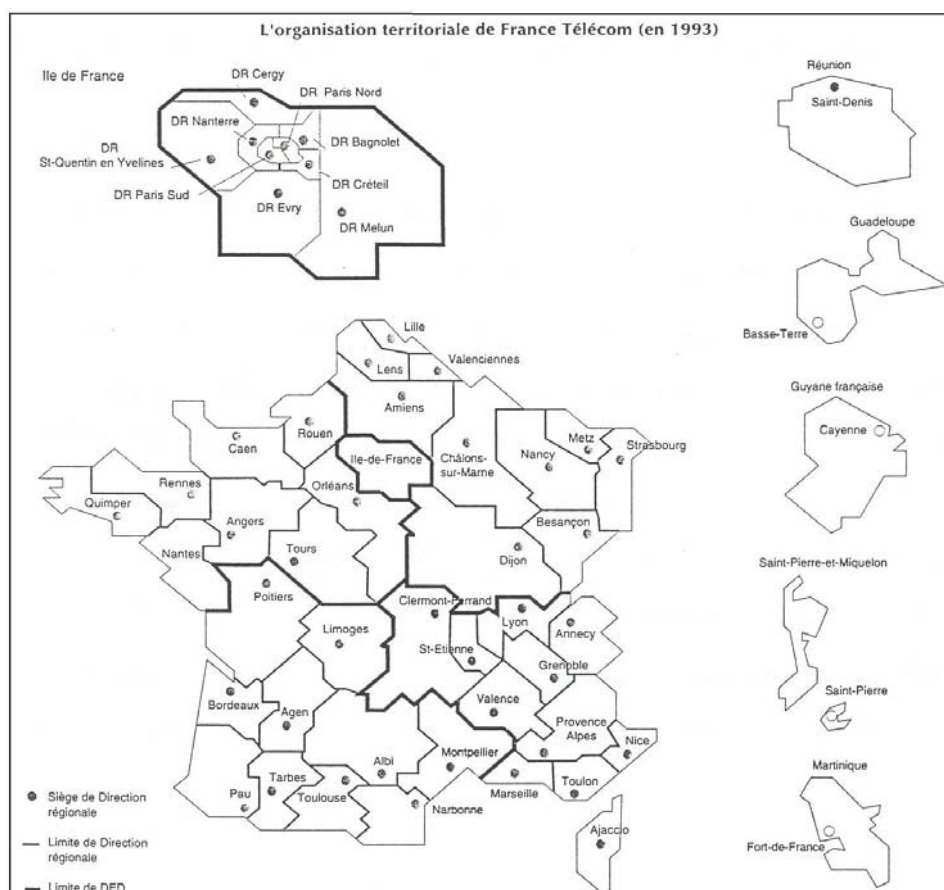
⁴² Bruno Lasserre, Comparaison avec les débats contemporains, in « L’Etat et les télécommunications en France et à l’étranger 1837-1987 ».

territoire français. Ainsi, l'origine du terme « *Delta LP* » remonte à un simple problème de classification : le tableau de bord ne comportait pas de pagination, de manière à pouvoir insérer des pages supplémentaires au dernier moment. Alors, pour identifier celles concernant le nombre de lignes principales raccordées, on les avait nommée *Delta LP*, « LP » comme « Ligne téléphonique Principale ».

Le problème principal était d'ordre financier. On va donc autoriser la DGT à recueillir des capitaux correspondant à l'équipement prévu, et fin 1969 une loi sera votée autorisant la création de sociétés de financement des télécommunications. En 1971, la DGT va investir 5 milliards de francs, dont 1,5 fournis par les sociétés de financement. Les investisseurs vont apporter, pour ce qui concerne la durée du VII^{ème} Plan, plus de 100 milliards de francs. A partir de 1974, la DGT devient le premier investisseur public français. L'endettement de la DGT va ainsi passer de 150 millions de francs en 1967 à 20 milliards en 1977, et les finances nécessaires à la mise en place du plan seront dégagées.

2.8.2 – Réforme de l'organisation territoriale des télécoms au niveau régional

En 1971, la DGT entreprend un vaste mouvement de réformes visant à faire évoluer les structures d'organisation régionale. Les deux premières Directions Opérationnelles, les DO, sont créées à Marseille et à Annecy, d'autres seront créées par la suite sur tout le territoire français. Plus petites que les Directions Régionales, les DR, les Directions Opérationnelles sont également plus proches des réalités du terrain.



Sources : Denise Fersing-Turck⁴³, 1995, France Télécom Branche Commerciale.

Figure 27 : Cartographie de l'organisation territoriale de France Télécom sur le territoire français en 1993

⁴³ Denise Fersing-Turck était Responsable (2000) du service Accueil Téléphonique (1014) à l'Agence Commerciale de France Télécom de Metz en Moselle.

Le développement du réseau téléphonique conduit également la DGT à restructurer le fonctionnement des Centres d'Abonnement et d'Entretien (CAE). En contact direct avec le terrain (gestion des centraux téléphoniques et des transmissions), ils constituent localement le lien essentiel de l'exploitation du réseau téléphonique. Les CAE et les Services techniques d'Exploitation sont désormais regroupés au sein des Centres Principaux d'Exploitation, les CPE. Trois fonctions principales leur sont dévolues : la responsabilité de la qualité du service et du bon écoulement du trafic, le suivi et la gestion des commutateurs et l'entretien des transmissions, l'exploitation des systèmes d'abonnés. La mise en place de ces nouvelles structures s'achève en 1974. Dès lors, les grandes régions françaises disposent de Directions Opérationnelles capables de gérer localement la croissance du réseau téléphonique. Elles peuvent s'appuyer sur des unités de base les Centres Principaux d'Exploitation (CPE), les Centres de Construction des Lignes (CCL) et les Agences Commerciales (AC), dont les fonctions respectives sont bien identifiés.

Comment savoir de quel Centre de Construction des Lignes (CCL) dépend votre commune :

- Chercher votre commune dans l'annuaire page blanche
- En dessous du bandeau indiquant le nom de la commune vous trouverez la circonscription tarifaire des abonnés de celle-ci. Reportez vous à la carte-ci dessous.
- La couleur des circonscriptions tarifaires vous indique le CCL dont votre commune dépend.

270 Hottviller

HOTTVILLER

Circ. tarifaire de : SARREGUEMINES
 57720 HOTTVILLER

Dérangements 13
 Services et renseignements commerciaux
 13 r Américains 57501 Saint AVOID
 cedex 14
 Sarreguemines 18

Comment joindre le CCL dont votre commune dépend :

<p>CCL de Thionville Chef de Centre : 82 55 73 01 Télécopie 82 53 75 80 15, Route de Manom BP 335 57311 Thionville Cedex</p>	<p>CCL de Metz Chef de Centre : 87 20 85 50 Télécopie 87 31 03 01 5, Rue Périgot BP 9014 57037 Metz Cedex 1</p>	<p>CCL de Sarreguemines Chef de Centre : 87 95 91 39 Télécopie 87 95 35 87 60, Route de Sarreinsming ZI de Sarreguemines BP 1157 57321 Sarreguemines Cedex</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

France Telecom

Sources : France Télécom, 1995, Direction Régionale de Metz.

Figure 28 : Répartition géographique des Centres de Constructions des Lignes (CCL) en Moselle

2.8.3 – Réforme de la politique industrielle de l'administration des PTT et de son statut

Dans cette première partie du plan de rattrapage, il était également question de réformer l'administration et son statut. En 1967, Valéry Giscard d'Estaing avait proposé la création d'une Compagnie nationale du Téléphone, mais le projet fut écarté. On parlera cependant plusieurs fois de la création d'un établissement public sur le modèle d'EDF. Rien ne se fera en apparence, mais la réalité sera très proche de cette proposition. La période qui s'ouvrait vit le bouleversement des structures organisationnelles des Télécommunications françaises et l'émancipation définitive des Télécoms de la tutelle postale. Considérant que la Poste et les Télécommunications avaient des activités très divergentes et exigeant des organisations caractéristiques, les différentes réformes vont conduire, au rythme d'une tous les deux ans, à une autonomie des Télécommunications. Une fois l'indépendance acquise, un objectif fut fixé à partir de 1971 : mettre en place une organisation régionale opérationnelle et capable d'assumer la modernisation des Télécoms dans tout le pays.

A partir de 1974, on va chercher à rapprocher l'organisation des Télécommunications de celles des grandes entreprises, avec la mise en place des techniques de management et de la direction par objectifs. Une bataille pour le leadership des télécommunications françaises va être engagée entre le CNET et la Direction Générale des Télécommunications, et le CNET sera finalement limité à ses activités de recherche. Cette bataille rangée s'est déroulée à l'occasion d'un désaccord sur l'opportunité de l'introduction d'une nouvelle technologie : la commutation temporelle⁴⁴. La DGT va hésiter à mettre en place le commutateur temporel issu des travaux du CNET, qui devait être commercialisée par la Compagnie Générale d'Electronique, société produisant des équipements pour les télécoms (câbles, commutateurs, etc.). Son rejet sera une stratégie de la part de la DGT pour éviter un monopole de la société CGE en France. Ainsi, la DGT prendra le contrôle des prix et des matériels de télécommunication, base de la politique industrielle. La DGT va ensuite lancer un appel d'offre afin de choisir l'équipement de commutation à mettre en place en France dans le cadre de la technologie intermédiaire, nommée « spatiale ». Les candidats sont nombreux et c'est la société Thomson qui semble le plus intéresser la DGT. En choisissant la technologie proposer par Thomson, la DGT va donc ainsi créer un concurrent à la CGE.

A dater de 1977, suite à la Conférence d'Atlanta, la communauté internationale se convertit au temporel, et la DGT est leader, subventionnant à la fois Thomson et la CGE, devenus concurrents. Finalement, le grand gagnant sera la société CIT-Alcatel (qui n'est alors qu'une P.M.E.) et ce grâce à un transfert de technologie du CNET.

Par-delà les conflits et les malentendus inévitables, ces réformes constituent un préalable à la nouvelle politique industrielle voulue par la DGT, fondée sur la concurrence entre les constructeurs, de façon à obtenir une qualité de matériel irréprochable. Le pari est ainsi gagné : la France, par le biais de ses commandes et subventions publiques, et d'un transfert de technologie, aura réussi à passer de sa situation de « pays retardé » à celle du pays qui tirera le mieux son épingle du jeu, par le biais d'une entreprise devenue acteur majeur de la scène mondiale des télécommunications. Au niveau international, la DGT demandera du reste aux deux sociétés au niveau du marché temporel (Thomson et la CGE) de travailler ensemble pour ce qui concerne l'exportation.

L'histoire du rattrapage c'est aussi la période où les Télécommunications expérimentent de nouveaux systèmes organisationnels. La Direction des Affaires Commerciales est créée en

⁴⁴ Il s'agit de la mise en place des centraux électroniques, et donc des premiers pas vers la numérisation.

1971, exprimant ainsi le nouveau centre d'intérêt des hommes et des femmes du téléphone : le client. En 1975, le téléphone est hissé au rang de priorité nationale, grâce au VII^{ème} Plan (1975-1980) de la loi de finance de l'Etat, qui apporte de nouvelles possibilités de financement aux Télécoms. L'administration des Télécommunications entreprend alors le grand rattrapage du téléphone. Du technicien à l'ingénieur, les hommes des Télécoms, réunis sous la bannière du « *Delta LP* », se dépensent sans compter pour faire du réseau téléphonique français l'un des plus moderne au monde. En 1978, « tous les éléments du grand projet sont réunis, tout concourt à faire du téléphone un grand chantier technologique national. Le programme est sur les rails tant du point de vue technologique, industriel que de la logistique des installateurs. La DGT est incontestablement maîtresse du jeu »⁴⁵. Le *Delta LP* est devenu un modèle.

Elie Cohen nous propose une analyse en huit points du modèle de grand projet tel qu'il a été structuré par l'expérience du Delta LP :

1. un statut juridique dérogatoire de droit commun créant « un hybride administration entreprise ». Dans le cas de la DGT, il s'agira de concilier le statut d'administration à celui « d'entrepreneur innovateur ».
2. un financement pré affecté qui permet d'éviter les contraintes du Ministère des finances et la budgétisation. Ce sera la création de sociétés financières du téléphone, et l'octroi d'une enveloppe budgétaire dans le cadre du VII^{ème} Plan.
3. une articulation pensée en association avec un organisme de recherche publique. C'est en effet la possibilité de transferts technologiques à partir du CNET qui sera l'un des vecteurs de la réussite du *Delta LP*.
4. un débouché assuré grâce à la commande publique et au soutien à l'exportation.
5. le pilotage du projet par une élite qui fera de celui-ci l'affaire d'un corps. Ce sera le rôle du corps des ingénieurs des télécommunications.
6. une volonté d'éviter une hégémonie « d'un hybride administration-entreprise » menant ce projet. C'est pourquoi la DGT obtiendra seule la maîtrise décisionnelle.
7. des critères de réussite non liés à la rentabilité à moyen terme, mais à la réussite d'un grand chantier « techno-industriel ».
8. la volonté politique initiale qui légitime le grand projet et les valeurs qui y sont attachées : progrès technique, indépendance nationale, autonomie technologique.

C'est sur cette même base que seront mis en place les politiques futures de rattrapage technologiques : le Minitel et le Plan Câble, mais aussi le T.G.V, Airbus, etc.

Concernant le rôle des collectivités locales dans ce processus, Bruno Lasserre⁴⁶ remarque que ce qui frappe dans les débats anciens comme dans les débats contemporains, c'est l'effacement de celles-ci⁴⁷. Au XIX^{ème} siècle, on avait tendance à considérer le téléphone comme un service local au même titre que la distribution d'eau. Elles furent totalement absentes du processus de rattrapage des années 1970. Il y a encore 15 ans, les élus locaux portaient souvent un manque d'intérêt sur le téléphone et Internet. Mais les choses ont changé depuis, car ces derniers ont pris conscience que les télécommunications étaient une enseigne attractive et essentielle pour les entreprises, avec les retombées économiques qui en découlent

⁴⁵ Elie Cohen, *Le Colbertisme « high tech », Economie des Télécoms et du Grand Projet*, op. cité.

⁴⁶ Bruno Lasserre est Maître des Requêtes au Conseil d'Etat, Directeur de la Réglementation Générale.

⁴⁷ Bruno Lasserre, *Comparaison avec les débats contemporains*, op. cité.

(engouement pour les technopôles, les téléports, ou « zones de télécommunications avancées »). La situation française est très caractéristique d'une gestion centralisée à l'extrême du système téléphonique. Pour ne citer qu'un seul autre exemple européen, F. Thomas⁴⁸ a montré comment techniquement et administrativement, le réseau allemand s'était construit sur un modèle « cellulaire » et les collectivités locales avaient donc joué un rôle important dans la mise en place de ce réseau du type cellulaire. Il faut remarquer, que la structuration du réseau téléphonique allemand sous la forme d'un réseau composé de mailles en forme de « cellules » avait déjà été démontré bien avant, en 1933, par le géographe Walter Christaller⁴⁹.

2.8.4 – Mise en œuvre du plan de rattrapage téléphonique

De 1970 à 1975, le nombre de lignes téléphoniques raccordées en France passe de 4 à 7 millions. Le VII^{ème} Plan, plus couramment appelé « le Plan téléphone », prévoit de faire passer le nombre d'abonnés de 7 à 20 millions d'ici les années 80 et d'automatiser l'ensemble du réseau téléphonique français.

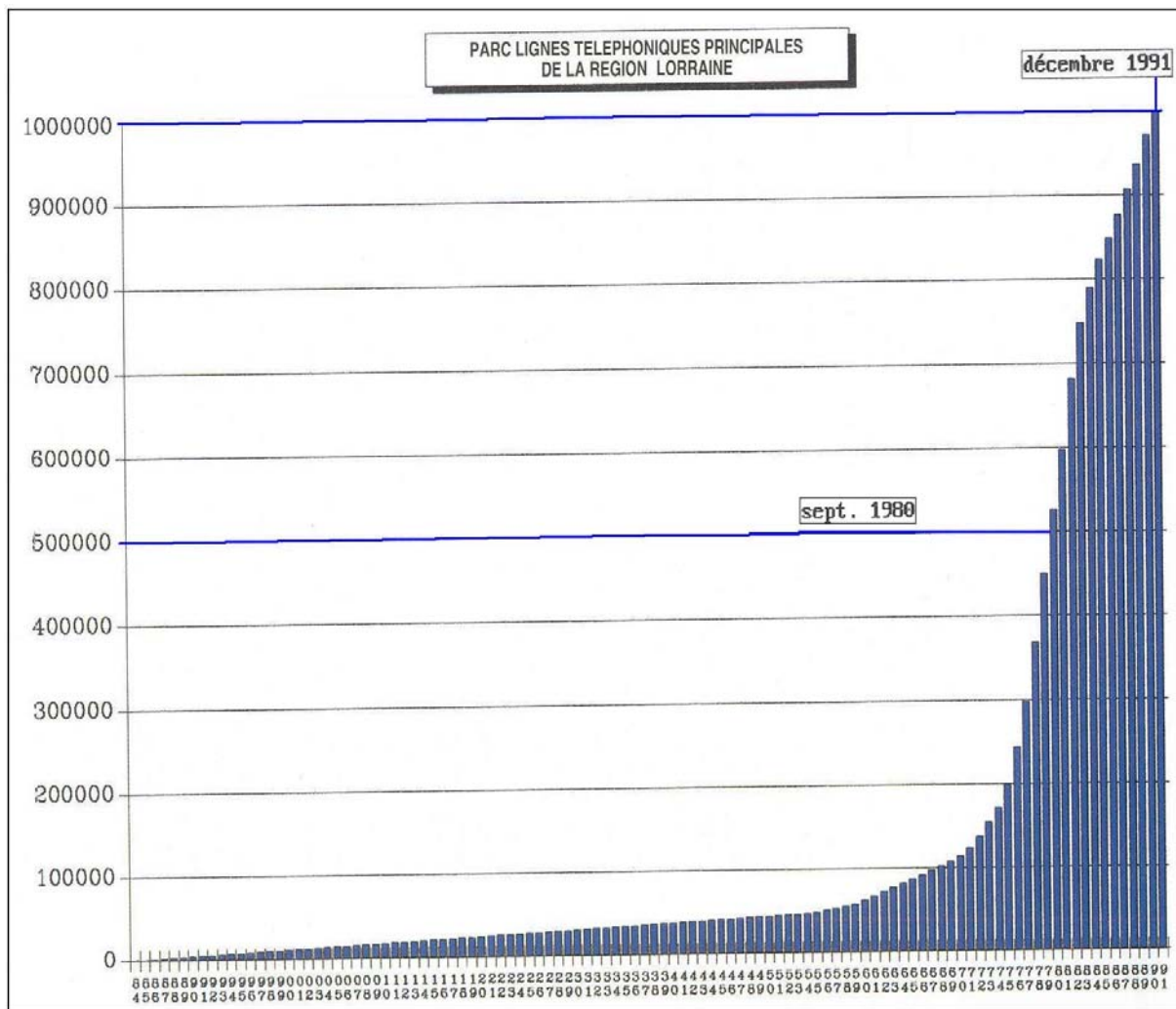


Figure 29 : Histogramme illustrant l'évolution du parc téléphonique en Lorraine entre 1884 et 1991.

⁴⁸ F. Thomas, *La régulation politique du téléphone en Allemagne depuis 1877 et son effet sur le développement du système téléphonique.*

⁴⁹ Walter Christaller fut Professeur de géographie en Allemagne au début du siècle. Il développa un modèle d'organisation de l'espace (le modèle de Christaller, 1933) qui dérive de la théorie des lieux centraux.

Les instruments de mesure mis en place dans le tableau de bord du plan de rattrapage téléphonique contenu dans le *Delta LP*, qui correspondent à des statistiques, au nombre de lignes principales, à la cartographie du réseau, aux flux de communication, aux programme d'équipements en lignes téléphoniques et en faisceaux hertziens, à des études de faisabilité, etc., contribuèrent à donner la rigueur nécessaire à cette marche forcée vers le rattrapage. La pression va s'exercer en particulier sur les Directions Régionales et les Directions Opérationnelles, responsables dans leurs zones de l'exécution des objectifs.



Sources : France Télécom, Direction Générale/Délégation à la Communication., 1995, *France Télécom. Mémoires pour l'action*, Editions France Télécom.

Figure 30 : Extrait du Tableau de bord, *Delta LP*, en 1974 : Réseau de faisceaux hertziens en Région Parisienne

En 1976, c'est l'explosion : le nombre des abonnés croît à une vitesse vertigineuse (Figure 29). Les deux constructeurs français de centraux téléphoniques (Thomson et la CGE) ont deux ans d'avance sur leurs concurrents, et les effectifs des Télécoms françaises s'accroissent de 30 %. L'objectif initial fixé par la DGT pourra ainsi être réalisé : 20 millions d'abonnés en 1982 en France contre 6,2 millions en 1974.

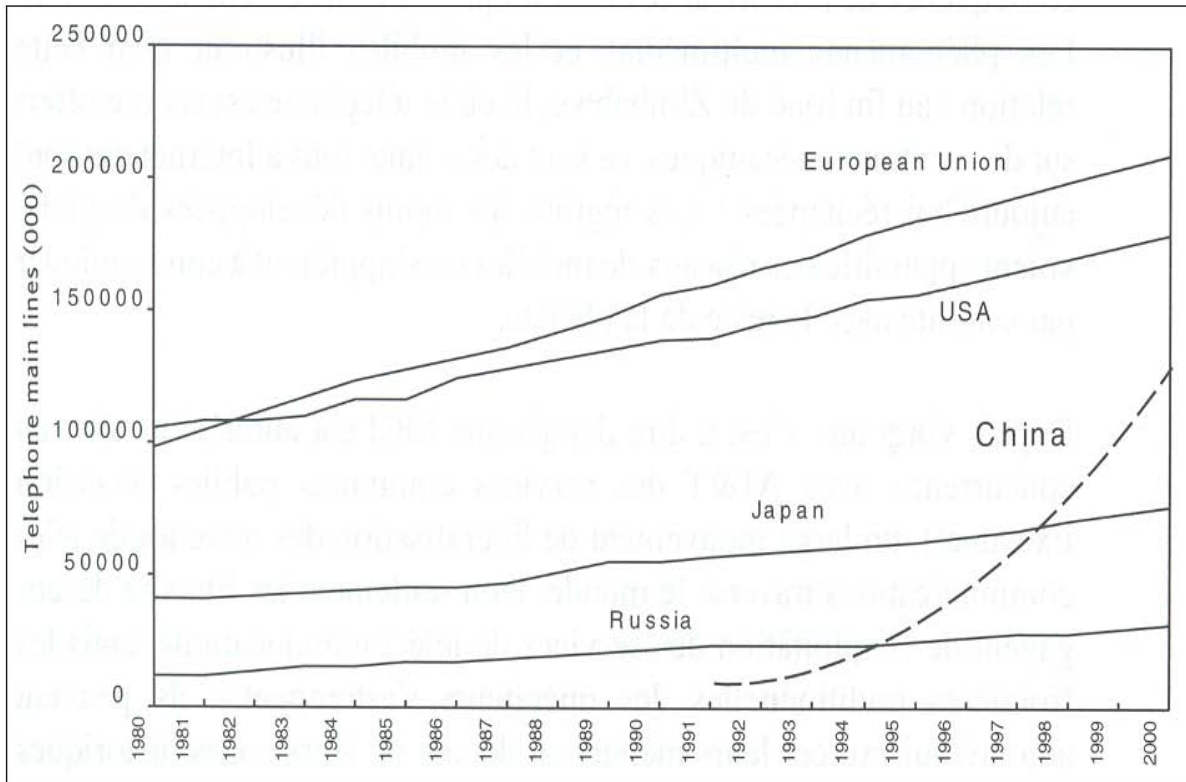
En 1976, la Direction de la Production crée un nouvel instrument de mesure, qui permet de connaître la qualité du service téléphonique : c'est l'Indice de Qualité du service, l'IQS. Il permet de connaître le temps d'attente de la tonalité, le pourcentage de panne, la vitesse de relèvement de dérangement. L'abonné peut ainsi bénéficier d'une qualité de service irréprochable.

En 1971, l'administration des Télécoms décide de séparer les services commerciaux des services d'exploitation technique. Cette décision a une double signification : la reconnaissance des fonctions commerciales des Télécoms et la modification des relations entre les abonnés et l'administration des Télécoms. Avec la création des Agences Commerciales, l'abonné accède enfin au statut de client et peut ainsi faire valoir ses besoins et préférences en matière d'équipement téléphonique.

En ce qui concerne les centraux téléphoniques, en 1974, trois types de matériels sont disponibles en commutation : les commutateurs électromécaniques Crossbar, les commutateurs électroniques spatiaux et les commutateurs électroniques temporels développés par le CNET. La DGT choisit le système de commutation électromécanique Crossbar, plus fiable, qui achèvera alors d'automatiser les zones urbaines et rurales en 1979. La DGT lancera par la suite un appel d'offre sur le matériel de commutation électronique, afin de pouvoir mettre en place dans les années 80 une nouvelle génération de centraux téléphoniques entièrement électroniques. Fin 1994, le dernier central électromécanique sera arrêté. Avec l'arrêt du dernier central Crossbar, la France devient le premier grand pays développé à être doté d'un réseau téléphonique entièrement électronique.

Evolution de la croissance des réseaux de téléphonie fixe depuis dix ans (1995–2005) :

Face à la croissance relativement stable des réseaux fixes occidentaux (Europe, USA, Japon, Russie), la progression des réseaux asiatiques et latino-américains est exponentielle (Chine, Thaïlande, Inde, Mexique, etc.). Dans le reste du monde, on ne constate pas de croissance des réseaux fixes remarquables, à part pour quelques pays encore sous-équipés, comme la Pologne ou l'Afrique du Sud par exemple. Ceci paraît étonnant car bons nombres de pays pauvres sont encore sous-équipés en moyens de télécommunications (Afrique, Amérique du Sud, etc.), mais leur ressources ne leur permettent pas de construire de réseaux leur but principal étant déjà de subvenir aux besoins de la population (alimentation, logements, routes, etc.). Ceci illustre bien la fracture entre les pays riches et le reste du monde, pauvre et sous-développé.



Sources : Etienne Turpin, 1999, *Des télécoms à l'Internet : économie d'une mutation*, Editions Eyrolles, Collection technique et scientifique des télécommunications, Paris.

Figure 31 : Les réseaux de téléphonie fixes : Croissance des plus grands réseaux mondiaux

	1995	2000		1995	2000
European Union	182 483	208 750	Iran	4 927	10 593
United States	156 487	179 080	Poland	5 566	9 515
China	41 250	125 657	Argentina	5 277	7 908
Japan	63 349	76 183	Malaysia	3 392	7 517
Russia	25 218	30 569	Thailand	2 866	6 286
Brazil	13 336	24 111	South Africa	3 961	5 785
Turkey	13 673	23 389	Indonesia	2 598	5 491
Korea	18 408	22 609	Switzerland	4 387	4 976
India	11 338	20 834	Colombia	3 636	4 783
Canada	17 608	20 391	Egypt	2 864	4 464
Mexico	9 536	16 468	Hong Kong	3 245	3 767
Ukraine	9 306	14 403	Venezuela	2 539	3 673
Taiwan	8 997	10 824	Pakistan	1 978	3 659
Australia	9 146	10 668	Chile	1 966	3 540

Sources : Etienne Turpin, 1999, *Des télécoms à l'Internet : économie d'une mutation*, Editions Eyrolles, Collection technique et scientifique des télécommunications, Paris.

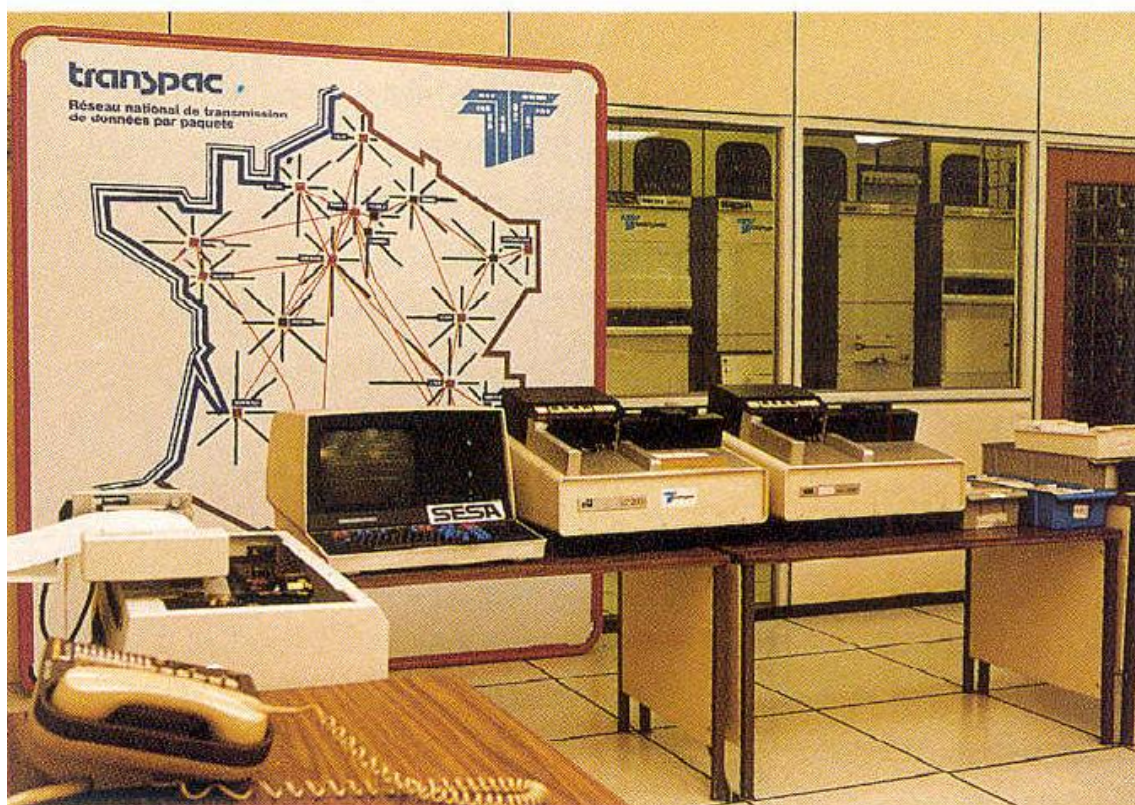
Figure 32 : Les plus gros réseaux fixes à l'horizon 2000 (en milliers de lignes principales)

2.9 – L’essor de la Télématicque

A la fin des années 1970, le *Delta LP* est en place, et la DGT se voit en devoir de mettre en place rapidement de nouveaux projets. Ainsi, sur le modèle du projet que nous venons de développer dans la partie précédente (Plan de financement, etc.) la DGT va donc mettre en place deux nouveaux projets : le Plan Câble et le Minitel.

Il faut remonter à 1972 pour trouver les tous premiers essais de télématicque⁵⁰ ; mais il faudra attendre 15 ans pour que l’on passe du stade de prototypes à celui de mise sur le marché des produits de télématicque. En 1977, Simon Nora et Alain Minc⁵¹ vont créer le néologisme « télématicque » dans leur rapport sur l’informatisation de la Société française. C’est cette année-là que vont se mettre en place les bases de la télématicque française.

Le projet de rattrapage téléphonique a été un grand succès, et le *Delta LP* est devenu le modèle en puissance pour un développement réussi. Il s’agit maintenant de lancer de nouveaux chantiers, et de trouver si possible de nouveaux marchés susceptibles d’accroître la consommation téléphonique des français. En juillet 1977 le réseau de transmission par paquets, *Transpac*, est créé (décret du 13 juillet 1977) et constitue le premier service de télématicque que la DGT proposa aux entreprises⁵². Il faudra rapidement trouver de nouveaux produits de télématicque.



Sources : France Télécom, Direction Générale/Délégation à la Communication., 1995, *France Télécom. Mémoires pour l’action*, Editions France Télécom.

Figure 33 : Le réseau Transpac en France : Réseau national de transmission de données par paquet

⁵⁰ Télématicque : confère lexique

⁵¹ Simon Nora et Alain Minc, 1977, *Rapport sur l’informatisation de la Société*, Editions du Seuil, Paris.

⁵² C. Bertho *et al.*, 1984, *Histoire des télécommunications en France*, Editions Erès, Toulouse.

Le conseil interministériel du 30 novembre 1978 va adopter le Plan « Nouveaux services liés au téléphone », qui comprends différents programmes : le développement de la Télématique (Terminal Annuaire Electronique (TAE) et Télétel), le poste téléphonique à fréquence vocale, le satellite Télécom 1, et enfin, le Visiophone.

Mais, il faut agir vite, car la bataille pour les normes « vidéotexte » fait rage en Europe. En effet, en Grande Bretagne, les Télécoms ont pris de l'avance par rapport au reste de l'Europe, ils ont déjà développé un standard vidéotexte, et en septembre 1979, le système de vidéotexte britannique, prénommé *Prestel*, qui permet la consultation de données par l'intermédiaire d'un écran télévisuel, est déjà commercialisé auprès du grand public.

L'objectif des Télécoms en France sera donc de mettre rapidement au point du matériel télématique, et de l'installer en France à très grande échelle, afin d'inonder le marché national avec un système de vidéotexte français, puis de se lancer à la conquête du marché international. La politique volontariste alors mise en place n'était autre que la création *ex-nihilo* d'un nouveau marché en utilisant les fruits des dernières recherches du CNET. L'idéologie était toujours encore de sortir la France de la crise par la mise en place d'un nouveau marché pour l'électronique industrielle française, et donc par la création de nombreux emplois dans l'industrie des télécoms. Enfin, la DGT considère qu'il y a là innovation sociale puisque le Minitel donnerait accès à tous les français à la télématique.

Les années 1981-1984 furent ainsi dédiées aux expérimentations dans le domaine de la télématique. On choisit le site de Vélizy pour expérimenter la télématique grand public et l'on proposa le service *Télétel*⁵³ à 2 500 personnes, 190 fournisseurs de services ayant été mis en place pour l'expérimentation. Mais les résultats de ces expérimentations ne seront que moyennement probants, comme l'on été d'ailleurs également les résultats des expériences en télématique faites en Allemagne par exemple, ou bien encore pour le développement du système *Prestel* en Grande-Bretagne : l'utilisation du produit par les clients fut restreinte et aucun enthousiasme ne perça chez les utilisateurs. Tout aurait pu faire penser à un arrêt de l'expérimentation dans le domaine de la télématique, mais l'expérience de l'annuaire électronique allait, au contraire, aider au soutien de *Télétel*.

En 1982, l'expérimentation de l'annuaire électronique auprès du grand public débute en Ile et Vilaine, avec comme appareil de télématique, un Minitel⁵⁴. Les résultats sont performants : temps de connexion rapide, fiabilité de la réponse, accès facile et allègement de la charge de travail des centres de renseignements téléphoniques (12). Forts des résultats des expériences de Vélizy et d'Ile-et-Vilaine, la DGT va décider d'étendre le service à l'ensemble du territoire national. Pour bien comprendre les motivations de la DGT, on peut rajouter que le projet d'annuaire électronique devait permettre d'éliminer à terme l'annuaire papier, déficitaire en France (contrairement aux USA).

Toutes les études commerciales disponibles en 1977, au moment de l'adoption du Plan Télématique, convergeaient sur le fait que quelque soit la qualité des services disponibles, personne n'achèterait un Minitel, même s'il ne coûtait « que » 600 francs.

Pour la DGT, il fallait donc rapidement casser le cercle vicieux « demande de minitel – offre de services ». En effet, l'utilisateur ne serait intéressé par le Minitel que s'il disposait d'une offre de service attractive, et que les fournisseurs de services ne développeraient des applications qu'à partir d'un certain seuil d'équipement de leurs clients potentiels, leur permettant un trafic rentable. Il fut donc décidé de distribuer gratuitement les Minitels « en remplacement de l'annuaire papier », auprès des abonnés volontaires.

⁵³ Télétel : confère Lexique.

⁵⁴ Minitel : confère Lexique.

L'ouverture du service Annuaire Electronique se fit progressivement en fonction des demandes exprimées par les Conseils Régionaux. Marie Marchand⁵⁵ démontre à ce propos, dans son ouvrage, que la télématique a permis de rompre avec le centralisme absolu qui prévalait auparavant dans les politiques de télécommunications en France.

Le minitel en quelques chiffres :

Nombre de Minitels installés :

En 1985, 1,3 millions de terminaux Minitel étaient installés.

En décembre 1987, la France comptabilisait 2,2 millions de terminaux dans son parc de Minitels.

Le système de facturation du Minitel :

Le succès du Minitel tient cependant également au système de facturation : le kiosque Télétel. Lors des premières années de fonctionnement du Minitel, un prestataire de service n'avait que deux solutions : soit offrir son service gratuitement, soit avoir recours à l'abonnement. Décidé en 1983, introduit en 1984 et généralisé en 1985, le système de facturation « kiosque télématique » propose cinq niveaux de prix différents correspondant à quatre numéros d'appels différents (3614, 3615, etc.). A la fin des années 1980, ce système couvrait plus de 70 % du trafic, et c'est France Télécom⁵⁶ qui joua le rôle de prestataire de service entre le serveur télématique et les clients. France Télécom se charge de la facturation et du recouvrement par le biais des factures téléphoniques, et reverse aux fournisseurs de services, via les serveurs, la part qui correspond à la valeur du service rendu.

L'offre de service fournis par le Minitel :

Concernant l'offre de service, elle était de 145 services en 1984, 2071 deux ans plus tard, et de 4400 services en janvier 1987.

L'objectif d'accroître la consommation téléphonique a donc été pleinement atteint, grâce à la mise en place de Télétel, mais, deux autres objectifs sont à mettre au chapitre des échecs : l'exportation du Minitel à l'étranger, et l'offre d'une alternative télématique crédible face à la microinformatique grand public.

Les difficultés d'exportation s'expliquent notamment par le fait que le système britannique *Prestel* avait fait plus tôt l'objet d'une large diffusion en Europe, et d'autre part, car le marché européen a été freiné par de nombreuses expériences télématiques aux résultats très médiocres.

Concernant l'alternative à la microinformatique grand public, le choix stratégique de développement s'est avéré mauvais puisque le problème était posé en terme de substitution de la télématique à l'informatique. L'histoire récente des dix dernières années (1995-2005) nous a montré qu'il y avait en réalité complémentarité entre l'informatique et les offres de service en télématique, et qu'il aurait plutôt fallu développer un produit compatible avec les microordinateurs grands publics, qui ont vu leur nombre exploser depuis 10 ans. A terme, dès le milieu des années 80, le Minitel est devenu obsolète face à l'apparition du réseau Internet et de la microinformatique grand public. Le Minitel a induit, en France, un retard d'équipement du grand public en connexions au réseau mondial *World Wide Web*, le fameux réseau *Internet*. La France mettra plusieurs années à rattraper le retard en matière de développement du réseau Internet par rapport aux autres pays européens.

⁵⁵ Marie Marchand, *Histoire d'une innovation : la télématique en France et à l'étranger, 1972-1987*.

⁵⁶ C'est en 1988 que la Direction Générale des Télécommunications change de statut et devient « France Télécom », entreprise publique, à l'image de British Telecom.

En 1997, la société Alcatel a bien tenté de dépasser les limitations du Minitel en mettant au point un « *Webphone* », terminal grand public permettant, outre de téléphoner, d'avoir accès à Télétel et à Internet⁵⁷. L'objectif affiché d'Alcatel était de détenir 25 % du marché mondial des téléphones Internet. La commercialisation du Webphone débuta en 1998, mais ce fut un échec, la microinformatique grand public, reliée au réseau Internet par des modems, ayant pris le relais depuis 1996. On remarquera que le *Webphone* était encore une fois un produit strictement limité à la télématique, l'articulation avec l'informatique étant absente, ce qui fut là la cause de son échec commercial.

Le Directeur Général de la DGT, Gérard Théry (1974-1981), aura mené une politique industrielle considérée pour certains comme étant « mégalomaniaque »⁵⁸. Ses projets, nés d'un gouvernement libéral, ont été repris par les gouvernements de gauche dans les années 1980. Ces choix politiques, dirigistes, ont été en harmonie à la fois avec l'idéologie libérale et avec l'idéologie socialiste. D'un côté, il s'agit, à l'abri d'un Etat souverain, d'accumuler des ressources pour combler un retard avant d'affronter le marché international. D'un autre côté, elles alimentent l'idéologie industrialiste du modèle socialiste de la sortie de la crise par les nouvelles technologies. Le modèle du grand projet a été une réussite mitigée dans le cadre de la Télématique : réussite nationale dans un premier temps (années 1985-1995), puis retard accumulé en informatique et en nombre de connections à Internet (années 1995-2004) ; et enfin échec à l'exportation du Minitel. Dans les années 1990 c'est le modèle de réseau de télécommunications mis au point par les américains, le réseau *Internet*, qui a pris le relais de la Télématique au niveau mondial. L'explosion de l'informatique à partir de 1995, puis du haut débit, a vu l'avènement des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication, les NTIC.



Sources : France Télécom, Direction Générale/Délégation à la Communication., 1995, *France Télécom. Mémoires pour l'action*, Editions France Télécom.

Figure 34 : Photographie d'un Minitel 1.



Sources : France Télécom, Direction Générale/Délégation à la Communication., 1995, *France Télécom. Mémoires pour l'action*, Editions France Télécom.

Figure 35 : Photographie du premier modèle de poste téléphonique permettant la visioconférence.

⁵⁷ Alcatel prépare le Webphone, journal *Online*, numéro 58, 16 juin 1997.

⁵⁸ Marchand M., 1987, *La grande aventure du Minitel*, Editions Larousse, Paris.

2.10 - Mise en œuvre du réseau câblé

Utilisée dans les câbles de transmission, la fibre optique, composée de minces cheveux de silice pure, remplace le courant électrique par des ondes lumineuses. Les câbles en fibres optiques transportent indifféremment l'image, le son et les données, et permettent ainsi des liaisons à très haut débit. Les premières études dans le domaine des télécommunications optiques ont été menées aux Etats-Unis dans les années 1960.

C'est à la fin des années 1970, que l'administration des Télécoms décide l'exploration de la technologie de transmission du signal par l'intermédiaire de fibres optiques. Après l'installation du premier réseau câblé en fibre optique, permettant à la fois de tester la télévision par câble et la visiophonie développée par les chercheurs du CNET, le gouvernement décide alors d'équiper la France d'un vaste réseau câblé de télécommunications en fibre optique. Dès lors, les Télécoms français deviennent l'un des principaux câblo-opérateurs. Mais, l'installation des câbles en fibre optique demeure très onéreuse, et est donc abandonnée au profit d'une solution mixte (câbles coaxiaux et câbles en fibre optique).

La fibre optique étant particulièrement bien adaptée aux liaisons à grand débit, elle sera utilisée pour les câbles sous-marins. Le premier câble sous-marin en fibre optique reliant la Corse au continent est posé en 1987. En 1988, c'est le premier câble sous-marin transatlantique à fibre optique, le TAT 8, qui est mis en service.

Cette innovation technologique va bouleverser le monde des télécommunications, qui voit alors la capacité de ses réseaux s'accroître considérablement. France Télécom va devoir apprendre à gérer le haut débit et la multitude des informations qu'il faut apprendre à utiliser et à valoriser, notamment au sein du Réseau Numérique à Intégration de Services, le RNIS, ouvert en 1988.

A la fin des années 1970, la DGT entreprend de front deux grands projets : d'une part le projet Télématique ; d'autre part, la DGT décide d'élargir le champ de ses activités et cherche à mettre en place son réseau du futur : le réseau numérique à large bande. La France accuse un retard en matière de télédistribution, le CNET dispose de différents produits qui semblent alors au point et adaptés à l'audiovisuel, la DGT cherche de nouveaux grands projets pour se donner un nouveau souffle et élargir son champs d'activité : ce sera une autre occasion de mettre en place un plan de rattrapage, le Plan Câble.

Si le Plan Câble a vu le jour en 1982, des expériences de télévision par câble avaient déjà débutées en 1973 dans sept villes, mais se sont arrêtées en 1975 du fait d'une inquiétude gouvernementale quant à une communication locale incontrôlée. A Biarritz, il fut possible de justifier l'expérience par des zones d'ombres à la réception hertzienne : ce cas fit école. La ville de Metz sera l'une des villes pionnières dans la mise en place un réseau câblé à la fin des années 1970 et refusera de se résoudre à arrêter l'expérience, malgré quelques problèmes juridiques. Elle obtiendra finalement une autorisation dérogatoire d'exploitation, mais ne cherchera pas à mettre en place de chaîne de télévision locale.

A partir du milieu des années 1970, la DGT va chercher à équiper le pays en artères de communication à haut débit, elle va former deux pôles : un autour de Saint-Gobain Thomson et un autour de la CGE. Une Direction de la Communication Optique (DCO) va fonctionner dans ce but à la Direction des Affaires Industrielles et Internationales (DAII) de 1979 à 1981. C'est une équipe du CNET qui sera à la tête de cet organisme.

Le gouvernement adoptera, en novembre 1982, le plan de développement des réseaux câblés de vidéocommunication, plus couramment appelé le « Plan Câble ». Ce plan était soutenu par un engagement financier de l'Etat de plus de cinquante milliards de francs sur quinze ans et

basé sur des options technologiques d'avant-garde (fibre optique, réseau en étoile). Il avait pour objectif l'édification progressive de réseaux numériques multiservices permettant, à terme, d'envisager l'offre d'une vaste gamme de services et de programmes. Répondant à un triple enjeu (industriel, culturel et social), ce plan portait la marque des grands projets, dans la ligne du volontarisme à la française. Il revenait aux collectivités locales, en conformité avec la décentralisation, l'initiative de la décision de câblage. Ce fut la première fois que les télécoms et les collectivités territoriales étaient partenaires dans un grand projet d'aménagement du territoire ce qui eu un impact positif sur le développement de réseaux de télécommunications sur le territoire français : le niveau local était mieux appréhendé grâce à l'action des collectivités territoriales locales (les petites communes, les districts urbains, les départements), qui connaissent mieux l'espace géographique local et ses spécificités, et exercent leurs influences (aménagement, finances, etc.) directement au niveau local. Ceci a permis une meilleure organisation et une meilleure planification dans la mise en place des réseaux de télécommunications par câbles à travers tout l'espace géographique français, en prenant en compte les aspects topographiques (relief), les aspects sociaux (la notion de « service universel »), les aspects aménagement du territoire (optimisation d'un réseau), les aspects politiques, les aspects financiers (coût de revient du réseau, rentabilité), etc.

Ce plan de câblage en fibres optiques a été créé afin de disposer d'une alternative aux télécommunications par satellites commerciaux, de permettre le développement de chaînes télévisées de proximité, en un mot, de rattraper le retard français en matière de télécommunications et téléservices par câbles.

L'initiateur du Plan Câble fut Albert Glowinski, qui avait dirigé un groupe de travail sur les usages des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication⁵⁹, à la demande du directeur général des télécommunications, Gérard Théry. Dès 1976, ce groupe prévoyait que l'avenir des télécommunications était dans l'image et les réseaux. L'idée mise en avant fut celle de la profusion d'images, de l'interactivité et de la défense de l'identité nationale⁶⁰. Il s'agira de développer un réseau large bande en fibres optiques capable de véhiculer indifféremment à très haut débit la voix, le son, l'image et les données informatiques sur un mode interactif.

L'arrivée de la Gauche au pouvoir en 1981 va propulser bon nombre des membres de cette commission à des postes décisionnels, et la volonté de câblage de la France en fibres optiques va ainsi devenir une réalité sur le terrain. Selon Jean-Paul Simon⁶¹, l'objectif du Plan Câble est multiple. On notera notamment la volonté de donner aux collectivités locales la maîtrise de la mise en œuvre du câble au niveau local, ainsi que le rapprochement de la DGT du domaine d'activité de Télé Diffusion de France, TDF (quelques années plus tard TDF deviendra filiale de France Télécom, avant de devenir une société indépendante en 2004).

Le Plan Câble va alors connaître un rebondissement qui sera le premier d'une longue série noire : le principal opposant à Gérard Théry (le DG des Télécoms) lui succède à la tête de la DGT, suite à l'arrivée de la Gauche au pouvoir, et de nouvelles décisions au niveau de l'industrie des télécoms vont être prises. Une nouvelle cellule sera mise en place : la Délégation Aux Vidéocommunications (DAV). On va alors décider d'abandonner la fibre optique, et de remettre en question le principe des avances remboursables. En effet, les résultats de l'appel d'offre lancé auprès des industriels pour la fourniture de réseaux en fibres optiques vont poser un grave problème de faisabilité technique, entraînant un coût de raccordement infiniment plus élevé et une impossibilité de partage financier avec les

⁵⁹ A. Glowinski, 1980, *Telecom objectif 2000*, Editions Dunod, Paris.

⁶⁰ On retrouve ici l'argumentation de la téléphonie des années 1960 et 1970, mais aussi celle des années 1990 avec l'avènement des expériences dans les Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication.

⁶¹ Jean-Paul Simon, 1987, *L'enfance du câble*, Editions du CNET, Paris.

communes. De plus, la fibre optique et l'architecture prévue (développée par le CNET) ne sont pas encore au point. Il serait en effet impossible de réaliser la solution technique envisagée, c'est-à-dire la 1G (première génération), celle-ci n'étant pas prête technologiquement. On, va donc choisir une solution mixte (dénommée 0G, génération 0) alliant la fibre optique pour les grands axes et le coaxial pour la distribution aux immeubles.

Une autre difficulté résidait dans les autorisations administratives multiples nécessaires à la construction et la gestion de tels réseaux. Il fallait pour la commune demander une autorisation de construction à la DGT, demander une autorisation à la haute autorité de l'audiovisuel, signer une convention entre la DGT et la Société Locale d'Exploitation du Câble (SLEC), cette SLEC devant à son tour négocier avec TDF (qui avait à l'époque le monopole de la télédistribution). Il y avait là de quoi décourager plus d'un élu local, et créer plus d'un blocage avant l'autorisation finale.

A partir de 1984, on va observer de nombreux et importants conflits au sein même de la DGT à propos du Plan Câble. La situation générale est très critique : la fibre optique n'est pas exploitable, les collectivités locales se scandalisent des lenteurs de la DGT, et le Plan Câble se vide petit à petit de sa substance.

Le Câble devra également affronter des outsiders créés par le gouvernement, qui correspondent au lancement des nouvelles chaînes hertziennes : Canal Plus en 1984, puis la Cinq et la Six en 1985. Le gouvernement va alors mettre en place une instance de régulation : la mission câble. Celle-ci va faire pression afin d'assouplir les décrets en préparation sur les exploitants des SLEC (les sociétés d'économie mixte chargées d'exploiter commercialement les réseaux). De part l'échec du partenariat entre la DGT et les collectivités locales, ces dernières, conscientes du risque financier qu'elles encouraient, ont limités, en totale contradiction avec l'esprit premier du plan Câble, leurs engagement financier dans les SLEC. Le pire des scénarios possible pour la DGT va alors se mettre en place, puisque les SLEC vont, pour une grande partie d'entre elles, concéder l'exploitation de leurs réseaux à des sociétés qui se retrouvent bientôt en situation d'oligopole : la Générale des eaux, la Lyonnaise des Eaux, et la Caisse des Dépôts et Consignations. Partenaires privilégiées des collectivités locales, possédant une structure financière suffisante, habituées à asseoir leur rentabilité sur le long terme et désireuses d'investir dans la communications, ces sociétés ont alors occupé un marché que peu d'entreprises auraient été en mesure de prendre.

En 1988, la droite revient au pouvoir et Gérard Longuet est nommé à la tête du ministère des Postes et des Télécommunications. La loi sur la liberté de communication de septembre 1986 va alors retirer à l'administration française des télécommunications le monopole qu'elle détenait en matière de construction de réseaux câblés et va limiter les usages du câble à la seule télédistribution. Cette loi n'a fait en réalité que prendre acte du quasi abandon du Plan Câble. Fin 1986, Les télécoms n'avaient signés que 52 conventions, 200 collectivités locales étaient concernées, pour un potentiel d'environ 6 millions de prises. L'investisseur public se trouve ainsi dans une situation inconfortable avec sur les bras un projet qui n'a plus de légitimité politique et qui s'avère, en tant qu'opération industrielle, financièrement désastreux. D'autre part, le système fibre optique permettait finalement moins de possibilités techniques que l'ancien système, le coaxial.

De 1986 à 1988, la DGT va donc exécuter les obligations contractées lors de la signature des conventions. L'investissement n'est pas rentable, mais il a le mérite de va pas mettre l'activité entre les mains d'opérateurs étrangers qui auraient vu là une infrastructure permettant à terme une remise en cause du monopole sur la téléphonie⁶². Durant cette période, le gouvernement

⁶² La fin du monopole de France Télécom au premier janvier 1998, ainsi que les multiples expériences de téléphonie sur le câble menées au milieu des années 1990, nous montrent que ce scénario était bien de l'ordre du possible.

lancera un nouveau pavé dans la marre en suscitant un nouveau concurrent au câble : le satellite TDF 1 sera lancé en 1987.

Il sera suivi du projet de télévision à haute définition (TVHD). Cette logique semble pour le moins contradictoire, et pour comprendre les méandres décisionnels du Plan Câble, il convient de rappeler les intérêts principaux en présence :

- pour le CNET, il s'agit là de reproduire le modèle du plan de rattrapage téléphonique des années 1970. Des enjeux en terme de recherche et de développement industriel sous tendent à nouveau ce projet.
- Pour la DGT, il s'agit de pouvoir s'offrir un marché nouveau, jusque là chasse gardée de TDF, et ce en construisant à moindre frais un réseau qui sera nécessaire à de multiples usages d'ici la fin du siècle. Un autre avantage du câble était de canaliser les bénéfices vers de nouveaux investissements, et donc de ne pas voir ceux-ci reversés au budget général de l'Etat. Cette stratégie comportait pourtant un risque puisque l'audiovisuel n'est pas le métier de la DGT.
- Pour les collectivités locales, il s'agissait de pouvoir s'octroyer un nouveau domaine de compétence, dont l'image futuriste ne pouvait être que bénéfique à l'équipe en place.

Ce sont ces différents intervenants, développant des stratégies très différentes voire opposées, qui vont mener à la paralysie du système.

En 1982, les prévisions avaient été très positives : on attendait 1,5 millions de foyers câblés avant fin 1987. Dans la réalité, on comptait en septembre 1988 environ 35 000 abonnés pour 670 000 prises installées, soit un taux de pénétration inférieur à 6 %. Le réseau le plus important est alors « hors Plan Câble » : il s'agit de celui de la ville de Metz, géré durant cette période par la caisse des Dépôts et Consignations⁶³. De 1988 à 1990, la Gauche va tenter de remettre à flot le Plan Câble, mais en vain.

On retiendra surtout du Plan Câble une mauvaise coordination entre des objectifs centraux lointains, et l'initiative isolée des collectivités locales assumant seules les coûts. Le Plan Câble abandonné, il laissera de nombreuses collectivités endettées. On imagine alors facilement l'origine de la réticence de nombreuses communes françaises dans les années 1995-2000 pour se lancer dans l'aventure de la mise en place du réseau Internet, et ceci d'autant plus qu'on y retrouvait la volonté politique à terme de câblage du territoire en fibres optiques.

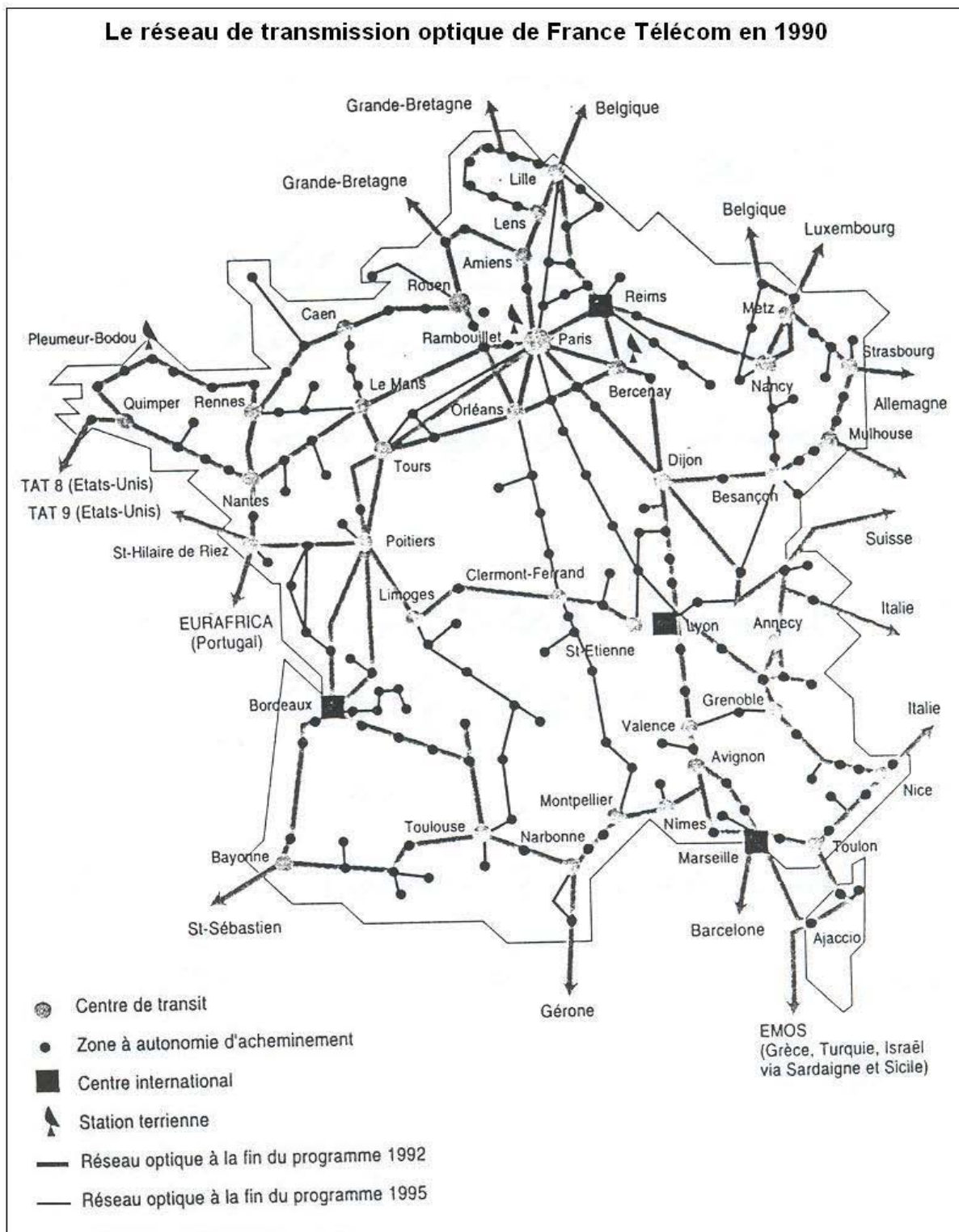
Les premières années du câble furent celles de la négociation et des retournements. Elles ne mettaient en scène que des acteurs institutionnels (Ministère et DGT, collectivités locales, opérateurs). Le succès aurait peut-être été au rendez-vous si l'on avait pris en compte le comportement d'un acteur jusqu'ici presque oublié, alors qu'il joue un rôle essentiel dans l'utilisation de tout réseau de télécommunication, c'est-à-dire l'individu, le client.

Evolution de la croissance des réseaux câblés dans le monde depuis 10 ans (1990-2000) :

La câblodistribution forme, avec les mobiles et le fixe, la troisième catégorie de réseau de télécommunications, et peut aujourd'hui prétendre concurrencer les réseaux téléphoniques. La répartition de ce type de réseaux à travers le monde est très variée, certains pays ayant, pour des raisons historiques économiques ou politiques, favorisé le développement de la câblodistribution (USA, Benelux, etc.), alors que d'autres, pour des raisons inverses, ne disposent malheureusement encore en l'an 2000 d'aucun réseau câblé : c'est le cas de l'Italie.

⁶³ Dans les années 1990, la gestion du réseau messin va revenir à TDF.

Les pays de grande superficie, comme les USA et la Chine, se situent en tête des pays disposant des plus grands réseaux câblés.



Sources : Christine Turck, 1995, *Les Télécommunications : une nouvelle approche de l'espace*, Mémoire de Géographie Administrative, DEUG II, Faculté de Géographie, Strasbourg.

Figure 36 : Cartographie du réseau de transmission optique de France Télécom en 1990

2.11 – Mise en place du réseau Internet dans les années 1990

Le développement des communications semble être l'un des points caractéristiques de la mondialisation de l'économie qui marquera les années 1990. Tant du point de vue économique que politique, l'information apparaît comme une notion à part dans le monde des échanges commerciaux, et l'arrivée de nouvelles technologies de réseaux donne lieu à une redistribution des différents rôles d'acteurs de la communication. Le premier volet important de la mise en place des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication est la mise en place d'une nouvelle réglementation des télécommunications mieux adaptée, le second est la mesure de l'intervention de l'Etat.

2.11.1 - Origines des NTIC

Le projet d'autoroutes de l'information trouve son origine aux Etats-Unis. L'idée fut lancée durant la campagne présidentielle de Clinton, et le principal instigateur en sera Al Gore, vice président américain⁶⁴. Ces politiques devaient avoir les mêmes fonctions symboliques que le plan de la construction des autoroutes des années 1930 dans le cadre du New Deal⁶⁵. En effet, il s'agit là d'augmenter la performance du pays, tout en donnant accès à ces nouvelles technologies aux régions rurales, aux milieux défavorisés et aux écoles. Les usages qui sont mis en avant correspondent également à l'argumentation de mise en place des grands programmes d'innovation technologique : télémédecine (possibilité de diagnostic à distance), éducation, lutte contre le chômage, etc.

Le plan présenté par l'administration américaine pour promouvoir le *National Information Infrastructure* comprend neuf points :

1. promouvoir l'implication du secteur privé pour un investissement plus actif.
2. étendre le concept de « service universel »⁶⁶ pour s'assurer que les sources d'information soient accessibles pour tous et à des prix raisonnables.
3. agir comme catalyseur pour promouvoir la recherche, l'innovation technologique et les nouvelles applications⁶⁷.
4. promouvoir un fonctionnement fluide, interactif et répondant aux besoins des usagers (standardisation et interopérabilité).
5. assurer la sécurité de l'information et la sécurité des réseaux.
6. améliorer la gestion du spectre des fréquences radio.
7. promouvoir la protection de la propriété intellectuelle.
8. coordonner les différentes administrations concernées et se concerter avec les pays tiers.
9. fournir l'accès à l'information administrative et améliorer les procédures d'achat public

⁶⁴ W. Clinton, A. Gore, 22 février 1993, *Technology for America's Economic Growth. A New Direction to Build Economic Strength*.

⁶⁵ L'expression « autoroutes de l'information » possède, dans l'imaginaire américain, une portée symbolique beaucoup plus forte que dans l'imaginaire européen puisque, au-delà du New Deal, il y a référence à la construction des voies ferrées et donc à la conquête de l'Ouest. On comprend alors mieux les raisons psychologiques du succès de ce plan Outre Atlantique.

⁶⁶ Service universel : confère Lexique.

⁶⁷ *The National Information Infrastructure – Agenda for Action – information Infrastructure Task Force*, 12/05/1993.

Il n'est en revanche fait aucune mention explicite de la façon dont ces objectifs vont être traités. Le point central du programme est de relancer la croissance par de nouvelles infrastructures.

2.11.2 - Genèse et croissance des NTIC en Europe

En Europe, deux étapes contradictoires marquent la mise en place des politiques concernant les réseaux de l'information : le Livre Blanc et le Rapport Bangemann.

Le Livre Blanc « Croissance, compétitivité, emploi »⁶⁸ présenté en décembre 1993 au Conseil des chefs d'Etats et de gouvernement, en réaction au programme américain, fit entrer l'Union Européenne à une cadence accélérée dans la course vers le développement des autoroutes de l'information en Europe. Ce document fut le fruit d'un intense débat entre les services de la Commission Européenne, les services les plus concernés par les télécommunications défendant pour leur part une approche très similaire à celles des américains (avec comme premier objectif l'infrastructure), alors que les services plus généraux étaient plus favorables à la notion de société de l'information.

L'enjeu est évidemment de ne pas se faire dépasser par les américains, et l'on peut ainsi lire dans le Livre Blanc : « Les Etats-Unis ont pris de l'avance : 200 de leurs plus grandes entreprises utilisent déjà les autoroutes de l'information. Au cœur du modèle de développement du XXI^{ème} siècle, c'est un enjeu crucial pour la survie ou le déclin de l'Europe. » On peut évidemment se demander si l'Europe ne réagirait pas par « mimétisme » au plan américain, et l'on ne peut pas exclure totalement cette hypothèse. Il semble pourtant plus probable que l'on trouve là le résultat d'un effort de concertation plus poussé au niveau international⁶⁹.

Le plan d'action proposé par ce Livre Blanc pour les autoroutes de l'information, le fameux réseau *Internet*, comporte 5 domaines prioritaires :

1. la diffusion de l'exploitation des technologies de l'information (lancement de projets européens d'applications et de services d'intérêt public ; télétravail).
2. la dotation de l'Europe en services de base transeuropéen (développer les réseaux, assurer leur interopérabilité, renforcer la coordination entre les politiques de télécommunication et les interventions des fonds structurels).
3. poursuivre la mise en place d'un cadre réglementaire adapté (supprimer les distorsions de concurrence⁷⁰, fourniture d'un service universel, accélérer le processus de normalisation, étendre le droit de la propriété intellectuelle).
4. développer la formation aux nouvelles technologies (généralisation des NTIC dans l'enseignement et la formation, formation adaptée d'ingénieurs et de chercheurs).
5. renforcer les performances technologiques et industrielles (renforcer l'effort de recherche et développement, valoriser les applications industrielles, négociations internationales pour un marché équitable).

⁶⁸ Livre Blanc – Commission Européenne, décembre 1993, *Croissance, compétitivité, emploi – Les défis et les pistes pour entrer dans le XXI^{ème} siècle*.

⁶⁹ C. Bennet, 1999, *Different Processes, One Result: The Convergence of Data Protection Policy in Europe and in the United States*, University of Toronto Press.

⁷⁰ En réaction aux politiques de déréglementation des télécommunications aux Etats-Unis (privatisation des Télécoms), la Commission Européenne publie en 1987 son Livret Vert sur les télécommunications, et commencera ainsi à mettre en œuvre des politiques similaires de privatisations des télécoms.

L'investissement massif dans le secteur des télécommunications (et donc dans le réseau *Internet*) reste, dans ce Livre Blanc, un facteur important. Un rapport va pourtant modifier ces priorités, et c'est sous l'impulsion de Martin Bangemann qu'une commission d'industriels va remodeler ces politiques. En effet, afin de ne pas apparaître comme s'engageant dans une politique d'intervention industrielle de grande ampleur, le Conseil Européen a demandé « qu'un rapport soit établi par un groupe de personnalités pleinement représentatives de toutes les industries concernées dans l'Union, des utilisateurs et des consommateurs »⁷¹. L'influence des milieux de l'Industrie (informatique surtout) a été moins marquante qu'aux Etats-Unis dans cette phase de mise en place des programmes, et il s'agissait de démontrer à travers cette demande que les politiques proposées étaient destinées à « compléter et stimuler le fonctionnement du marché » et non à le créer de toutes pièces. Ce groupe de personnalités a établi un rapport intitulé « L'Europe et la société de l'information planétaire ». Concernant le financement européen, on y lit que « les investissements publics seront nécessaires, non pas sous forme d'un accroissement des dépenses publiques d'une manière générale, mais plutôt sous la forme d'une redistribution des dépenses actuelles. Une part des investissements que devront consentir les pouvoirs publics, en vue d'application en ce domaine, se traduira par des gains de productivité et par une amélioration de la qualité des services qui devraient permettre de réaliser des économies »⁷².

Il faut savoir que dans ce regroupement de personnalités, les représentants des opérateurs de télécommunications se trouvent en petite minorité. Ce sera donc l'occasion pour les milieux de l'industrie de pousser à son maximum en direction de la déréglementation du secteur des télécommunications⁷³. Le message essentiel du rapport est très clair : il faut rompre avec le passé « en ouvrant à la concurrence les infrastructures et les services », « en adaptant les tarifs de toute urgence ».

La volonté première du Livre Blanc de construction « d'infrastructures structurantes » de l'espace géographique, d'aménagement du territoire, sera diminuée au moins en partie, et le point d'orgue des politiques de mises en place des autoroutes de l'information vont se cristalliser sur la déréglementation totale du secteur des télécommunications. L'Etat devra avoir de moins en moins de pouvoir direct sur les opérateurs nationaux jusqu'à leur complète privatisation, et une instance européenne de régulation se mettra en place. Selon le Rapport Bangemann, l'objectif principal est une déréglementation rapide et profonde du secteur, le soutien de l'Etat devant être fortement diminué, et limité uniquement à une fonction de régulation et de stimulation des marchés⁷⁴.

Le Conseil de l'Europe accueillera très positivement ce rapport. Selon les conclusions du Conseil de l'Europe, « il revient en premier lieu au secteur privé de répondre à ce défi en évaluant les enjeux et en prenant les initiatives nécessaires, notamment en matière de financement ». D'autre part, « la Communauté et les Etats membres ont cependant un rôle important à jouer pour accompagner cette évolution en donnant une impulsion politique, en créant un cadre réglementaire clair et stable [...] ainsi qu'en donnant l'exemple dans les domaines qui relèvent de leur compétence »⁷⁵. En juillet 1994, la Commission élabore son

⁷¹ Réunion du Conseil Européen, Conclusion, 10 et 11 décembre 1993.

⁷² *L'Europe et la société de l'information planétaire*, recommandation au Conseil Européen, Groupe de personnalités sur la Société de l'Information, 26.05.1994, Editions du Conseil de l'Europe.

⁷³ N. Fabien, *Les télécommunications européennes, entre dérégulation et « autoroutes de l'information »*, *MédiasPouvoirs*, n°37, 1^{er} trimestre 1995.

⁷⁴ J.-G. Lacroix et al., 1994, *De la Télématique aux autoroutes électroniques. Le Grand Projet reconduit*, Presse de l'Université du Québec, Sainte-Foy.

Astrad Torres, *Qui tirera profit des autoroutes de l'information*, *Le Monde Diplomatique*, novembre 1994.

⁷⁵ *Conclusions du Conseil de l'Europe de Corfou*, juin 1994.

Plan d'action : le développement des NTIC sera essentiellement basé sur un financement privé, la concurrence sera encouragée tout en préservant un service universel ainsi que l'interconnexion des réseaux, et le démarrage de cette mise en place se fera de façon pragmatique par des projets pilotes et des expérimentations. Le 17 novembre 1994, le Conseil des ministres européens des Télécommunications adopte une résolution fixant au premier janvier 1998 le principe de libéralisation intégrale des infrastructures de télécommunications.

Autant au niveau européen que national, c'est l'aspect déréglementation du secteur des télécommunications et de l'audiovisuel qui devient le point central de ces politiques. La mise en place d'une infrastructure de communication à large bande⁷⁶ reste certes l'épine dorsale de la société de l'information, mais ce sera au secteur privé de la mettre en place en temps voulu.

Ces décisions politiques de la Communauté Européenne vont fortement marquer les politiques en matière de télécommunication des différents pays membres de la Communauté, et les développements qui verront le jour en France, en Allemagne et en Grande Bretagne en seront directement issus ; leurs programmes de développement au niveau national du réseau Internet et des NTIC seront très similaires⁷⁷.

2.11.3 - Genèse et croissance du réseau Internet et des NTIC en France⁷⁸

La législation française sur ce thème se fait elle aussi en deux temps. Elle suit le mouvement international et le gouvernement va définir sa politique de mise en place des autoroutes de l'information dans ce cadre de mise en place européenne, de concurrence et de déréglementation. La Commission Européenne aura eu un impact très important sur l'orientation des politiques françaises en la matière, et la France inscrira ce thème dès le début de l'année 1994 dans son programme politique⁷⁹.

C'est par un rapport officiel⁸⁰ commandé en février 1994 à Gérard Théry (ancien Directeur Général des Télécommunications) par Edouard Balladur qu'avait réellement débuté la mise en place des politiques françaises sur le thème des « autoroutes de l'information »⁸¹. Il sera demandé à Gérard Théry de préciser les enjeux de la Société de l'Information, avec modalités et calendrier. Les propositions de ce rapport, remis en septembre 1994, peuvent être résumées ainsi :

- (1) Raccorder à l'horizon 2015 tous les foyers et les entreprises de France au réseau Internet ;
- (2) Assurer l'accès équitable de tous les citoyens à Internet, afin d'éviter les cassures du type ville-campagne, riches-pauvres, etc.

Avec comme propositions :

⁷⁶ On appelle « transfert à large bande » tout transfert d'informations intégrant la voix, les données et les images.

⁷⁷ Ce n'est cependant qu'en 1996 que ces deux autres pays lanceront leur plan d'action avec l'*Information Society Initiative* pour la Grande Bretagne, et l'*Info 2000* pour l'Allemagne.

⁷⁸ Dominique Turck, 1997, *Politiques publiques et mise en place des expérimentations dans le domaine des Technologies de l'Information et de la Communication*, Mémoire de DEA, Ecole Normale Supérieure, Département de Sciences Sociales et de Sciences Politiques, Cachan, 121 pages.

⁷⁹ In Actes du huitième colloque international *L'Européanisation des politiques publiques : politiques communautaires et management public*, Politique et management public, volume 15, n°1, mars 1997.

⁸⁰ Gérard Théry, Alain Bonnafé, 1994, *Autoroutes de l'Information – Horizon 2015*, Rapport officiel du Ministère de l'Industrie, Editions La Documentation Française, Paris.

⁸¹ Un premier rapport avait déjà été rédigé : Thierry Breton, à l'époque Directeur de la stratégie chez Bull, avait été chargé d'une mission sur le télétravail et les téléservices pour le Ministère de l'Intérieur et de l'Aménagement du territoire et le Ministère des entreprises et du développement économique.

- Le développement massif des liaisons par fibre optique avec, comme premier objectif, l'équipement de 4 à 5 millions de foyers et entreprises dans un délai raisonnable mais aussi court que possible ;
- « L'élaboration de plates-formes expérimentales et éventuellement la négociation de leur mise en œuvre avec les différents opérateurs. L'exploitation et la diffusion des résultats et des enseignements qu'elles fourniront »⁸² ;
- La généralisation de l'ATM⁸³. Le projet de Gérard Théry était donc d'équiper le pays d'un réseau universel à large bande, le réseau Internet, en utilisant des liaisons sous forme de fibres optiques. Ce serait là une façon de relancer le Plan Câble, tout en mettant en place une nouvelle infrastructure.

Le rapport Théry a été écrit dans l'état d'esprit du Livre Blanc du Conseil de l'Europe au printemps 1994. C'était sans compter sur le rapport Bangemann et ses incidences. La recommandation principale de Théry ne sera pas suivie (relance du Plan Câble).

Le 27 octobre 1994 sera la date d'un Comité interministériel des « autoroutes et services de l'information », présidé par Edouard Balladur. Le gouvernement va décider de lancer sous un mois un appel à propositions pour dégager dans les 4 mois suivant une stratégie pour les premières propositions. Cet appel à proposition concernera « tous les acteurs intéressés, publics ou privés, France Télécom devant jouer un rôle moteur mais non exclusif dans ces expérimentations ». Le gouvernement insistera sur la nécessité de développer une industrie de services et de programmes performante dont les enjeux ont été mis en évidence dans un rapport sur les téléservices de Thierry Breton⁸⁴. Ce premier Comité sera le réel coup d'envoi des autoroutes de l'information et la France définit ainsi sa politique de façon pleine et entière dans le cadre des directives européennes. Le 23 novembre 1994, l'appel d'offre pour susciter des plates-formes d'expérimentation dans le domaine des technologies de l'Information et de la Communication est lancé. Ses objectifs reprendront les idées émises dans le rapport Théry, concernant l'usage de nouveaux services et la structure des distributeurs⁸⁵.

Le 16 octobre 1995, suite au troisième Comité interministériel des autoroutes de l'information, 170 projets seront labellisés. Fin 1995, le gouvernement lancera de nouveaux appels à proposition similaires à ceux de novembre 1994. Ce sera finalement le budget « développement-recherche » des différentes plateformes d'expérimentation qui sera subventionné, à hauteur de 30 % et le « soutien financier aux projets innovants » sera porté de 50 millions de francs en 1995 à 270 millions de francs en 1996.

Les législations se sont donc concentrées sur le second objectif du Rapport Théry (le service télématique), délaissant la question de la construction d'un réseau national en fibre optique. La loi du 4 février 1995 d'orientation pour l'aménagement du territoire prévoit d'atteindre une couverture du territoire national en réseaux à large bande pour 2015. Depuis lors la libéralisation a été étendue aux infrastructures, et il n'est plus question pour l'Etat d'investir dans ce réseau national, ce sont les opérateurs privés qui prendront le relais pour la

⁸² Gérard Théry, Alain Bonnafé, 1994, *Autoroutes de l'Information – Horizon 2015*, Editions La Documentation Française, Paris.

⁸³ ATM (*Asynchronous Transfert Mode*) : avec cette technologie, mise au point par le CNET en 1980, une seule et même technique permet de transmettre des informations numériques de tous types (voix, images, données, etc.) à des débits très élevés (plusieurs mégaoctets par seconde). Afin de supporter des débits très importants, les cellules ATM doivent être transmises grâce à des liaisons en fibres optiques. Cette technique utilisée depuis 10 ans dans le monde entier, permet de créer des réseaux complètement ouverts capables de mettre en relation n'importe quel utilisateur du réseau Internet avec n'importe quel service multimédia.

⁸⁴ *Les Téléservices en France : quels marchés pour les autoroutes de l'information ?*, Editions La Documentation française, 1994, Rapport de Thierry Breton pour le Ministère de l'Intérieur et de l'Aménagement du territoire et le Ministère des entreprises et du développement économique.

⁸⁵ *Les autoroutes de l'information*, Interventions et débats de la journée d'information du 19 décembre 1994, Allocution d'ouverture, Ministère de l'Industrie.

construction du réseau Internet. Une législation adaptée va voir le jour : « la Loi relative aux expérimentations dans le domaine des technologies de l'information » du 26 mars 1996. Elle reprendra l'essentiel des dispositifs déjà en place, mais permettra de clarifier le flou juridique en place jusqu'à cette date. Le 10 mai, l'Assemblée Nationale, puis le Sénat le 7 juin 1996 ont adopté la Loi de Réglementation des Télécommunications (LRT) qui fixa les règles du jeu concurrentiel du 1^{er} janvier 1998. Elle prévoyait, entre autres dispositions, la création de l'Autorité de Régulation des Télécommunications (ART), qui sera en charge de l'application de la réglementation. Cette loi était capitale car en toile de fond apparurent de nouveaux marchés : les services en ligne du type Internet (3,1 milliard de francs de chiffre d'affaires en France en l'an 2000 selon la société d'études américaine IDC) ; la concurrence due aux appels longues distances via Internet (la société Omnicom en Alsace par exemple) ; ou la téléphonie sur le câble et les liaisons satellites (l'Eurotéléport de Roubaix par exemple). Un autre enjeu essentiel de ces nouveaux marchés est celui de la télévision interactive⁸⁶.

Dès le vote de la loi, le marché français a été le théâtre de grandes manœuvres, en particulier de regroupements d'envergure internationale entre acteurs du secteur des télécommunications et de l'audiovisuel. Ces derniers interviennent de manière notable dans le cadre de la mise en place du marché des nouvelles technologies de l'information : la numérisation avancée du son et des images met en effet les secteurs de l'audiovisuel et des télécommunications en concurrence directe⁸⁷. La déréglementation de la concurrence et le désengagement de l'Etat s'étend donc au-delà du domaine des télécommunications, au domaine beaucoup plus vaste de l'audiovisuel, et engendre une réforme totale de ces secteurs. L'élément essentiel pour que puisse intervenir une telle révolution sera la privatisation de France Télécom, avec la volonté gouvernementale de l'entrée en bourse d'une part importante de son capital. Dès lors, une redistribution des cartes dans ces secteurs pourra commencer.

En 1997, le gouvernement Jospin reprend à son compte les grands axes énoncés sous le gouvernement Balladur, et plaide pour la continuation et le renforcement des politiques en place. C'est en juin 1997 que Christian Pierret, secrétaire d'Etat chargé de l'Industrie, donnera les orientations du gouvernement socialiste en matière de mise en place des autoroutes de l'information. Les villes et les élus locaux seraient à la pointe des initiatives et des réalisations en matière de mise en place des autoroutes de l'information, et la dimension politique des expérimentations mettrait le niveau local au centre des communications. La volonté gouvernementale de recentrer le développement des NTIC sur le rôle des collectivités locales est claire.

Trois niveaux de services sont proposés aux collectivités :

- Les services aux citoyens : aide et création d'emplois, raccordement de tous les établissements secondaires d'enseignement, mise en place d'un réseau Santé Social reliant tous les professionnels de la santé aux Caisses Primaires d'Assurance Maladie, aide au trafic routier, développement de la démocratie participative.
- Les services aux acteurs économiques : offre de services interactifs à moindre coût, développement des communications avec les mobiles, baisse des tarifs téléphoniques, développement du télétravail.
- Les services rendus aux acteurs proprement dits du domaine des technologies de l'information, en particulier aux opérateurs de télécommunications.

⁸⁶ Télévision interactive : Type de transmission télévisuelle où l'utilisateur a une possibilité d'action sur le programme qu'il reçoit. Les principaux services de télévision interactive sont la vidéo à la demande (VOD), le téléachat, les jeux et le téléenseignement.

⁸⁷ Avec par exemple la téléphonie proposée sur les réseaux câblés, ou encore des accès Internet proposés aussi bien par les compagnies de télécommunications que par les câblo-opérateurs.

2.11.4 - Du contenant au contenu

Dès 1974, les chercheurs du CNET, s'inspirant du premier système couplant réseau téléphonique et terminal informatique, présentent au Salon d'Informatique, de la Communication et de l'Organisation du Bureau, le SICOB à Paris, un premier terminal, baptisé *Tictac*. Ce système permettait d'accéder à des pages d'informations diverses et variées. Les principes et les utilisations n'en étaient encore qu'à leur début, mais l'impulsion était donnée, la convergence entre télécommunication et informatique était née.

Au début des années 1980 sont ouverts les premiers réseaux permettant la transmission de données (vidéotexte, annuaire électronique, raccordement au réseau Transpac). Cette entrée est riche d'enseignements pour le monde de la communication au sens large. Pour la première fois, les Télécoms s'intéressent non plus uniquement à l'art et à la manière de véhiculer les données, mais aussi au contenu des données à transporter.



Sources : France Télécom, Direction Générale/Délégation à la Communication., 1995, *France Télécom. Mémoires pour l'action*, Editions France Télécom.

Figure 37 : Exemples de données accessibles grâce au réseau téléphonique : les services du Minitel.

Dans les années 1990, les mutations de la société française vers une « société de l'information », vont inciter les opérateurs de télécommunications à évoluer rapidement, ainsi France Télécom investit certains secteurs de pointe plus éloignés de son métier de base et passe alors des télécommunications à la communication.

Historiquement, France Télécom est entré dans le monde de l'image et de la communication très progressivement. Après avoir organisé, rue de Grenelle, les premières retransmissions de télévision dès 1935, les Télécoms abandonnent à la Radio Télévision Française, la RTF, la transmission de ce type de liaisons. Plus tard, l'ORTF aura la maîtrise du contenu tandis que TéléDiffusion de France, TDF, continuera à assurer la diffusion des images.

En 1962, la première liaison transatlantique de télévision par satellite entre les USA et la France (Pleumeur-Bodou) marque le retour des Télécoms dans le monde de l'image. Il se concrétise également, quelques années plus tard, par l'élaboration de projets spatiaux importants, qui aboutiront au lancement des deux générations de satellites de télécommunications Télécom I et Télécom II.

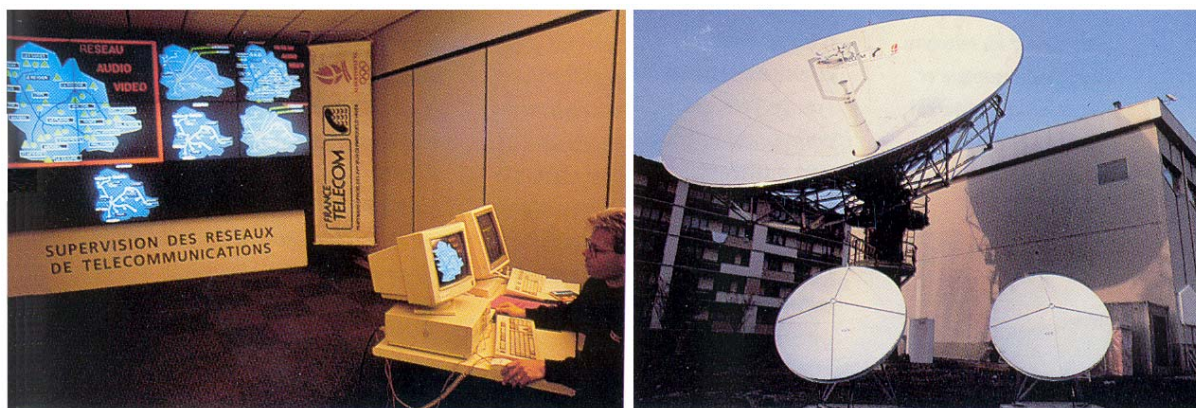
A la suite du démarrage du Plan Câble, France Télécom devient le principal constructeur et maître d'ouvrage de réseaux câblés. En 1989, TéléDiffusion de France, TDF, est rattaché à France Télécom. A partir de cette date, France Télécom contrôle alors, en plus des satellites et du câble, l'ensemble du réseau hertzien terrestre de diffusion. Ce regroupement a permis à l'opérateur national de maîtriser l'ensemble de la chaîne de l'image. Sur l'ensemble du groupe France Télécom on comptait en 1995 cinq mille personnes travaillant dans le domaine de l'image, et qui étaient réparties entre la maison mère (France Télécom) et ses quatre filiales : TDF, VTCOM, France Télécom Câble et France Télécom Multimédia.

Depuis 2004, TéléDiffusion de France a retrouvé son statut de société privée indépendante, et ne fait donc plus partie du Groupe France Télécom.

Le secteur de la communication des sons, images et données se développe depuis 10 ans dans de multiples directions, offrant ainsi une gamme de prestations complète aux professionnels de l'audiovisuel et de la communication. En 1992, France Télécom a ainsi assuré la transmission des images, des voix, des textes et des données dans le monde entier à partir d'Albertville, où se sont déroulés les XVI^{ème} Jeux Olympiques d'hiver.

Grâce au Service d'Exploitation Radio Télévisuel Extérieur (SERTE), France Télécom fournit aux télévisions la transmission d'images du monde entier par satellite, des services de vidéo transmission interactifs permettant le dialogue à des milliers de kilomètres de distance, ou encore des possibilités de visioconférences conçues en particulier pour les entreprises. On peut citer l'exemple remarquable de la téléchirurgie : la première expérience de téléchirurgie, c'est-à-dire de chirurgie à distance (le patient était à Strasbourg, relié à un robot qui effectuait l'intervention chirurgicale en direct, le chirurgien était aux USA et effectuait les gestes chirurgicaux à l'aide d'un robot américain relié en temps réel au robot chirurgical de Strasbourg). Cet exploit de téléchirurgie fut réalisé en 2003 au CHU de Strasbourg, par le Professeur Marescaux, de l'IRCAD⁸⁸. La transmission des informations (mouvements des bras articulés des deux robots, images du patient, sons, etc.) entre la France et les USA a été effectuée grâce à une connexion par satellite de télécommunication, mise en œuvre par le Laboratoire France Télécom Recherche&Développement de Lannion. Depuis cette première expérience, qui fut une grande réussite, la téléchirurgie se développe à travers le monde entier. De plus en plus de Centres Hospitaliers font l'acquisition de robots de téléchirurgie et d'équipement de transmission par satellite.

⁸⁸ IRCAD : Institut de Recherche sur les Cancers de l'Appareil Digestif, Université Louis Pasteur, Centre Hospitalier et Universitaire de Strasbourg.



Sources : France Télécom, Direction Générale/Délégation à la Communication., 1995, *France Télécom. Mémoires pour l'action*, Editions France Télécom.

Figure 38 : Le système de transmission satellite mis en place en 1992 par France Télécom pour la retransmission télévisée des Jeux Olympiques d'hiver à Albertville.

La multitude des services offerts par les Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (NTIC) mobilise et parfois même combine l'ensemble des modes de transmission, satellite, réseau câblé (fibres optiques), liaison hertzienne. Ainsi, aux métiers traditionnels des « télécommunicants » (les employés des Télécoms), s'ajoutent d'autres professions venues tout droit du monde de l'audiovisuel : cadreur, ingénieur du son, réalisateur, webmaster, ingénieur réseau, etc. La palette des métiers s'élargit à mesure que France Télécom se diversifie. Mais, pour les grands opérateurs de télécommunications tels que France Télécom, l'Image c'est avant tout le Câble. Jusqu'à son changement de statut en 1991, France Télécom se cantonnait dans un rôle d'investisseur et d'exploitant technique des réseaux, mais n'intervenait pas dans la commercialisation. A partir de 1995 France Télécom s'est affirmé comme un opérateur commercial à part entière : le groupe a ainsi acquis des participations majoritaires dans des sociétés d'exploitation commerciale et a poursuivie sa politique de partenariat avec les autres câblo-opérateurs français en prenant des participations dans le capital de ces sociétés.

Faire vivre et développer les réseaux, mais aussi s'impliquer dans le contenu, tels sont les objectifs des opérateurs de télécommunications à l'heure actuelle. Participer au contenu est le nouvel enjeux des Télécoms, car le contenu [types de données diffusées (images, sons, données numériques, pages web, services on-line, etc.), qualité des données (bruits, vitesse de transmission des vidéo, etc.), types de services (téléachat, site web de vulgarisation scientifique, services des impôts, etc.)] conditionne le succès des supports.

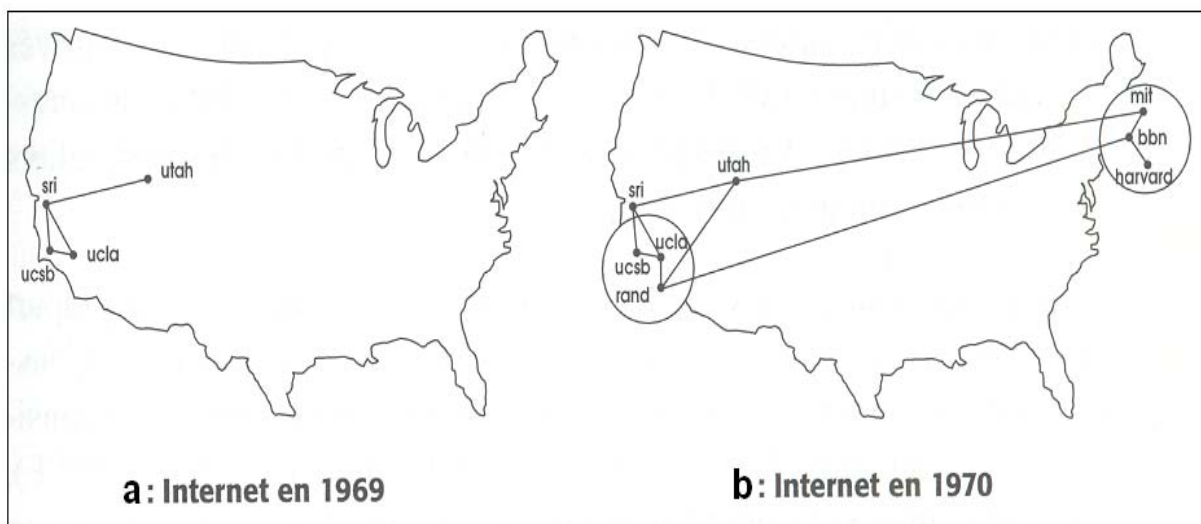
Le multimédia a conduit, dès 1995, les grands opérateurs de Télécoms à s'interroger sur l'actualité et la rentabilité de ce qu'on appelait à l'époque les « autoroutes de l'information ». Ce terme recouvre d'une part les réseaux informatiques reliant les ordinateurs et les réseaux de diffusion large bande et, d'autre part, les futurs réseaux de communication à haute capacité, rendus possibles par la généralisation de la fibre optique et la numérisation. A partir de 1995 les opérateurs de télécommunications ont commencé progressivement à déployer les infrastructures à haut débit les plus modernes afin de répondre aux futurs besoins, mais sans investir de façon massive et prématurée. Les Télécoms se sont alors organisés de manière à favoriser l'apparition de toutes les potentialités à court terme, en valorisant les projets spécifiques à moyen terme : poursuite de la modernisation du réseau, émergence d'applications multimédias, établissement de partenariat avec les divers acteurs impliqués, notamment les fournisseurs du contenu (hébergeurs de sites web, chaînes de télévision, etc.).

Dès 1995 la structure du réseau commença à se modifier, et se complexifier. La fibre optique prendra peu à peu le relais des câbles coaxiaux ; à terme de dernier refuge du fil de cuivre, ce seront les raccordements d'abonnés.

L'entrée de France Télécom en 1992 dans le monde de la communication a marqué une étape capitale dans son histoire. Sans se détourner de son métier de base, le groupe France Télécom a ainsi cherché à s'enrichir et développer les services en faisant converger le transport de l'information, son contenu et son traitement, de façon à intégrer les besoins des utilisateurs, résidentiels comme professionnels. Le réseau, ou plutôt, les réseaux Internet, après s'être d'abord ouverts gratuitement au monde universitaire et aux applications informatiques, aborde depuis la fin des années 1990 une nouvelle étape, que l'on peut qualifier de commerciale : développement croissant du commerce électronique, mise en ligne croissante de sites web pour les entreprises, etc.

2.11.5 - Historique du réseau Internet

Les débuts du réseau Internet datent de 1964. A cette époque, la *Rank Corporation*, Cellule de réflexion diplomatico-scientifico-militaire américaine, développe l'idée de création d'un nouveau type de réseau informatique. Le but de ce réseau était d'assurer la liaison entre les différents ordinateurs le composant, et ceci même dans le cas où une portion entière du réseau serait défectueuse ou détruite. Pour qu'un tel type de réseau puisse fonctionner, il faut obligatoirement que chaque nœud du réseau ait le même poids, donc que le réseau ne soit pas hiérarchique. L'important, dans un réseau de ce type, ce n'est pas le chemin parcouru par les données, mais que les données parviennent à destination. En 1969, un organisme dépendant du Pentagone, l'*Advanced Research Project Agency*, l'ARPA, décide de créer un premier prototype de réseau en reliant quatre supercalculateurs (Figure 39.a : Naissance du réseau ARPAnet en 1969), ce qui donne naissance au réseau ARPAnet⁸⁹. A partir de 1972, le réseau ARPAnet est mis à disposition des universitaires et des organismes de recherche (MIT, Harvard, UCLA, etc.), leur permettant ainsi d'utiliser les supercalculateurs et le réseau d'intercommunication informatique ARPAnet (Figure 39.b : Premières utilisations du réseau ARPAnet en 1970).



Sources : Etienne Turpin, 1999, *Des télécoms à l'Internet : économie d'une mutation*, Editions Eyrolles, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Paris.

Figure 39 : Naissance du réseau Internet.

⁸⁹ ARPAnet : abréviation de ARPA Network, le terme « network » signifie « réseau » en français.

Deux innovations majeures sont alors mises en place, la naissance du courrier électronique et la naissance du protocole d'interconnexion entre réseaux, le protocole TCP, en 1974.

A la même époque, partout à travers le monde occidental, une multitude de réseaux du même type voient le jour (USENET, BITNET, UUCP, etc.) et commencent à s'interconnecter entre eux. Mais on peut situer le démarrage de l'exploitation du réseau Internet en 1981, lorsque la National Science Foundation (NSF) américaine décide de financer la création d'un réseau, le Computer and Science Network (CSNET). L'objectif de ce réseau était de fournir aux universités des services tels que le courrier électronique, le transfert de fichiers, etc.

En 1982, voit le jour le réseau Internet tel que nous le connaissons encore actuellement, grâce à l'invention du protocole IP (Internet Protocol), qui sera associé à TCP. Les réseaux Internet, eux-mêmes interconnectés à l'aide du protocole TCP/IP, définissent l'Internet.

Au cours des dix ans qui vont suivre (1982-1992), l'Internet va se développer à travers le monde entier, le nombre de serveurs connectés passe ainsi de 1 000 en 1984 à 1 000 000 en 1992, en 1987 apparaissent des réseaux plus importants, semi-privés et à but commercial (IBM, MCI, etc.), dès 1990, des prestataires de services d'accès privé à Internet proposent aux particuliers des accès à Internet.

A partir de ce moment là, Internet s'ouvre aux particuliers et aux entreprises privées. Le réseau Internet devient ainsi une entité autonome. La National Science Foundation, qui avait financé le développement du réseau Internet à ses débuts, décide alors de retirer son appui financier au développement d'Internet et de laisser les entreprises privées prendre le relais. Cette décision marque le début de la privatisation du réseau Internet à travers le monde.

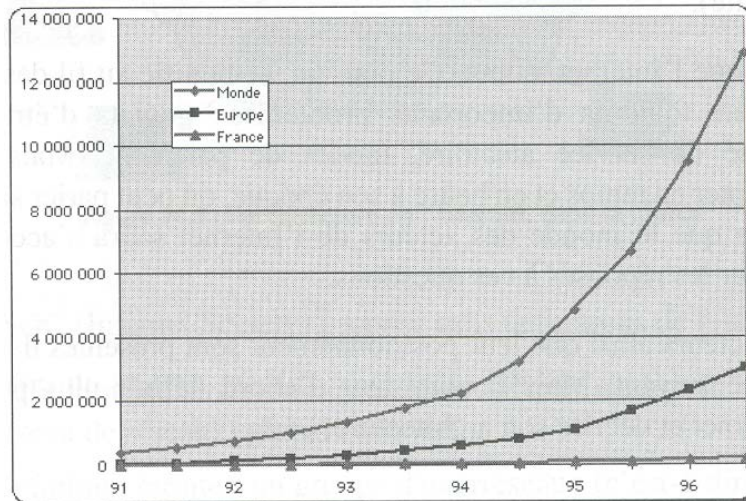
Deux avancées technologiques majeures vont encore voir le jour. En 1992 est créé le World Wide Web. Le succès du Web sera phénoménal. C'est en s'en inspirant que le vice-président américain, Al Gore, lancera l'idée des « autoroutes de l'information ». En 1993 est créé le premier logiciel de navigation Mosaïc. Il permet de consulter des documents interactifs comportant des images, du texte, du son, etc., de manière simple et conviviale.

On assiste au même moment à une mondialisation du réseau Internet : ainsi dès 1995, le nombre de réseaux situés hors des Etats-Unis dépasse celui des réseaux américains.

Au sujet de la croissance du réseau Internet depuis 10 ans, on peut se référer aux travaux d'Etienne Turpin⁹⁰ : « Bien que les nouveaux opérateurs de télécommunication n'aient pas à supporter le coût de l'amortissement des équipements précédemment subventionnés, ils doivent faire face à la croissance de la demande (augmentation du nombre de personnes raccordées, diversification des services) et financer les équipements nécessaires au redimensionnement du réseau. En effet, au cours de la dernière décennie, le nombre de réseaux et d'ordinateurs hôtes (*host*) branchés sur Internet a augmenté exponentiellement ».

Selon certaines estimations, le nombre des applications et services et le nombre des utilisateurs ont augmenté dans les mêmes proportions. En 1994 et 1995, le trafic et le nombre d'utilisateurs d'Internet doubleraient tous les trois mois. Les estimations actuelles montrent que le trafic continue à doubler tous les six à douze mois, voire même plus rapidement.

⁹⁰ Etienne Turpin, 1999, *Des télécoms à l'Internet : économie d'une mutation*, Editions Eyrolles, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Paris.



Sources : Etienne Turpin, 1999, *Des télécoms à l'Internet : économie d'une mutation*, Editions Eyrolles, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Paris.

Figure 40 : Nombre de machines connectées à Internet (sources : Network Wizard, Ripe NCC).

La croissance de la demande de raccordement au réseau Internet est encore forte à l'heure actuelle, en 2005. Mais qui dit augmentation du trafic, dit également ralentissement de la transmission et donc dégradation de la qualité du service offert. En effet, une grande partie du réseau Internet mondial est encore composé de liaisons par câbles coaxiaux (lignes téléphoniques) à faible débit (56 Ko/seconde). Les liaisons à haut débit (câbles composés de fibres optiques, réseau hertzien haut débit, etc.) prennent peu à peu le relais auprès des particuliers grâce aux offres proposées par les opérateurs de Télécoms (ADSL à 8 Mo/seconde, etc.). Les entreprises quand à elles, disposent souvent d'un budget téléphonique plus important et investissent le plus souvent dans les offres de connexion haut débit professionnel.

La dégradation de la qualité du réseau, si elle peut être acceptée par une certaine population d'abonnés résidentiels qui profitent du service pour un coût relativement bas, n'est plus acceptable dès lors que l'on s'adresse à des entreprises ou que l'on utilise certains services en temps réel (téléphonie, télévision par câble, etc.). C'est pour faire face à ce problème que l'Internet, à côté du réseau ouvert à tout le monde, a créé des réseaux privés spécialisés : les Réseaux Privés Virtuels, RPV, comme par exemple les Intranets ou les Extranets, qui permettent aux entreprises de contrôler leur réseau (sécurité du réseau et qualité du service), tout en utilisant la technologie IP (Internet Protocole).

L'Internet Society, l'ISOC, propose trois définitions de l'Internet :

- « Définition générale : un métaréseau d'information (c'est-à-dire un réseau de réseaux) global et ouvert. »
- « Définition étroite : un groupe d'interréseaux (c'est-à-dire d'interconnexion de réseaux) capables d'acheminer entre eux des paquets suivants l'Internet Protocol. »
- « Définition large : l'interconnexion de réseaux au protocole IP, plus tous les réseaux connectés capables d'acheminer du trafic (ce qui inclut les réseaux utilisant le protocole IP, ceux utilisant un autre protocole qu'IP et les systèmes de niveau applicatifs). »

La définition « large » de l'ISOC peut être considérée comme faisant référence à l'ensemble des réseaux de télécommunication et réseaux informatiques connectés à Internet existant dans le monde. Elle résume très bien l'ambition du World Wide Web, qui est de mettre en relation tous les ordinateurs existants dans le monde.

2.12 – Le secteur des mobiles

Dans cette sous partie nous allons présenter les branches de télécommunications mobiles utilisant la technologie de transmission du signal basé sur les ondes radioélectriques : la radiomessagerie, la radiotéléphonie terrestre et la radiotéléphonie par satellite.

Les premières études dans le domaine des mobiles, menées en France au sein des laboratoires du CNET, remontent aux années 1970. Mais le développement des mobiles se trouve ralenti en raison de l'impossibilité pour France Télécom d'obtenir les fréquences nécessaires.

2.12.1 - La radiomessagerie

La première branche de la famille des mobiles, la radiomessagerie, connut une expansion importante avant d'être absorbé par le secteur des télécommunications mobiles de deuxième génération (GSM) et troisième génération (GSM du type GPRS, UMTS) qui intègrent la messagerie dans leur services (SMS, email, Wap, etc.).

Lancé sur le marché en 1975, *Eurosignal*, le petit boîtier indiquant par un signal à son porteur que l'on cherche à le joindre est alors le seul service mobile disponible. Il est immédiatement adopté par les médecins et les représentants de commerce, toujours sur les routes. Ces deux catégories socioprofessionnelles représentaient, encore en 1995, 60 % des utilisateurs de ce service.

En 1987, deux nouveaux services de radiomessagerie, *Opérateur* et *Alphapage*, sont créés pour le marché des professionnels. Ils seront utilisés par un grand nombre de personnes, en déplacement réguliers, ayant besoin de rester en contact permanent, comme par exemple les professions libérales, les commerciaux, les transporteurs, les médecins urgentistes, etc.

Enfin, à partir de 1991, est mis sur le marché un dernier service de radiomessagerie, *Euteltrac*. Fonctionnant grâce aux satellites de l'organisation *Eutelsat*, il permet d'envoyer et de recevoir des messages sur plusieurs continents. *Euteltrac* est spécifiquement destiné aux compagnies de transports routiers. Il permet de faire du suivi de flotte (« *tracking analysis* » en anglais), c'est-à-dire pouvoir connaître et analyser en temps réel la localisation dans l'espace de véhicules, voir de bateaux.

Tous services confondus, la radiomessagerie comprenait plus de 300 000 utilisateurs en 1995, puis elle connut un certain plafonnement, avant d'être absorbée par le secteur de la radiotéléphonie et du réseau Internet sans fil.

2.12.2 – Les radiomobiles

Une première application radiomobile voit le jour en 1985, avec la création du premier service de téléphone voiture, *Radiocom 2000*. Mais en dépit du bon accueil fait au nouveau produit, le taux d'équipement reste faible : on compte 140 000 abonnés en France, tandis qu'en Grande-Bretagne, ils sont 600 000.

En 1987, la radiotéléphonie et la radiomessagerie sont libéralisées, ce qui suscite immédiatement l'apparition d'un nouvel opérateur concurrent, la Société Française de Radiotéléphonie, *SFR*, filiale de la Compagnie Générale des Eaux.

France Télécom s'engage alors dans la téléphonie radiomobile pour le grand public : Le téléphone citadin *Bi-Bop* (figure 42) sera expérimenté auprès d'un panel d'utilisateur sur Strasbourg. Les résultats de cette première expérimentation étant satisfaisants, le *Bi-Bop* sera mis sur le marché en 1993 et se développera fortement à Paris, en Ile-de-France et à Lille. Progressant à toute vitesse, le petit téléphone de poche a dépassé la barre des 45 000 abonnés en 1995.



Sources : France Télécom, Direction Générale/Délégation à la Communication., 1995, *France Télécom. Mémoires pour l'action*, Editions France Télécom.

Figure 41 : Photographie des deux combinés Bi-Bop.

La téléphonie mobile GSM :

En 1993, France Télécom fait l'essai d'un réseau GSM à Paris, puis le développe sur toute la France, sous l'appellation *Itinériss*. Le succès du réseau *Itinériss* est immédiat. *Itinériss* est conçu selon la norme européenne GSM, adoptée dans plus de 38 pays, ce qui lui donne un caractère universel. Le réseau de téléphonie radiomobile GSM atteint déjà fin 1994, 400 000 abonnés, dont plus de 95 000 sont clients du réseau GSM *Itinériss* de France Télécom.

On observe depuis 1996 une explosion du marché des téléphones mobiles en France, notamment en direction du grand public. La concurrence déjà en place sur ce marché libéralisé en 1988 (avec trois opérateurs en place : France Télécom (Orange), SFR et Bouygues Télécom) préfigurait déjà le marché concurrentiel sur les réseaux fixes qui entra en vigueur à dater de janvier 1998.

2.12.3 - La téléphonie mobile par satellite

Le troisième secteur des mobiles, correspond à la téléphonie mobile par satellite. Ce secteur se limite à quelques milliers d'utilisateurs en France (collectivités territoriales, armée, professionnels de l'aviation civile, etc.), du fait du prix élevé du combiné et de l'abonnement annuel.






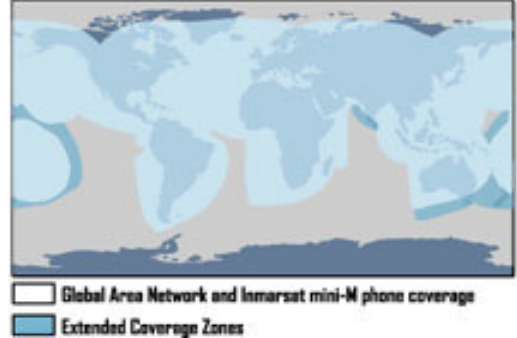
Sources : France Télécom, Direction Générale/Délégation à la Communication., 1995, *France Télécom. Mémoires pour l'action*, Editions France Télécom.

Figure 42 : Photographie d'un combiné de téléphonie mobile par satellite.

Il existe plusieurs réseaux de communications par satellites dans le monde, dont les plus connus en Europe sont *Iridium*, *Inmarsat* et *Thuraya* ; et *Globalstar* pour les USA.




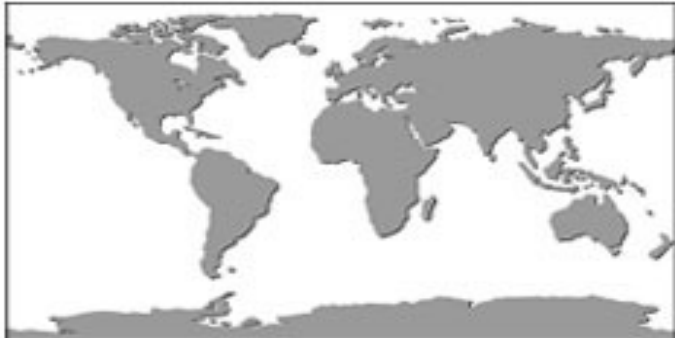
La téléphonie par satellite offre la possibilité de communiquer en dehors des zones géographiques couvertes par le filaire ou le GSM et l'UMTS. Les technologies des différents réseaux satellitaires permettent de répondre à l'ensemble des besoins de communications extrêmes. Aujourd'hui la téléphonie, c'est communiquer par la voix, mais également envoyer

des fax, échanger des données, des SMS, naviguer sur Internet, envoyer des emails, gérer des flottes de véhicules ou de navires.

INMARSAT	
  	<p>Le réseau de communications par satellites Inmarsat, donne accès à l'ensemble des moyens de communications : voix, fax, e-mail, transfert de données, internet.</p> <p>Ce réseau, mis en service en 1982, accessible sur terre, en mer et dans les airs, compte aujourd'hui plus de 300 000 utilisateurs qui peuvent accéder au réseau de communications mondial grâce aux quatre satellites géostationnaires couvrant la quasi totalité du globe (sauf les pôles).</p> <p>Chacun couvrant une des régions océaniques du globe :</p> <ul style="list-style-type: none">- Océan Atlantique Est- Océan Atlantique Ouest- Océan Pacifique- Océan Indien 

Sources : Site web⁹¹ de la société IEC Télécom, Société de commercialisation de service de téléphonie par satellite basée à Paris.

Figure 43 : Présentation du réseau de téléphonie par satellite Inmarsat.

IRIDIUM	
  	<p>IRIDIUM est un réseau de communications mobiles par satellite qui offre l'accès à la téléphonie, à l'envoi de SMS et à la transmission de données, quelle que soit la localisation de l'utilisateur sur terre comme sur mer. L'utilisateur peut alors communiquer où qu'il soit avec tout autre téléphone dans le monde.</p> <p>Couverture : mondiale. Services : voix, data (2.4 kbps), SMS</p>  <p>Couverture Mondiale</p>

Sources : Site web⁹² de la société IEC Télécom, Société de commercialisation de service de téléphonie par satellite basée à Paris.

Figure 44 : Présentation du réseau de téléphonie par satellite Iridium.

⁹¹ Site web de la société IEC Télécom : <http://www.iec-telecom.com/inmarsat.php>

⁹² Site web de la société IEC Télécom : <http://www.iec-telecom.com/iridium.php>

Evolution de la croissance des réseaux mobiles dans le monde depuis 15 ans (1997-2002) :

Les technologies de téléphonie radiomobile ont été introduites au début des années 1980 sous une forme analogique, puis l'utilisation la numérisation du signal radioélectrique a permis d'améliorer la qualité de la transmission et d'augmenter fortement la taille des cellules des réseaux de téléphonie mobile.

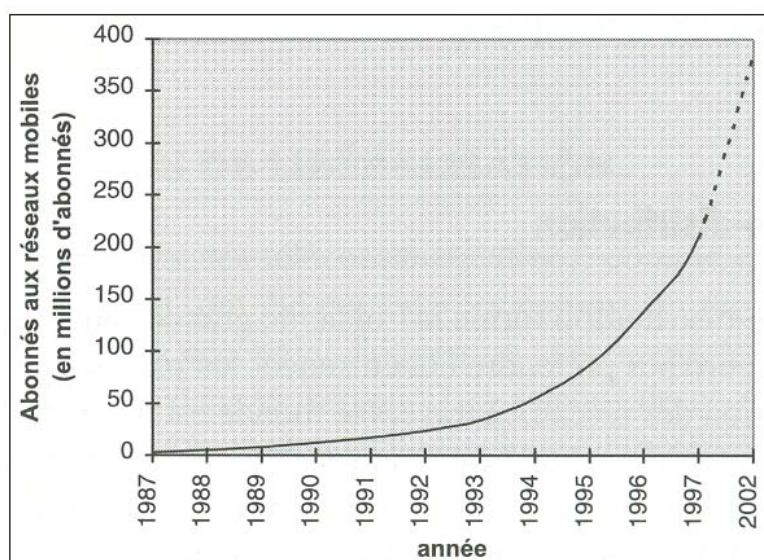
La croissance des abonnés aux réseaux mobiles a suivi une évolution exponentielle : les réseaux mobiles mirent du temps à se mettre en place, mais à partir des années 1995 on assiste à une explosion du nombre d'abonnés aux réseaux cellulaires.

Les réseaux de téléphonie mobile se sont d'abord développés dans les pays d'Europe du Nord (Suède, etc.) au début des années 1980, puis, quelques années plus tard au Japon, puis aux USA, et ensuite seulement dans le reste de l'Europe à partir des années 1990. La France quant à elle était en retard par rapport aux autres pays européens (Grande-Bretagne, etc.). Pour rattraper son retard en matière d'équipement cellulaire, France Télécom entame un plan de promotion de la téléphonie radiomobile à partir de 1995. L'apparition de deux opérateurs concurrents (SFR et Bouygues Télécom) va également contribuer au développement rapide du réseau cellulaire français. Ainsi fin 1998, la France a rattrapé son retard et compte plus de 10 millions d'abonnés au téléphone cellulaire.

Au niveau mondial, à la fin de l'année 1997, le parc d'abonnés cellulaires représente déjà 20 % du marché total de la téléphonie, soit 200 millions d'abonnés.

Les réseaux radiomobiles de proximité comme par exemple la Boucle Local Radio, BLR (*Wireless Local Loop*), peinent à se développer entre les systèmes cellulaires (GSM, UMTS depuis 2004) et leurs homologues américains (PCN, pour *Personal Communication Network*) d'une part, la téléphonie fixe d'autre part. On notera également l'échec de la téléphonie mobile de proximité en France (Bi-Bop), en Grande-Bretagne et au Japon (PHS), où les débuts avaient pourtant semblé très prometteurs, mais qui furent rapidement dépassés par rapport aux réseaux cellulaires du type GSM dès les années 1995.

En ce qui concerne les télécommunications par satellite, si les satellites à orbite basse, LEO (lancement d'Iridium en 1998, de Globalstar en 1999) semblent sur le point d'atteindre leur objectif maximal de développement (faible nombre de clients de téléphonie mobile à haut potentiel), les satellites géostationnaires, GEO, se concentrent sur une offre Internet.



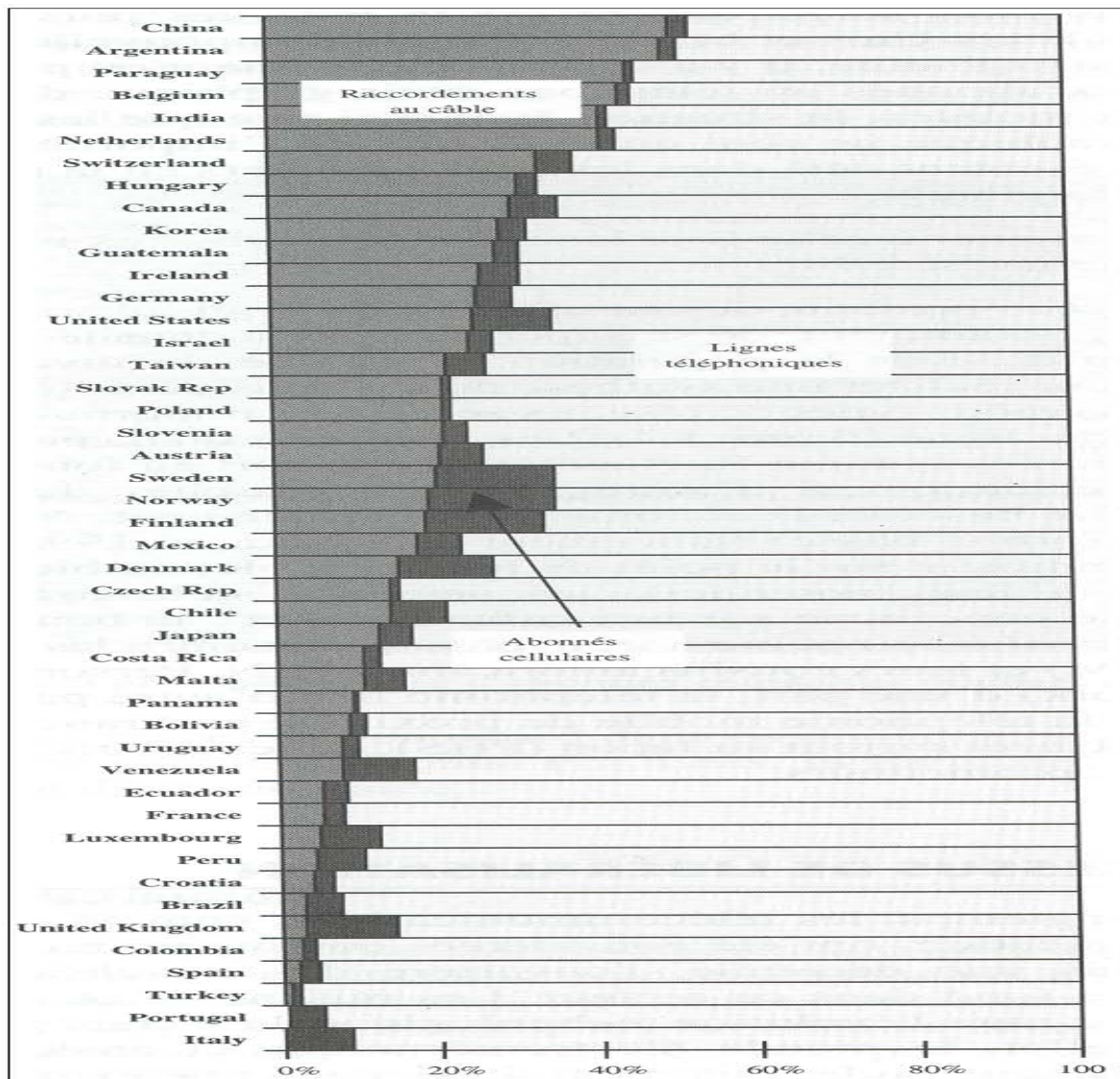
Sources : Etienne Turpin, 1999, *Des télécoms à l'Internet : économie d'une mutation*, Editions Eyrolles, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Paris.

Figure 45 : Les réseaux de téléphonie mobile : croissance mondiale du nombre d'abonnés.

	1990	1995	1997
United States	5 283	36 851	55 312
European Union	3 041	16 576	38 123
United Kingdom	1 140	4 671	8 344
Japan	869	4 140	30 474
Italy	266	2 820	11 760
Germany	274	2 712	8 300
China	18	2 640	13 500
Canada	583	2 051	4 262
Sweden	461	1 643	3 187
Australia	291	1 555	5 117
Thailand	66	1 311	2 453
Korea	129	1 283	6 145
France	231	1 216	5 792

Sources : Etienne Turpin, 1999, *Des télécoms à l'Internet : économie d'une mutation*, Editions Eyrolles, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Paris.

Figure 46 : Les réseaux de téléphonie mobile : les principaux parcs d'abonnés (en milliers d'abonnés).



Sources : Etienne Turpin, 1999, *Des télécoms à l'Internet : économie d'une mutation*, Editions Eyrolles, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Paris.

Figure 47: Répartition des abonnés en 1999 par grandes catégories de réseaux : câbles, mobiles et fixes

Synthèse : Evolution chronologie des télécommunications

1464	Création de la Poste royale par Louis XI
1794	Début de la télégraphie optique de C. Chappe
1801	Code de la Poste par Napoléon
1816	Invention de la photographie par N. Niepce
1832	Invention du télégraphe électrique par P. Shilling
1837	Création de l'Administration du télégraphe au Ministère de l'intérieur, par Louis Philippe. Instauration du monopole de l'Etat français sur la transmission des signaux
1837	Alphabet télégraphique de S. Morse
1851	Autorisation d'accès privé au télégraphe par Napoléon III
1854	Projet de téléphone de F. Bourseul
1860	Lois de l'électromagnétisme par J. Maxwell
1865	Création de l'Union Internationale du Télégraphe
1866	Premier câble télégraphique transatlantique. Echec
1876	Invention du téléphone par G. Bell et E. Gray.
1876	Premiers enregistrements de T. Edison
1878	L'Ecole Supérieure de Télégraphie est fondée
1879	Concession des réseaux téléphoniques à trois sociétés privées qui se regroupent au sein de la Société Générale du Téléphone
1879	Premier Ministère des postes et du télégraphe, P. et T.
1886	Première liaison de télégraphie pneumatique
1887	Ondes radioélectriques de H. Hertz
1889	Nationalisation de la Société Française du téléphone. L'administration des Postes et Télégraphes reprend la concession du téléphone au privé
1892	Téléphone automatique d'A. Strowger
1892	Radiodiffusion par W. Crooker
1895	Cinématographe des frères Lumière
1896	Première liaison de TSF par G. Marconi
1897	Emission radio au Panthéon par E. Ducretet
1900	Bobines d'induction de Pupin
1900	Premières associations syndicales P. et T.
1901	Première liaison radio transatlantique
1902	Découverte de l'ionosphère par O. Heaviside
1906	Diode de J. Fleming
1906	Triode de L. de Forest
1909	Grèves des P. et T.
1912	Monopole d'Etat sur la radiodiffusion. Le service des Câbles Sous-marins et le Service de la Télégraphie sans Fil (TSF) sont créés
1912	Transmission de texte par E. Belin
1913	Le premier central téléphonique automatique est ouvert à Nice
1914	Images mobiles de G. Rignieux
1915	Téléphone automatique Rotary
1917	Radio militaire de G. Ferrié
1917	Télégraphe d'E. Baudot
1919	Rattachement de la radiodiffusion (TSF) au Ministère des P. et T.
1921	Premiers « courants porteurs » d'E. Colpits et O. Blackwell





1922	Premières émissions régulières de radiodiffusion de la Tour Eiffel
1923	Un plan de développement du téléphone est voté par le Parlement. Création du budget annexe et du Conseil supérieur des PTT
1923	Commutateur français R6
1925	Première société de télévision de J. Baid
1925	Le sous-secrétariat d'Etat des P et T devient le secrétariat d'Etat aux Postes, Télégraphes et Téléphones
1926	Premier câble à grande distance électronique
1927	Construction d'une station d'émission à ondes courtes à Pontoise
1928	Inauguration du central téléphonique parisien Carnot fonctionnant en Rotary
1929	Kinescope de V. Zworgkin
1930	Introduction de l'« auto rural » en France
1930	Construction du navire câblé <i>Ampère II</i>
1932	Création de l'Union internationale des télécommunications, l'IUT
1933	Ouverture de la première liaison radiotéléphonique régulière entre Paris et Alger
1935	Emissions régulières de télévision depuis la Tour Eiffel
1935	Réseau de radiodiffusion de l'Etat par G. Mandel, Ministre des PTT
1936	Premier télex Creed
1938	Principes de la numérisation par A. Reeves
1938	Première liaison automatique interurbaine entre Nice, Cannes et Monaco
1939	Autonomie de la radiodiffusion et de la télévision
1940	Création du CCTI, Comité de coordination des télécommunications impériales
1941	Création de la Direction Générale des Télécommunications, DGT
1941	Calculateur électromécanique de G. Stilitz et H. Aiken
1941	Création de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, l'ENST
1941	Mise au point du RADAR
1943	Premier calculateur électronique ENIAC de J. Mauchly et J.-P. Eckert
1944	Création du Centre National d'Etudes des Télécommunications, le CNET
1947	Invention du transistor par W. Shockley
1947	Statut de la fonction publique
1947	Première liaison française par câble coaxial entre Paris et Toulouse
1948	Création de Sotelec
1949	Système SECAM de télévision française
1951	Décret sur l'autorité du Ministère des finances
1951	Mise en service d'un faisceau hertzien de télévision entre Paris et Lille
1952	Création des Directions Régionales des télécommunications, les DR
1952	Inauguration de la première liaison téléphonique française par faisceaux hertziens entre Dijon et Paris
1952	Premier câble coaxial de la DGT
1954	Premiers postes radio à transistor
1956	Câble transatlantique transistorisé
1957	Traité de Rome européen
1957	Premiers magnétoscopes
1957	Premier satellite Spoutnik
1958	Création de Socotel
1959	Réseau hertzien de l'ORTF
1959	Premiers circuits intégrés de J. Kilby et R. Noyce
1962	Naissance de la mondovision. Les 10 et 11 juillet, à Pleumeur-Bodou, les techniciens et ingénieurs du CNET reçoivent par satellite les premières images venues des Etats-

	Unis
1963	Commutateurs Crossbar CP400 et Pentaconta
1966	Mise en service, dans la région parisienne, de la première liaison numérique multiplex utilisant la modulation par impulsion et codage (MIC)
1966	Télévision en couleur en France
1966	Plan calcul
1967	Création de la Caisse Nationale des Télécommunications, CNT
1969	Création des Sociétés de financement des télécommunications
1970	Autocommutateur temporel PLATON
1970	Fibres optiques de Corning Glass
1971	Premiers microprocesseurs
1971	Création des Directions Opérationnelles à France Télécom, les DO
1972	Les Centres d'Abonnement et d'Entretien (CAE) deviennent les Centres Principaux d'Exploitation (CPE)
1973	VI ^e Plan : la DGT, premier investisseur public
1974	Satellite Symphonie de télécommunications
1974	Réforme de l'ORTF et séparation de TDF
1974	Réforme du CNET, création de la Direction des affaires industrielles
1975	VII ^e Plan : il fait du téléphone la priorité des priorités. Il met en place un processus de rattrapage téléphonique (Delta LP)
1977	Choix de la communication temporelle
1978	Le rapport Nora-Minc encourage la France à explorer les voies de la télématique
1978	Réseau TRANSPAC
1979	Débuts du programme Télétel de vidéotex et annuaire électronique
1979	Mise en place d'une politique de formation professionnelle de pointe avec la création de la Direction de la Formation Professionnelle des Télécommunications (DFPT) et de l'Institut National des Télécommunications (INT)
1979	Mise en place d'une nouvelle organisation territoriale des télécommunications françaises par Zones
1981	Lancement du satellite Télécom 1A
1982	Loi de communication et création de la Haute autorité
1982	Lancement du « Plan câble »
1984	Mise en place du système de tarification des communications téléphoniques « bleu, blanc, rouge »
1984	Démantèlement du <i>Bell System</i> d'ATT aux USA : la déréglementation mondiale des télécommunications débute
1985	Mise en place d'une nouvelle numérotation téléphonique
1986	Loi de communication et création de la CNCL
1987	Privatisation de la première chaîne de télévision
1987	« Livre vert » de la Commission européenne sur les télécommunications, en vue de l'ouverture du marché européen en 1993
1988	Le premier câble transatlantique par fibre optique, TAT 8, est mis en service
1988	France Télécom inaugure le réseau numérique à intégration de services (RNIS), <i>Numéris</i>
1988	Lancement du satellite TDF1
1988	La Direction Générale des Télécommunications prend le nom de France Télécom
1989	Loi de communication et création du Conseil Supérieur de l'Audiovisuel, le CSA
1990	Loi de réforme des PTT
1990	Loi de réglementation des télécommunications

1991	Le premier janvier, France Télécom devient exploitant autonome de droit public
1998	Le premier janvier, libéralisation du secteur des télécommunications : déréglementation et privatisation des administrations des Télécoms de tous les pays membres de l'Union Européenne.
2004	L'Etat français devient actionnaire minoritaire de France Télécom en vendant une partie de son actif (actions France Télécom cotées en bourse). France Télécom devient ainsi une société privée, dont l'Etat détient moins de 50 % du capital.

Sources : C.Turck, LIV, 2005.

Figure 48 : Tableau de synthèse : Evolution chronologie des télécommunications

-  1464 – 1917 : Les origines des Télécommunications
-  1919 – 1944 : L'automatisation du téléphone
-  1944 – 1973 : L'électronisation des Télécommunications
-  1974 – 1991 : Numérisation des Télécommunications et évolutions réglementaires

Chapitre 2 : Vers la ville numérique

« Au cours du dernier quart du XX^{ème} siècle, trois mouvements ont convergé pour instaurer une nouvelle structure sociale entièrement fondée sur les réseaux : les besoins de l'économie en matière de gestion flexible et de mondialisation, de la production et du commerce ; l'évolution des aspirations de la société pour lesquelles les valeurs de liberté individuelle et de communication sans contraintes sont devenues essentielles ; et enfin les progrès extraordinaires de l'informatique et des télécommunications rendus possibles par la révolution de la microélectronique. »

Manuel Castells, 2002, *La galaxie Internet*, Editions Fayard.

1 – Introduction

Depuis un siècle, notre pays a vécu de grands bouleversements historiques et géopolitiques (la montée du nationalisme, les deux guerres mondiales, la décolonisation, la guerre froide, la construction européenne, l'écroulement du mur de Berlin, etc.). Le XX^{ème} siècle s'est également accompagné d'une croissance économique sans précédent. Plusieurs décennies d'évolutions technologiques, d'efforts et d'investissements publics et privés, furent nécessaires pour transformer notre société, et améliorer les conditions de vie de tout un chacun : pour que le téléphone fixe s'installe dans tous les foyers, pour que l'électroménager et la télévision, se diffusent chez tous et change le rapport au son, à l'image, et à l'information.

La révolution technologique que nous vivons depuis 10 ans est d'une toute autre nature : elle se caractérise par sa rapidité et par son impact sociétal important. Elle entraîne une modification profonde des modes de vie des français : 35 millions d'entre nous possèdent un téléphone portable ; 25 millions ont un ordinateur, 16 millions ont accès à Internet ; et un salarié sur deux utilise un ordinateur dans son travail. Ces chiffres ont été comptabilisés pour l'année 2001, depuis (2001-2005) ils ont encore progressés. Force est de constater qu'en l'an 2005, la très grande majorité des jeunes et des adultes de notre pays vivent, consomment, s'informent et communiquent dans des conditions radicalement différentes de celles qui prévalaient, il y a seulement dix ans. Encore ne sommes-nous qu'à l'aube de transformations numériques plus profondes encore, induites par l'implantation croissante des NTIC dans notre espace géographique : bornes interactives dans les lieux publics, télétravail, télémédecine, télésurveillance et télérégulation des flux de véhicules, salariés joignables n'importe où grâce à leur téléphone mobile, diffusion du réseau Internet à travers le monde entier même dans les espaces les plus isolés (zones montagneuses, zones rurales enclavées, zones maritimes, etc.).

Cette révolution concerne aussi le monde de l'économie et des finances. En effet, malgré l'éclatement de la bulle Internet, le monde d'aujourd'hui change de bases. Qui aurait pu imaginer, il y a seulement 10 ans, que le plus important procès anti-trust de ces cinquante dernières années concernerait une société de logiciel (Microsoft) ? Qui aurait pu imaginer, il a dix ans, que la plus forte capitalisation boursière d'Europe serait une société finlandaise leader de la téléphonie mobile (Nokia) ? De même, qui aurait pu imaginer, il y a 10 ans, la vision au combien visionnaire de John Chambers⁹³ lorsqu'il déclarait alors : « Dans la nouvelle économie, ce ne sont plus les gros qui mangent les petits mais les rapides qui mangent les lents » ?

⁹³ John Chambers est le Président Directeur Général du groupe Cisco Systems.

Cette révolution a aussi ses effets pervers : on constate l'émergence de nouveaux exclus, qui n'ont pas accès à la formation aux NTIC et qui, exclus de la ville numérique interpellent notre responsabilité sociale. Est-elle meilleure la société où se creuse l'écart entre, d'une part, ceux qui ont accès aux NTIC et, d'autre part, ceux dont la formation insuffisante rend l'insertion dans la société numérique actuelle de plus en plus difficile, par exemple quand l'utilisation d'un ordinateur leur est impossible.

Certes, certaines personnes soutiennent que la révolution numérique crée les conditions de la transparence de l'information, d'une concurrence saine entre les acteurs économiques et de l'accroissement des échanges internationaux. Mais, il est légitime que l'ensemble de la société puisse profiter des améliorations offertes par les Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication. La révolution numérique entraîne pour notre système éducatif l'obligation de faciliter chez tous, dès le plus jeune âge, une bonne maîtrise de quelques compétences informatiques fondamentales comme par exemple l'utilisation d'un traitement de texte ou d'un tableur, la navigation sur Internet, la communication par e-mails, ou bien encore le téléchargement et l'installation d'un logiciel. La diffusion de ces compétences revêt aujourd'hui pour l'éducation nationale et la formation professionnelle des adultes, particulièrement dans nos banlieues défavorisées, une grande importance sociale.

La Société de l'Information n'est pas née lors de la création du réseau Internet⁹⁴. Si elle se résumait à une simple mutation technique, elle n'aurait qu'un intérêt limité. Or, il s'agit d'un phénomène bien plus vaste et complexe, à la fois technologique, économique et culturel, et qui n'est pas encore achevé.

La Société de l'Information entend décrire un modèle de société dans lequel l'information peut s'échanger de façon universelle et instantanée, sous une forme numérique unique, rendue possible grâce à l'invention de la numérisation de l'information, dont les industries et services dans le secteur de la Communication (informatique, audiovisuel, multimédia, et télécommunication) constituent le secteur clé et dans laquelle l'ensemble du processus d'innovation, de production et d'échange s'appuie de manière croissante sur l'informatique et les télécommunications. Quant aux réseaux de télécommunication, comme le dit Castells⁹⁵, ils constituent « la nouvelle morphologie sociale ».

L'essor du téléphone, de la radio, de la télévision puis de l'informatique a joué un rôle important dans l'évolution de notre société au cours du XX^{ème} siècle.

Les grands progrès technologiques de ces trente dernières années ont induit l'uniformisation du stockage de toute information selon le mode numérique et la convergence entre télécommunication et informatique, phénomène qui conduisit Simon Nora et Alain Minc dans un rapport de 1978 à inventer le terme de *télématique*.

Ainsi, la société de l'information est tout d'abord le résultat de l'informatisation de la société. Elle ne résulte donc pas simplement de l'irruption de l'internet. La société de l'information émerge véritablement depuis une trentaine d'années, du fait de la mutation des technologies vers le « tout numérique », et des économies développées vers une économie de services.

Ainsi, comme la société industrielle avant elle, la « société informationnelle » émerge d'abord dans le domaine de l'économie. Cette émergence se manifeste par la croissance rapide des secteurs économiques liés à l'information et la communication, ce qui correspond à 5,5 % du PIB et à 3 % des emplois⁹⁶ en France pour l'année 2001.

L'information est désormais un facteur de production essentiel au sein de toutes les entreprises, et les systèmes d'information constituent un élément essentiel dans les grandes

⁹⁴ Pour de plus vastes explications sur ce sujet, se référer au Livre Blanc de Jacques Delors, publié en 1992.

⁹⁵ Manuel Castells, 2002, *La galaxie Internet*, Editions Fayard

⁹⁶ Notes du Ministère des finances, 2001.

entreprises françaises et près des trois quarts des PME. Presque toutes sont désormais connectées à Internet. Pour l'année 2004, on comptabilisait 75 % de salariés français⁹⁷ travaillant sur un ordinateur. L'information est donc un facteur de production au même titre que le capital et le travail : quand les flux tendus permettent aux entreprises de réduire leurs stocks, c'est bien de l'information qui se substitue au capital.

Mais la révolution des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication affecte aussi tous les aspects de la vie sociale et ses usages pénètrent de plus en plus dans la sphère privée : en l'an 2001, on comptabilisait ainsi 30 % de Français utilisant Internet, 35 % de foyers disposant d'un ordinateur et près de 20% d'entre eux connectés à Internet.

Les nouveaux outils numériques occupent également une part croissante du temps consacré aux loisirs. Une enquête⁹⁸ de décembre 2001 montre d'ailleurs que l'ordinateur et le téléphone portable constituent les changements les plus visibles et les plus appréciés du cadre de vie des Français. L'utilisation croissante du réseau Internet à des fins non-marchands et son appropriation individuelle, que traduisent les millions de sites personnels des particuliers, est l'indice de l'apparition de nouvelles pratiques sociales.

Pourquoi cet avant-propos prospectif ? Parce qu'il est important de prendre conscience que la société de l'information est bien une réalité désormais vécue au quotidien, et que les mutations qu'elle engendre n'ont pas encore produit tous leurs effets sur notre société. N'en sous-estimons donc ni l'ampleur, ni les impacts géographiques (aménagement de l'espace ; phénomènes se diffusant encore actuellement dans les espaces les plus reculés, comme par exemple le développement du réseau Internet ; la numérisation des informations de tout type). Demain, c'est dans la généralisation de la capacité à communiquer de tous les objets techniques⁹⁹ qu'une nouvelle révolution technologique et sociale se prépare, dont les conséquences sont difficiles à prévoir.

L'étape suivante, qui se prépare déjà dans certains hôpitaux (télé médecine) ou dans des laboratoires de recherche civiles et militaires (drone combiné à un Système d'Information Géographique mobile mettant automatiquement à jour « en temps réel » des informations géographiques mesurées sur le terrain, etc.) verra l'hybridation croissante de l'humain et de la technologie, à travers les deux voies contradictoires qu'incarnent le robot¹⁰⁰, machine dont l'intelligence tend vers l'humain (Intelligence Artificielle), et le cyborg, humain aux éléments biologiques duquel sont ajoutés des composants technologiques (téléphone mobile sans antenne de réception où c'est le pouce de la personne qui sert d'antenne ; œil électronique relié aux cellules grises du cerveau et permettant la reconnaissance individuelle par l'iris, etc.).

Comme bien souvent, on constate que les évolutions réelles sont moins rapides que ce qu'on prévoyait (par exemple le retard dans la mise en place de l'UMTS en France), mais plus profondes que ce qu'on croit. La « révolution numérique », base technologique de la société de l'information produit du changement dans la société elle-même. Cette révolution n'est en soi ni bonne, ni mauvaise. Des choix collectifs sont donc nécessaires, qui nourriront les grandes politiques publiques (éducation, santé, réformes des services publics et des

⁹⁷ INSEE, 2004.

⁹⁸ Sondage Louis Harris, effectué en 2001, pour le groupe Siemens sur 1000 personnes de 15 ans et plus sur les innovations qui ont changé la vie des Français.

⁹⁹ Confère articles de presse publiés en 2003 par France Télécom Recherche et Développement concernant les « nouveaux objets communicants » : vêtements communicants, assistants personnels (PDA) de troisième et quatrième génération, etc.

¹⁰⁰ Voir les travaux des laboratoires de recherche du Massachusetts Institut of Technology aux USA (<http://web.mit.edu>), et du groupe Honda au Japon (<http://www.honda.fr/html/fr1/corporate/recherche/shtml>).

infrastructures des territoires...), ainsi que les options technologiques qui seront adoptées en matière d'équipement informatique et d'accès à Internet.

Le domaine des technologies de l'information est traversé, depuis ses origines, de conflits de valeurs et de débats sociopolitiques. Pour s'en convaincre, il suffit de se rappeler les origines du micro-ordinateur : il est né d'un projet social qui visait à favoriser l'accès à l'information et à fournir à tout un chacun une puissance de calcul conséquente. Face à l'informatique professionnelle lourde et coûteuse, incarnée par le modèle des gros ordinateurs IBM, les serveurs, une génération de jeunes ingénieurs et informaticiens californiens revendiquèrent le droit à « l'information et la capacité de traitement de l'information pour tous ». L'invention du microprocesseur, les premiers micros Altair, puis le Mac Intosh vont ainsi réaliser partiellement cette utopie généreuse. IBM essaya dans un premier temps de contrecarrer le développement de la micro-informatique grand public, puis se rallia à l'ordinateur personnel.

Un autre exemple intéressant à étudier, du point de vue sociologique, est celui de la création du réseau Internet. Beaucoup pensent qu'Internet a été conçu à l'origine par les militaires du Pentagone pour leurs seuls besoins de communications militaires. Mais la réalité est toute autre : le réseau Internet a été inventé par des chercheurs pour relier entre eux les ordinateurs des centres de recherche publique américains. Internet, son architecture orientée vers la libre circulation de l'information et la liberté d'expression, porte la marque du milieu universitaire californien, dans lequel il fut inventé. Les opérateurs de télécommunications se sont longtemps méfiés du protocole informatique qui est à la base du réseau Internet, car il est fondé sur une logique décentralisée : ils lui ont longtemps préféré une architecture fondée sur la notion de circuit, comme dans la téléphonie. C'est la raison pour laquelle le processus d'élaboration des standards de l'internet (les *Request For Comment*, RFC), qui fut mis au point par des chercheurs, est profondément imprégné d'une éthique académique, fondée sur la circulation de l'information, la confrontation, les prototypes et l'expérimentation.

Les normes techniques comme par exemple la norme internet RCF présentée ci-dessus, ne sont pas neutres. Nourries de valeurs collectives, elles en produisent à leur tour.

Ainsi une autre révolution technologique importante à signaler est le développement du concept de logiciels libres de droit de propriété intellectuelle. Le mouvement du logiciel libre est né, à la même époque que le réseau internet, sur les campus américains. Tout commença quand l'université de Berkeley diffusa une version du système d'exploitation Unix, libre de droits de propriété intellectuelle. Les grands constructeurs de matériel informatique ne virent pas ce projet d'un très bon œil, ce qui les incita à reprendre en main le système d'exploitation Unix. Ceci incita alors Richard M. Stallman à concevoir le projet « open source » GNU¹⁰¹, qui contient entre autre un système Unix libre de droit.

Notons également que les principaux outils de l'internet (serveurs, navigateurs, messageries, téléchargement peer to peer, etc.) appartiennent eux-mêmes majoritairement au monde du logiciel libre.

Cette analyse scientifique des enjeux de la société de l'information, doit nécessairement prendre en compte la dualité fondamentale sur laquelle repose aujourd'hui la société française. Celle-ci est en effet marquée par une forte demande de liberté individuelle dans la sphère privée. Cette aspiration ne se résume pas à de l'égoïsme ou du repli sur soi, bien au contraire : elle correspond à une valorisation de l'autonomie de l'individu et de l'épanouissement personnel. Entraînant un déclin du conformisme, elle conduit à mettre en avant des notions de tolérance et de respect vis-à-vis des choix de chacun.

¹⁰¹ <http://www.gnu.org>

Mais notre société est tout autant marquée par une demande de protection et de cohésion sociale dans la sphère publique, engendrant des attentes à l'égard de l'Etat. Cette demande émerge sous diverses formes : une forte demande de sécurité personnelle ; une demande de régulation économique, etc.

Société de l'information, société en réseaux, villes et territoires numériques, NTIC... ces notions cernent, chacune, une facette de la société qui se construit, sous l'impulsion conjuguée du progrès technique, d'une nouvelle dynamique économique et de pratiques sociales innovantes. La forme que revêtira cette « société de l'information » est loin d'être écrite. Si les choix individuels sélectionnent certains usages, technologies ou services, ce sont les choix collectifs qui façonnent la société en réseaux.

Nous avons souhaité ouvrir ce chapitre par une analyse prospective des technologies émergentes, des usages qui s'en dessinent et des mutations sociales qui les accompagnent.

2 – Vers une société de l'information, une société en réseau

La technique n'est pas une révolution en soi. La technique peut simplement traduire, voire canaliser des transformations profondes de l'économie ou de la société.

En termes de vie sociale, de culture, le fait majeur induit par les NTIC, c'est l'émergence de nouvelles pratiques sociales fondées sur l'échange et la coopération.

La société de l'information ne sera pas structurée par les seules forces de l'innovation technologique, du travail, des loisirs, et de l'économie. Des tendances sociales individuelles et collectives profondes sont également à l'œuvre.

Le réseau Internet est en train de devenir l'interface commune à toutes les communications. Ce qui est en cours, ce n'est pas le remplacement des réseaux existants par le réseau Internet, mais leur interconnexion généralisée : tout appareil connecté à n'importe quel réseau, de n'importe quelle manière, pourra, par l'intermédiaire d'Internet, communiquer avec tous les autres appareils ; et cette révolution n'en est qu'à ses débuts.

Dans les dix ans à venir, il est probable que beaucoup d'appareils électriques posséderont leur adresse « IP » (*Internet Protocol*) : des ordinateurs aux téléviseurs, en passant par les appareils électroménagers (réfrigérateur connecté à Internet, cafetière programmable), les dispositifs de sécurité (alarme, volets roulant, portail, luminaire, etc.), les machines-outils, etc. Les usages n'en seront pas toujours spectaculaires (la domotique¹⁰², etc.), mais on verra aussi se développer l'interactivité sur les téléviseurs (confère travaux de recherche de Dominique Turck¹⁰³ sur la télévision à la demande par le câble), la vidéo haute définition sur les ordinateurs, la visiophonie, et une multitude de services à distance. La question de la connexion à Internet ne se posera pratiquement plus – si vous avez l'eau et l'électricité, vous aurez aussi l'internet.

La connexion à Internet sera également présente sur les téléphones mobiles, bien au-delà de ce que nous connaissons aujourd'hui. Introduit en France depuis fin 2004, le réseau UMTS offre aux mobiles des capacités de communication infiniment plus riches que le réseau GSM. On voit émerger des téléphones assistants personnels en connexion continue avec ses sites web préférés, ou bien en Intranet avec son entreprise dans le cas d'une utilisation professionnelle, et avec une multitude de services disponibles : des appareils photos intégrés aux mobiles et qui transmettent immédiatement leurs images aux destinataires, des baladeurs qui téléchargent la musique de notre choix, des écrans haute définition qui permettent de visionner des images vidéo sur son téléphone mobile, des navigateurs pour surfer sur le net

¹⁰² Domotique : confère lexicque.

¹⁰³ Dominique Turck, 1997, *Mise en place des expérimentations dans le domaines des NTIC*, Mémoire de DEA, Ecole Normale Supérieure, Département de Science Politique et de Sciences Sociales, Cachan, 121 pages.

grâce à son téléphone. Les véhicules, dont les modèles hauts de gamme utilisent déjà aujourd'hui une puissance informatique équivalente à celle des premiers avions de ligne, deviendront communicants (voir même les véhicules moyen de gamme comme c'est déjà le cas actuellement pour la Toyota Yaris série « Bluetooth¹⁰⁴ ») – qu'il s'agisse d'indiquer un itinéraire ou de transmettre à un centre de sécurité les coordonnées et la localisation du véhicule en cas de panne ou d'effraction.

On assiste depuis dix ans à une véritable mutation dans le secteur des opérateurs de télécommunication, qui changent de domaine d'expertise : de « télécommunication » ils passent à celui plus vaste de « communication ». Peut-on encore parler de simple « téléphone mobile » dans le cas des portables de troisième génération (communément appelé « mobile 3G ») type PDA. Le « mobile 3G » permettra de payer sa place de parking (service expérimenté par SFR à Issy-les-Moulineaux en 2003), d'accéder à l'agenda partagé de son entreprise ou au Système d'Information Géographique partagé de son bureau d'étude, ou bien encore à la centrale domotique de sa maison. Une demande initiée à domicile (une réservation d'hôtel ou une recherche d'itinéraire) sera confirmée pendant le trajet en voiture sur un appareil mobile, qui recevra également sur son écran haute définition l'itinéraire routier à emprunter et la confirmation de la réservation de l'hôtel.

L'impact de la distance et du temps sur les coûts de communication via Internet diminue de jour en jour ; ainsi à San Francisco dans la Silicon Valley, l'accès à Internet haut débit est gratuite et ce même pour les clients connectés 24 heures sur 24, qui ne payent qu'un droit de connexion à Internet mensuel pour une somme modique. C'est vraisemblablement plutôt en terme de niveau de service, de valeur ajoutée et de fréquence d'utilisation que nous raisonnerons demain.

La poursuite de la croissance de l'internet à travers le monde entier continue. Fin 2001, on comptabilisait¹⁰⁵ 515 millions d'utilisateurs d'Internet à travers le monde. Mais il est vrai que c'est encore trop peu par rapport aux 6 milliards d'êtres humains résidant sur notre planète. Il s'échange environ 10 milliards de courriers électroniques par jour dans le monde ; aux Etats-Unis, le courrier électronique dépasse le courrier postal, qui pourtant ne décroît pas. Depuis 2001, le taux de trafic des données sur les réseaux de télécommunication mondiaux supplante celui du trafic téléphonique.

Le développement du réseau Internet a également engendré une formidable dynamique de création. Création d'entreprises¹⁰⁶, d'abord : au premier semestre 2000, 5400 entreprises (soit 5,7 % du total des créations en France, contre 3,9 % en 1996) ont été créées dans le secteur des technologies de l'information et de la communication.

Le commerce électronique et les offres de services en ligne connaissent également une forte croissance, mais celles-ci sont plus nettes dans les échanges inter-entreprises (le « business to business » ou B2B), où les réseaux transportent près de 10 % de la valeur des échanges mondiaux, qu'auprès des consommateurs privés : malgré une forte croissance, le commerce électronique résidentiel ne représentait, en 2002, que un peu plus de 1 % de la consommation des ménages aux Etats-Unis, et moins de 0,5 % en France. Mais on assiste depuis un an à une croissance continue du commerce électronique auprès des ménages (achat de matériel informatique et hifi, banque à distance, courses alimentaires, etc.).

L'impact du commerce électronique sur les déplacements des ménages liés à l'achat de biens n'est pas négligeable. Il introduit un bouleversement dans les modes d'achats des ménages, qui ont la possibilité de faire leurs achats directement de chez eux, sans se déplacer. Ceci

¹⁰⁴ Bluetooth : confère lexique.

¹⁰⁵ Sources : UIT, 2002.

¹⁰⁶ Sources : Ministères de l'Economie, 2001.

engendre une diminution des déplacements de la population pour ce type d'activité. Ce sont les livreurs et les facteurs qui se déplacent dans le cas présent.

On observe également des changements en ce qui concerne les déplacements journaliers des salariés : le développement du télétravail, et du travail en réseau entraîne soit une diminution de la mobilité liée au travail, soit une modification du lieu de travail (télécentres de travail dans les technopoles équipés de réseaux très hauts débits).

Une évolution dans l'entreprise des modes et des moyens de travail :

Le secteur des technologies de l'information et de la communication représente une part croissante de la production nationale ; mais cette part, aujourd'hui de 6 %, ne dépassera guère les 8 % dans les dix prochaines années. L'impact économique le plus profond de la « société de l'information » proviendra de l'utilisation de nouvelles techniques, méthodes et stratégies dans les autres secteurs économiques.

Dans les années à venir, la capacité à recueillir l'information, la traiter et l'exploiter, à travailler en réseau sera plus que jamais une condition première de compétitivité des entreprises. Grâce aux réseaux de télécommunication, les entreprises collaboreront et se feront concurrence au sein de « places de marché » mondiales et non plus uniquement nationales, et qui concerneront tous les secteurs d'activité : la production de matières premières, l'automobile, le BTP, la distribution, les services.

Des nouveaux intermédiaires émergent dans des secteurs-clé tels que les services à la personne, la relation avec la clientèle (Amazon, les fournisseurs d'accès à Internet, les banques, Canal +, etc.) avec l'apparition des centres d'appels téléphoniques et des serveurs web, ou de la logistique. La « gestion de la relation client » devient une priorité de plus en plus grande des entreprises. Sur des marchés plus concurrentiels, où le rythme croissant d'innovation « banalise » de plus en plus vite les produits, la différenciation concurrentielle repose désormais sur la qualité du service et de la relation avec les clients.

Si le télétravail rencontre vite ses limites dans la mesure où le fonctionnement d'une équipe réclame de nombreux échanges informels, la nécessité de rester en contact suscite un fort développement des usages mobiles et de formes de télétravail « à temps partiel », certains jours de la semaine.

Les jeunes : vers un nouveau mode d'acquisition des connaissances :

De leur côté, les jeunes générations auront, du fait de leur familiarité avec les outils informatiques, une approche du travail et du savoir profondément différente de la notre. Il y a 50 ans, l'apparition de la voiture personnelle, puis de l'avion et du TGV, a induit une explosion des déplacements des gens sur de plus grandes distances, une mobilité accrue. Aujourd'hui l'apparition des technologies mobiles (téléphones et ordinateurs portables, GPS, etc.) augmente encore cette mobilité, et entraîne un changement du rapport aux lieux : on peut être accessible, connecté, de n'importe où, on peut travailler n'importe où. Ainsi, notre relation à l'espace et au temps change de bases.

La plupart des jeunes auront été exposés aux outils technologiques, baignés dans cet environnement numérique, depuis leur enfance : à l'école, à leur domicile, dans les lieux publics, dans les commerces... Ils seront en mesure de désacraliser la technique pour la ramener au rang d'outil numérique. L'utilisation quotidienne des appareils numériques induira un rapport différent à l'information. Il sera moins nécessaire de les former aux outils technologiques, qu'à la manière de travailler à l'aide de la technologie. Cet apprentissage consistera moins en une accumulation de savoirs, qu'en l'acquisition de la capacité de recueillir, croiser, exploiter l'information pour ensuite produire et diffuser une nouvelle

information. Les modes de raisonnement des enfants exposés très tôt à l'informatique sont différents de ceux des adultes : cet écart ira croissant dans les années à venir. Nous ne savons guère en mesurer l'impact, le potentiel et les risques. Quel est le « socle de connaissances » nécessaire à une bonne appréhension, critique, des énormes stocks de connaissance qui seront disponibles en ligne ? Quels types de connaissance et de création l'utilisation « on-line » de cette connaissance produira-t-elle, et quels types ne saura-t-elle pas produire ? Bref, qu'enseigner, comment et quand ?

Une large utilisation dans la vie quotidienne, pas une vie « virtuelle » :

La généralisation de l'informatique des réseaux ne va pas transformer la vie quotidienne des Français en une vie « virtuelle » à la manière du film « Matrix¹⁰⁷ ». Plusieurs signes indiquent que les utilisateurs matures de l'internet constituent peu à peu leur propre « écologie de la communication » qui laisse une place importante à la vie « hors ligne » et dément les thèses de certains qui annoncent une société d'autistes : les sites commerciaux de l'internet sont plus efficaces pour attirer les clients dans une boutique que pour lui vendre un produit en ligne ; on observe une demande de protection de la vie privée de la part des internautes (droit à la déconnexion, à l'anonymat, à l'absence de traces¹⁰⁸) ; on observe également une sous-utilisation des capacités interactives des mobiles (Wap, vidéo, musique,...) au profit de leur fonction de base [communications par la voix ou le texte (SMS)].

En effet, l'UMTS est disponible auprès des trois opérateurs de téléphonie mobile depuis l'automne 2004, mais encore très peu de clients se sont équipés jusqu'ici de téléphones portables multimédia de troisième génération (3G), contrairement au Japon où l'utilisation de la 3G explose. Ceci s'explique entre autre du fait du coût élevé de l'abonnement et des e-services (consultation de sites web, de la télévision, des services localisés : restaurants situés à proximité, paiement de place de parking, itinéraire routier interactif, etc.) Pour la ville de Strasbourg, par exemple, depuis 6 mois, seules quelques centaines de clients (au total, pour les trois opérateurs de téléphonie mobile) se sont équipés en téléphones portables utilisant la technologie UMTS. Il faudra peut-être encore attendre deux ou trois ans, comme lors du développement d'Internet en France il y a dix ans, pour que les consommateurs s'équipent en téléphones 3G (lors du renouvellement de leur téléphone mobile). D'ici là le prix des e-services aura également diminué.

L'ère du robot domestique, du frigidaire qui fait les courses tout seul, ne semble pas près d'advenir. La technologie est pourtant en passe de rendre tout cela possible. Il y aura bel et bien des puces, des capteurs et des réseaux partout dans la maison, laquelle sera connectée au monde extérieur par un câble numérique à haut débit.

Il est probable que l'on demandera avant tout à cette « intelligence numérique » de ne pas coûter cher et de se faire oublier sauf en cas de besoin, un peu comme lorsque l'on prend une assurance. Beaucoup de ces dispositifs serviront par ailleurs plutôt à établir le contact avec des services humains, plutôt qu'à tout automatiser : depuis la centrale de sécurité jusqu'au service de dépannage, etc.

Bien évidemment, l'usage des moyens de télécommunication numériques pour communiquer, consommer, jouer, connaîtra une forte croissance. Il y aura aussi des excès : comme c'est le cas pour la télévision, certaines personnes restent connecter à Internet (jeux en réseau, chat, NetMeeting, etc.) pendant des heures chaque jours. Mais il semble peu probable que l'utilisation des NTIC entraîne celle d'une généralisation de ce type de comportement ; ce

¹⁰⁷ *The Matrix*, 1999, USA, un film de Andy et Larry Wachowski.

¹⁰⁸ Se référer aux missions de la CNIL, la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés.

Web : <http://www.cnil.fr>

serait plutôt le contraire, comme en témoigne la pression en faveur d'une attitude plus civile des possesseurs de téléphones portables (par exemple concernant leur usage dans les trains, les voitures, etc.), qui progresse en même temps qu'augmente le taux d'équipement des ménages.

La mise en réseau a engendré l'émergence de pratiques de partage et d'échange révolutionnaires. Des standards informatiques ouverts ou des logiciels libres au partage de fichiers, du knowledge management (gestion et partage des connaissances et du savoir, formel et informel, au sein d'une communauté) aux forums de discussion, l'idée s'impose que le partage du savoir et la création peut être plus épanouissante, plus créative, que le verrouillage, lequel devient par ailleurs de moins en moins possible tant l'information circule vite et se duplique facilement.

La pratique de l'échange de l'information s'accompagne aussi d'une demande croissante de transparence et de responsabilisation des individus. Pour le meilleur et pour le pire, les oeuvres interdites, les rapports mis au placard, les informations que l'on tente de cacher, les sondages impubliables, seront publiés en ligne, sur Internet.

En accélérant les communications, les réseaux de télécommunication favorisent l'intégration mondiale. Cette intégration se voit d'abord au plan économique. Les stratégies des grands groupes sont désormais clairement mondiales, et les réseaux leur fournissent le moyen de mettre en œuvre ces stratégies avec une efficacité sans précédent.

Les débats sur la régulation du « réseau des réseaux », le réseau Internet, montrent combien il est difficile de réguler les usages et les contenus sur un réseau qui ignore très largement les frontières.

Dans un certain nombre de domaines et de populations, la technologie sera bel et bien le vecteur d'une certaine homogénéisation. Dans son ouvrage « La société en réseaux¹⁰⁹ », Manuel Castells décrit ainsi l'émergence d'un « espace des flux » qui relie un certain nombre de grandes métropoles économiques mondiales, lesquelles s'autonomisent vis-à-vis de leur territoire géographique et s'homogénéisent entre elles. Les classes dirigeantes de cette économie mondialisée partageront vraisemblablement au moins autant de références et de valeurs entre elles, qu'avec leurs concitoyens respectifs.

Inversement, l'utilisation croissante des NTIC introduira de nouveaux facteurs d'hétérogénéité. Plus les usages en réseau pénétreront la vie quotidienne des gens, plus ils se différencieront. Les langues, les cultures, les pratiques sociales de chaque communauté imposeront leur logique propre. On en a déjà un aperçu avec la manière très différente dont les télécommunications mobiles se développent au Japon, en Europe et aux Etats-Unis ; l'observation pourrait se poursuivre plus finement, par communautés locales, groupes sociaux, groupes professionnels. Au plan de la langue utilisée comme médium sur Internet, s'il était possible de se satisfaire d'un Internet anglophone tant que celui-ci demeurerait essentiellement écrit et s'adressait principalement à des cadres dans leur contexte professionnel, le monolinguisme devient intenable dès lors que les contenus s'adressent à tout le monde, et sont autant audiovisuels qu'écrits. En 2005, la part de l'anglais sur le web serait déjà descendue à moins de 60 %. Ainsi, les réalités et les différences locales, nationales et continentales reprennent leurs droits. C'est aussi vrai du point de vue de l'innovation technologique et économique : en matière d'innovation sur Internet, les idées ne viennent plus seulement des Etats-Unis. Le Canada est en pointe sur l'e-formation ; le Japon et la Finlande, sur la mobilité ; la Suède, sur l'usage du haut débit.

¹⁰⁹ Manuel Castells, 2001, La société en réseaux, Tome 1 à 3, Editions Fayard.

3 – Collectivités territoriales et Aménagement du territoire : Vers un accès aux réseaux partout ?

L'internet « lent » (56 Ko/s) est disponible partout sur le territoire français, pour peu que l'on puisse s'équiper du matériel informatique nécessaire (ordinateur équipé d'un modem 56K).

Mais les choses sont différentes en ce qui concerne le haut débit et l'internet mobile. En effet, pour mettre en place un réseau Internet haut débit et mobile, on ne peut pas utiliser les infrastructures locales téléphoniques préexistantes, les câbles coaxiaux ne pouvant supporter qu'un débit maximal de 56 KiloOctets par seconde. Pour la première fois dans l'histoire de l'internet, il est nécessaire d'investir dans une infrastructure nouvelle qui lui soit entièrement dédiée, en l'occurrence des câbles en fibre optique pour le haut débit, et des antennes relais et des paraboles pour l'internet mobile. Mais la mise en place de ces nouvelles technologies suppose un apport financier important. Ces infrastructures de télécommunication sont, la plupart du temps, installées par des sociétés et des acteurs privés.

Depuis une dizaine d'années, on observe que ces infrastructures ultramodernes de télécommunications se développent par « poches » en fonction de la densité démographique et du type de catégories socioprofessionnelles d'une zone géographique donnée, du dynamisme économique et de la solvabilité du marché local, de la disponibilité d'infrastructures de support... Ainsi sur l'ensemble du territoire français, on constate l'existence de réseaux de télécommunication et de modes d'accès très hétérogènes et aux capacités inégales selon les zones géographiques. Cette situation risque de perdurer durablement sur notre territoire, si rien n'est mis en œuvre par l'Etat et les collectivités locales afin de combler le fossé existant entre les espaces géographiques les moins favorisés économiquement et socialement (banlieues défavorisées et zones rurales) et les espaces à forte « valeur ajoutée » (quartiers aisés, centres d'affaires, zones d'activités, technopoles), afin de favoriser l'accès aux technologies de l'information et de la communication pour tous.

L'UMTS, le haut débit, les services évolués et à forte valeur ajoutée (services localisés interactifs, informations en temps réel, interopérabilité, multimédia à la demande, etc.) dressent ainsi la carte d'un réseau Internet « haut de gamme » auquel accéderont ceux qui peuvent le payer et résident « au bon endroit ». En terme de prospective, un scénario plausible pour les dix ans à venir serait celui d'un Internet à deux vitesses : les services de base à faible valeur ajoutée [Internet bas débit, téléphonie fixe, téléphonie mobile de deuxième génération uniquement (GSM)] persistant en l'état dans le modèle actuel de répartition des réseaux de télécommunication sur l'espace français, les fonctions et services à forte valeur ajoutée étant pour leur part développés dans un contexte « propriétaire », contrôlé par quelques grands acteurs économiques, offrant à leurs clients privilégiés la qualité de service, la sécurité du réseau, le débit élevé,... Mais ce scénario aboutirait probablement à la dégradation progressive du service de base (Internet bas débit), et au développement de sous-réseaux évolués plus coûteux, adaptés à des usages professionnels exigeants ou à des usages de diffusion de contenus et de services à sens unique. Pour éviter que se produise un tel scénario, il est du rôle de l'Etat et des collectivités locales, de mettre tout en œuvre afin de développer un réseau de télécommunication harmonieusement répartie sur l'ensemble du territoire français.

L'accès au Haut Débit devrait être dans les années à venir, l'un des principaux vecteurs du développement des modes d'utilisation d'Internet.

L'importance de l'utilisation du Haut Débit pour Internet est bien celui qu'on lui prête puisqu'il modifie trois paramètres essentiels : l'accès au réseau, le débit et le coût :

- L'accès au réseau parce que l'utilisateur passe d'un système où il « doit se connecter » à un nouveau système ouvert pour lequel cette opération devient implicite,
- Le débit parce qu'il est multiplié au minimum par dix (de 512 KiloOctets par seconde minimum, jusqu'à 20 MégaOctets par seconde en 2005). Ces hauts débits autorisent une interactivité à une cadence naturelle.
- Le coût dans la mesure où il s'agit d'une facturation forfaitaire et non plus à la durée. (Ce type de service existe déjà aux USA, à San Francisco depuis 10 ans).

Deux éléments s'opposent encore à une large diffusion du haut débit pour tous :

- Les infrastructures (fibres optiques, antennes Wifi), ne sont pas encore installées partout en France. Elles ont deux fonctions : elles assurent le transport des données au débit requis, et elles permettent de se rapprocher physiquement de l'utilisateur (soit par l'intermédiaire de sa ligne téléphonique, soit grâce à une antenne relais de la troisième génération de mobiles).
- Les coûts de l'abonnement qui sont encore élevés, et induisent un accès au haut débit réservé aux catégories sociales les plus aisées.

Au niveau politique, le Comité Interministériel pour l'Aménagement et le Développement du Territoire (le CIADT) du 9 juillet 2001 avait exprimé la volonté du gouvernement en place à l'époque de fixer pour objectif l'accès pour tous aux réseaux Internet haut débit (débit équivalent à celui offert par l'ADSL ou le câble) d'ici 2005, cela dans le cadre du Programme d'Action Gouvernemental pour la Société de l'Information (le PAGSI).

Le gouvernement a apporté son aide financière aux projets territoriaux par l'intermédiaire de la Caisse des Dépôts et Consignations (1,5 milliard sur fond propres, et une enveloppe de 10 milliards de francs d'aides au financement de la mise en place du haut débit). Le Réseau de Transport d'Electricité (le RTE) constitue un élément important de ce dispositif puisqu'il a permis le développement de nouvelles infrastructures à des coûts plus faibles.

Ainsi, depuis la fin de l'année 2004, 89 % du territoire français a accès à l'internet haut débit, soit 20 % de plus en un an¹¹⁰.

Depuis dix ans, des collectivités territoriales se sont elles-mêmes lancées dans des projets tendant à améliorer la desserte au réseau Internet haut débit de leur territoire. Mais de tels projets sont coûteux. Le simple raccordement de tous les cantons d'un département par de nouvelles infrastructures peut ainsi être estimé en moyenne à deux cent cinquante millions de francs.

En terme d'aménagement du territoire, les objectifs à atteindre peuvent être formulés comme suit :

- Assurer une desserte en infrastructures Haut Débit sur l'ensemble du territoire français : en milieu urbain, suburbain et rural ;
- Garantir que des services de télécommunication par Internet soient disponibles sur les infrastructures ainsi déployées ;
- Assurer une pérennité des offres d'accès Haut Débit à des coûts attractifs pour les professionnels et les particuliers.

¹¹⁰ Sources : Association « 60 Millions de consommateurs », 2005.

Le raccordement des cantons représente un investissement de quarante milliards de francs. Si on y ajoute le raccordement des 36 000 communes françaises, c'est un investissement de l'ordre de 150 milliards de francs, qui sont nécessaires.

Ce coût peut être diminué par le raccordement des communes enclavées en utilisant des infrastructures du type liaisons radioélectriques (Internet sans fil).

Au début du XXI^{ème} siècle, l'Etat français se trouve face à quatre éléments essentiels à prendre en compte en terme d'aménagement du territoire :

- Le territoire français doit être aménagé jusqu'aux communes les plus reculées avec de nouvelles infrastructures de télécommunication ;
- France Télécom doit continuer à moderniser son réseau mais ne peut supporter seul le financement du raccordement haut débit de tous les foyers et entreprises sur l'ensemble du territoire ;
- Les collectivités territoriales françaises ont la volonté d'investir dans ce domaine ;
- L'investissement dans les équipements actifs (services de télécommunication par Internet, raccordement au réseau Internet) est réservé aux seuls opérateurs de télécommunication.

S'agissant de l'essor du haut débit sur l'ensemble du territoire, le changement de législation intervenu en juin 2001 a permis de reconnaître le rôle primordial « d'aménageur numérique » des collectivités locales.

La mobilisation des élus français pour ce nouvel enjeu de société, que Lionel Jospin compara, lors du CIADT de Limoges (09 juillet 2001), au raccordement au chemin de fer ou à l'électricité à la fin du XIX^{ème} siècle, est récente. La prise de conscience de l'importance des télécommunications haut débit s'est faite lors de l'achèvement des contrats de plan Etat-région au printemps 2001 et la réalisation des schémas sectoriels des services de l'information et de la communication.

Plusieurs rapports, en particulier celui du Conseil Economique et Social (juin 2001) et celui du groupe de travail des communes rurales de l'Observatoire des Télécommunications dans la Ville (juillet 2001) ont exprimé cette demande forte des élus.

On observe ainsi en France depuis 4 ans (juin 2001) une mobilisation nationale importante en faveur du déploiement du réseau haut débit sur l'ensemble du territoire, alors que se profile déjà la perspective technologique du « Très Haut Débit » (plusieurs dizaines de mégabits).

Plusieurs conditions doivent pouvoir être réunies pour franchir cette nouvelle étape :

- Une accélération significative de l'ouverture à la concurrence du marché des télécommunications ;
- L'incitation à l'utilisation du haut débit, voire du très haut débit, pour des catégories d'acteurs sur lesquels la puissance publique exerce son autorité : bâtiments publics, établissements d'enseignement supérieurs, établissement de recherche, organismes de gestion des logements sociaux, etc.
- La mise en place d'un cadre de coopération national plus formalisé entre l'Etat, les collectivités locales et l'Autorité de Régulation des Télécommunications (l'ART), afin d'accompagner un chantier qui concerne les dix prochaines années. La Délégation à l'Aménagement du Territoire et à l'Action Régionale (la DATAR) pourrait ainsi voir son rôle complété. Ce rôle avait déjà sensiblement évolué avec l'élaboration des schémas sectoriels de l'information et de la communication et la mise en place d'un réseau national de chargés de missions pour les Technologies de l'Information et de la Communication placés auprès de chaque préfet de région (décision du CISI datant de

juillet 2000). En allant plus loin, c'est à une « DATAR numérique » que l'on peut songer, chargée en particulier de suivre le déploiement à l'échelle nationale des infrastructures à haut débit sur le territoire, les schémas de développement des NTIC planifiées par les différentes collectivités locales, l'évolution du marché et des nouvelles technologies conjointement avec l'Autorité de Régulation des Télécommunications, et d'orienter les choix des élus par des aides ciblées destinées à favoriser la mise en cohérence des projets d'infrastructures de télécommunication à divers niveaux de collectivités locales (de la Commune vers le District Urbain, puis vers le Département et la Région, etc.).

4 – Entreprise et activité professionnelle en réseau

En 2005 la grande majorité des salariés (75 %) travaille sur ordinateur ou participe à des processus de production informatisés. L'utilisation d'un ordinateur à des fins professionnelles a fortement progressé au cours des dix dernières années et concernait en 1999 la moitié des personnes qui travaillent contre moins d'un tiers en 1991. Près d'un tiers y passent plus de vingt heures par semaine (ce sont surtout des employés administratifs, des cadres et des ingénieurs).

Un des aspects positifs de l'introduction des NTIC dans la sphère du travail est que en contribuant à transformer l'emploi depuis les tâches répétitives, donc automatisables, vers des tâches faisant plus largement appel à l'intelligence, la technologie libère les salariés.

Un des aspects négatifs de cette utilisation croissante des NTIC est que la séparation entre vie professionnelle et vie personnelle est de plus en plus difficile à établir. Les salariés sont de plus en plus mobilisables en dehors de leur présence physique dans les locaux de l'entreprise.

La réorganisation des entreprises à l'heure actuelle, se traduit aussi par une individualisation croissante du travail, une moindre solidarité collective et le développement de formes « flexibles » de travail, souvent imposées par les entreprises.

Télétravail, travail nomade et à distance :

L'un des effets de l'introduction des NTIC dans le monde du travail est la possibilité de travailler à distance du lieu où est attendu le résultat du travail. Ce débat sur le développement du télétravail mêle espoirs (décongestion des villes, accroissement de l'efficacité des organisations en raison de la baisse des dépenses immobilières et de gains de productivité, amélioration du bien-être des salariés...) et craintes¹¹¹ (retour du travail à domicile, effacement de la frontière entre vie professionnelle et vie privée...).

En 1999, il y avait 6 millions de télétravailleurs permanents en Europe, contre 16 millions aux USA¹¹². En Europe, en 1999, la situation est très différente selon les pays. La Finlande, la Suède et les Pays-Bas connaissent un taux de 11 % de télétravailleurs. La Grande-Bretagne et l'Allemagne sont dans une position intermédiaire avec 4 % de télétravailleurs. L'Italie, la France et l'Espagne ont des taux proches de 2%.

Jusqu'à aujourd'hui, l'outil informatique n'a pas induit, un fort développement du travail à domicile ou du télétravail, comme on avait pu l'annoncer il a quelques années. La plupart des salariés travaillant sur ordinateur ont un lieu de travail fixe qui n'est pas leur domicile. Contrairement à ce qu'on croit, les utilisateurs intensifs de l'ordinateur sont les plus sédentaires : plus de 80% de ceux qui consacrent plus de vingt heures par semaine au travail

¹¹¹ Selon l'ECATT (*Electronic Commerce and Telework Trends*, un projet de la Communauté Européenne, 1999), deux tiers de la population pourrait télétravailler un jour par semaine au moins.

¹¹² Selon l'Observatoire des Stratégies Industrielles, 1999, près de la moitié du temps travaillé chaque année pourrait être effectué à distance.

sur un écran travaillent presque toujours sur le même lieu. Les autres actifs, ceux qui partagent leurs temps de travail entre plusieurs lieux, ou travaillent à domicile, ou n'ont pas de lieu de travail déterminé, occupent pour la plupart des emplois faisant au contraire peu appel à l'ordinateur : artisans et commerçants, représentants, personnels de service, etc.

Il est certain, cependant, que l'ordinateur facilite la mobilité pour certains types d'emploi : cadres, professions du privé (ingénieurs, informaticiens, consultants, directeurs commerciaux, visiteurs médicaux), mais aussi commerçants et professions libérales (médecins, avocats).

Dans certains métiers, où le temps consacré à l'activité professionnelle et le temps consacré à la vie privée étaient déjà par nature peu dissociés, l'apparition de l'ordinateur accompagne naturellement le partage du travail entre lieu professionnel et domicile : c'est le cas pour les enseignants, les chercheurs, les artistes, les artisans et commerçants, les chefs d'entreprises.

Le débat sur l'ampleur du phénomène comme celui sur les prévisions est confus car sous l'appellation de télétravail sont rangés des phénomènes fort différents.

On peut ainsi distinguer trois phénomènes¹¹³ :

- « L'exercice au moyen des TIC d'un travail salarié à domicile ou dans un centre spécialisé (télécentre) distant du lieu de travail collectif antérieur. Ce phénomène fait aujourd'hui l'objet d'un certain nombre d'expérimentations, mais il reste marginal et limité à certaines professions ».
- « Inclusion dans le télétravail de l'ensemble des unités ou individus qui se servent des TIC pour se connecter à distance de localisations distinctes. C'est le cas des salariés nomades qui par métier ou fonction exercent leur travail à distance de leur établissement [Business Unit Manager et Directeurs encadrant plusieurs centres d'appels situés dans plusieurs régions voir plusieurs pays, comme c'est le plus en plus le cas (les grands groupes de services en télécommunications du type centres d'appels implantent leurs centres sur différentes zones géographiques d'un même pays, voir même dans d'autres pays¹¹⁴) ; un autre exemple intéressant est celui de France Télécom Branche Recherche & Développement, qui incite ses cadres dirigeants et ingénieurs à opter pour la mobilité et le télétravail dans leur activité quotidienne, notamment en leur fournissant les outils nécessaires (ordinateur portable équipé d'une connexion Internet sans fil, téléphone portable de troisième génération, etc.)]. Les TIC ne créent pas la mobilité, mais accroissent l'efficacité de cette mobilité et parfois changent même la nature du travail. C'est aussi le cas des travailleurs sédentaires qui coopèrent entre des localisations distantes ».
- « Encore plus extensive, la troisième catégorie de télétravail nous fait sortir du cadre du travail salarié si l'on y inclut les téléservices, c'est-à-dire le développement de prestations rendues à distance dans le cadre d'un rapport contractuel marchand. On doit à ce titre distinguer les téléservices du télétravail, sauf lorsque est en jeu la possibilité d'une transformation du travail à distance en téléservice. En effet, les TIC sont parfois utilisées comme moyen de conversion d'un salarié en travailleur indépendant : cette conversion pose des problèmes lorsqu'elle est ambiguë, c'est-à-dire lorsqu'une relation de subordination est maintenue de fait sous le relation marchande ».

Le télétravail présente de nombreux avantages pour notre société. Il contribue à la décongestion des villes et à la réduction de la consommation énergétique.

¹¹³ <http://www.telecommute.org/twa2000>

¹¹⁴ Sources : Dominique Turck, 2006, Président Directeur Général, Société MediaVoice, Centres d'appels téléphoniques, Groupe Oristano, Genève Paris.

Le télétravail présente également de nombreux attraits pour les salariés (autonomie, gestion des horaires), largement contrebalancés par l'intrusion de l'entreprise dans la sphère privée ou l'isolement. Comme pour le temps partiel, le travail nomade n'a pas le même sens selon qu'il est choisi ou subi.

Cybersurveillance, informatique et conditions de travail, Internet au bureau, travail nomade... Ces questions sont négociées au niveau de l'entreprise, mais il manque souvent un cadre général, un socle législatif qui pourrait être négocié au niveau national. Les confédérations syndicales intègrent de plus en plus cette dimension dans leur réflexion. Des principes nouveaux se cherchent, comme le droit à l'indisponibilité ou le droit à la déconnexion. Des adaptations du code du travail seront nécessaires.

En ce qui concerne la question du droit du travail dans la société de l'information, on peut se référer aux travaux de Jean-Emmanuel Ray¹¹⁵ : « Un droit du travail Obsolète ? On ne fait pas fonctionner une entreprise du tertiaire et surtout du quaternaire (recherche, télécommunications, SSII) sur le type d'organisation taylorien visant à discipliner les bras de dizaines de milliers d'exécutants. Les neurones ne se mobilisent pas sur la peur de sanctions ». Base ancestrale du calcul de la rémunération, la notion de « travail effectif, à l'exclusion de l'habillage et du casse-croûte » (second alinéa de l'article L.212-4 du Code du Travail) semble perdre tout sens. D'où la définition nettement plus élargie donnée par la loi Aubry I du 13 juin 1998 : « le temps à disposition de l'entreprise »... qui pose nombre de questions à l'époque des portables, de la multiplication des trajets et autres « obligations professionnelles ». Mais aussi la sortie des cadres dirigeants de la protection relative à la durée du travail par la loi Aubry II de fin 1999. Les modèles anciens craquent.

Pour certains, ces évolutions très médiatisées évoquent une mort annoncée : celle du droit du travail, créé pour protéger le travailleur subordonné. La chaîne céderait la place à la ruche : de multiples travailleurs indépendants du monde entier apportent via Internet leur savoir-faire à la micro entreprise (si possible de la Silicon Valley), mille fois plus réactive que le diplodocus d'hier dont on connaît le sort funeste. A charge pour eux d'assurer – outre leur protection sociale – la continuité de leur activité à travers une préoccupation permanente de maintenance professionnelle.

Si distance était synonyme d'indépendance, tel n'est plus toujours le cas aujourd'hui. Un téléphone portable peut être tout autant un instrument essentiel de liberté qu'une laisse électronique permettant une subordination renforcée à la fois dans le temps et dans l'espace.

¹¹⁵ Jean-Emmanuel Ray est Professeur (2005) de droit à l'Université de Paris I (Panthéon-Sorbonne) et à l'IEP de Paris.

5 – Conclusion du deuxième chapitre

Le Territoire Numérique et la Ville Numérique¹¹⁶ restent à bâtir. Elle n'est pas une alternative virtuelle¹¹⁷, en ligne, au monde réel, aux espaces géographiques.

La société numérique, en réseaux, ne s'attarde pas aux frontières, elle est mondiale.

Elle doit devenir un enjeu concret de débat public, sauf à devenir la projection aggravée des défauts et des inégalités du monde présent.

Sur la nécessité d'un tel projet, se retrouvent aussi bien ceux qui considèrent qu'Internet n'est au fond qu'une infrastructure de réseaux dont il faut orienter les effets, et ceux qui affirment qu'Internet transforme profondément notre société.

De même que les cyberoptimistes et les cyberréalistes, nous sommes d'accord sur l'idée qu'Internet n'est spontanément ni bon, ni mauvais.

Grille de lecture, prospectives des usages, cette contribution n'en appelle pas moins à une prise en compte de plus en plus fine de la réalité du terrain, de l'aménagement du territoire en milieu urbain et rural, dans tout processus de développement de « réseaux numériques », avec une prise en compte des besoins et désirs des usagers des lieux (salariés, population résidentielle, touristes, etc.).

¹¹⁶ Dans ce registre, voir l'intéressante analyse de la « Cité numérique » d'Amsterdam, expérience née en 1994, entre des réseaux culturels et citoyens et, à l'origine, le conseil municipal de la ville. Récit complet dans l'ouvrage de Manuel Castells, *La galaxie Internet*.

¹¹⁷ Confère le Forum des Droits dur l'Internet. <http://www.foruminternet.org>

Conclusion de la première partie

Dans cette première partie, nous avons analysé l'histoire du développement des moyens de télécommunications et de la construction des réseaux de télécommunications afin de comprendre pourquoi et comment se sont développés les télécommunications sur le territoire français. Nous avons ainsi pu observer que les réseaux de télécommunication qui structurent l'espace français se sont développés de manière différente selon les régions, selon les époques et selon les politiques locales (choix des lieux d'implantation, choix des technologies de télécommunications, etc.). Nous voulions également comprendre comment se sont mis en place les réseaux de téléphonie radiomobile, quel est le rôle joué par les opérateurs de télécommunications radiomobiles présents sur le marché français, quelles sont les technologies et les normes utilisées, et enfin quels rôles jouent les collectivités territoriales dans le choix des lieux d'implantation des antennes relais (toit des immeubles, pylônes, etc.).

L'essor du téléphone, de la radio, de la télévision puis de l'informatique a joué un rôle important dans l'évolution de notre société au cours du XX^{ème} siècle.

Les grands progrès technologiques de ces trente dernières années ont induit l'uniformisation du stockage de toute information selon le mode numérique et la convergence entre télécommunication et informatique, phénomène qui conduisit Simon Nora et Alain Minc dans un rapport de 1978 à inventer le terme de *télématique*.

Ainsi, la Société de l'Information est tout d'abord le résultat de l'informatisation de la société. Elle ne résulte donc pas simplement de l'irruption de l'internet. La Société de l'Information émerge véritablement depuis une trentaine d'années, du fait de la mutation des technologies vers le « tout numérique », et des économies développées vers une économie de services.

La Société de l'Information n'est pas née lors de la création du réseau Internet¹¹⁸. Si elle se résumait à une simple mutation technique, elle n'aurait qu'un intérêt limité. Or, il s'agit d'un phénomène bien plus vaste et complexe, à la fois technologique, économique et culturel, et qui n'est pas encore achevé.

La Société de l'Information entend décrire un modèle de société dans lequel l'information peut s'échanger de façon universelle et instantanée, sous une forme numérique unique, rendue possible grâce à l'invention de la numérisation de l'information, dont les industries et services dans le secteur de la Communication (informatique, audiovisuel, multimédia, et télécommunication) constituent le secteur clé et dans laquelle l'ensemble du processus d'innovation, de production et d'échange s'appuie de manière croissante sur l'informatique et les télécommunications. Quant aux réseaux de télécommunication, comme le dit Castells¹¹⁹, ils constituent « la nouvelle morphologie sociale ».

Pourquoi cet avant-propos prospectif ? Parce qu'il est important de prendre conscience que la société de l'information est bien une réalité désormais vécue au quotidien, et que les mutations qu'elle engendre n'ont pas encore produit tous leurs effets sur notre société. N'en sous-estimons donc ni l'ampleur, ni les impacts géographiques (aménagement de l'espace ; phénomènes se diffusant encore actuellement dans les espaces les plus reculés, comme par exemple le développement du réseau Internet ; la numérisation des informations de tout type).

La première partie comprend ainsi à une vaste introduction au sujet, un rappel utile au profane des progrès réalisés en matière de communication et de télécommunication, et une mise en perspective géographique des problématiques scientifiques qui seront abordées dans la suite du mémoire.

¹¹⁸ Pour de plus vastes explications sur ce sujet, se référer au Livre Blanc de Jacques Delors, publié en 1992.

¹¹⁹ Manuel Castells, 2002, *La galaxie Internet*, Editions Fayard

Deuxième Partie

Ingénierie des systèmes de télécommunications radioélectriques

Table des matières de la deuxième partie

1 – Introduction de la deuxième partie.....	147
2 - Les différentes technologies déployées.....	149
2.1 – Les principaux services radioélectriques	149
2.2 - Les besoins des concepteurs de systèmes de télécommunication.....	150
2.3 - Les différentes gammes de fréquence	151
3 – Le développement de modèles de propagation	152
3.1 - Pourquoi et comment faire de la modélisation de la propagation des ondes radioélectriques	152
3.2 - Le canal de propagation	154
3.3 - La nature des milieux géographiques concernés	154
3.4 - Les effets du terrain et du sursol sur la propagation radioélectrique	155
3.5 – Développement de modèle	155
3.5.1 - Les objets constitutifs d'un modèle.....	155
3.5.2 - Types de modélisation en téléphonie radiomobile	158
3.6 – La conception d'un modèle de propagation pour les systèmes de télécommunications radiomobiles du type GSM 900 MHz	159
3.6.1 - Présentation générale	159
3.6.1.1 - Notion de réseau cellulaire.....	159
3.6.1.2 – Le fonctionnement d'un réseau de téléphonie radiomobile	162
3.6.1.3 - Définition : qu'est-ce qu'un modèle de propagation.....	165
3.6.1.4 - Domaine d'application d'un modèle.....	166
3.6.1.5 - Les différents types de modèles	167
3.6.1.6 - Comment construire un modèle	171
3.6.2 - Données utilisées pour la modélisation	172
3.6.2.1 – Les différents mécanismes de propagation pris en compte	172
3.6.2.1.1 – Affaiblissement de propagation en espace libre :	175
3.6.2.1.2 – Affaiblissement de diffraction.....	176
3.6.2.1.3 – La réflexion des ondes radioélectriques.....	178
3.6.2.1.4 – La diffusion des ondes.....	181
3.6.2.2 – Description des données géographiques.....	184
3.6.2.2.1 – Les données maillées (raster, pixel).....	184
3.6.2.2.1.1 – Le Modèle Numérique de Terrain.....	184
3.6.2.2.1.2 – Le Clutter.....	186
3.6.2.2.1.3 – Le Modèle Numérique de Surface	187
3.6.2.2.2 – Les données vectorielles	189
3.6.2.3 – Obtention de données radioélectriques expérimentales.....	191
3.6.2.3.1 – Mesures de champ en extérieur.....	191
3.6.2.3.2 – Autres types de campagnes de mesures	194
3.6.3 - Les critères d'évaluation d'un modèle	195
4 – Les modèles utilisés en ingénierie des systèmes radiomobiles	196
4.1 - Introduction.....	196
4.2 – Les modèles pour les grandes cellules	196
4.2.1 – Modèles macro cellulaires ruraux et suburbains.....	197
4.2.2 – Le Modèle macro cellulaire montagneux	199
4.3 - Les modèles pour les petites cellules.....	202
4.3.1 – Le modèle COST-CNET	202
4.3.2 – Le modèle de LEE.....	204
4.4 – Les modèles micro cellulaires.....	205
4.4.1 – Introduction	205
4.4.2 – Le modèle micro cellulaire - CNET	206
4.4.2.1 – Calcul de l'affaiblissement dans le plan horizontal : le graphe des rues	206
4.4.2.2 – Calcul de l'affaiblissement dans le plan vertical : la coupe de profil du sol et du sursol.....	209
4.4.2.2.1 – Calcul en visibilité (LOS)	209
4.4.2.2.2 – Calcul en non visibilité (NLOS)	209
4.5 – Les modèles urbains à lancer de rayons.....	211
4.5.1 – Introduction : modélisation par la technique du lancer de rayons.....	211
4.5.2 – Le modèle RAYON-CNET	211
4.5.2.1 - Algorithme de calcul du lancer de rayon dans le plan horizontal.....	213
4.5.2.2 - Algorithme de calcul du lancer de rayon dans le plan vertical.....	213
4.6 – Les modèles à Tracé de Rayons.....	215
4.7 – Modélisation pour la réception à l'intérieur des bâtiments	216
4.7.1 – Les modèles de pénétration	216

4.7.2 – Les modèles de propagation pour l'intérieur des bâtiments.....	221
4.7.2.1 – Modèle de propagation pour l'intérieur des bâtiments en distance E-R	222
4.7.2.2 – Modèle pour l'intérieur des bâtiments de type « Motley-Keenan »	223
4.7.2.3 – Modèle à tracé de rayons pour l'intérieur des bâtiments	224
4.8 - Les modèles géométriques	226
4.9 – Une évolution des modèles de propagation : les modèles à base de réseaux de neurones	228
5 - Conclusion de la deuxième partie	230

1 – Introduction de la deuxième partie

L'objectif de la deuxième partie est d'étudier l'ingénierie des systèmes de télécommunications radiomobiles utilisées actuellement dans la téléphonie radiomobile GSM.

Dans le premier chapitre nous présentons les différentes technologies de télécommunications utilisées en ingénierie des systèmes radiomobiles.

Dans le deuxième chapitre nous étudierons la mise au point des modèles de propagation des ondes radioélectriques. Le deuxième chapitre présente les différentes technologies, les différents types de modélisation et les outils informatiques utilisés par les ingénieurs des télécommunications pour le dimensionnement et la mise en place des réseaux cellulaires de téléphonie mobile.

Enfin, dans le troisième chapitre, nous étudierons les différents types de modèles de propagation d'ondes radio.

Cette partie sera donc consacrée intégralement à l'étude de l'ingénierie des systèmes de télécommunication radiomobiles : étude des outils de visualisation des données radio et des données géographiques, les différentes bases de données géographiques utilisées, et surtout, les différents modèles de propagation des ondes radioélectriques existant. Ceci va nous permettre de mettre en évidence les points où nous pouvons apporter des améliorations en tant que géographe, afin d'optimiser la modélisation radioélectrique : par une meilleure prise en compte de l'Information Spatiale dans la modélisation radio, par l'utilisation de nouvelles données géographiques (indicateurs morphologiques, surfaces de visibilité, etc.) en entrée des modèles de propagation, par une évaluation de la qualité des données géographiques (précision, sémantique, mise à jour, coût, échelle, etc.).

2 - Les différentes technologies déployées

Les technologies de communications radioélectriques utilisées dans les télécommunications radiomobiles se différencient par le type d'ondes radioélectriques utilisées ainsi que par le mode de diffusion des ondes mis œuvre. Nous allons faire un bref inventaire de ces différentes techniques de diffusion des ondes radio.

2.1 – Les principaux services radioélectriques

Les services de télécommunications radioélectriques peuvent être classifiés en 6 grands domaines selon le type de technologies de télécommunication radio employées et selon les caractéristiques du récepteur [type de récepteur (parabole, antenne relais, antenne de téléphone portable, etc.), et selon que le récepteur soit fixe ou mobile)].

Le tableau ci-dessous présente les principales catégories de services radioélectriques qui, notons le, n'obéissent pas à un critère unique de classification. Ainsi les services de collectes de données peuvent aussi être classés dans les services mobiles terrestres, par exemple pour les téléphones mobiles de troisième génération qui intègrent dans leur fonctions la collecte de données (localisation du mobile) par l'intermédiaire du système GPS, et permettent ainsi de fournir des cartes d'itinéraires en temps réel sur le mobile (Figure 50).

Dans notre thèse, nous nous intéresserons aux services radiomobiles terrestres utilisés dans les réseaux de télécommunications mobiles de type GSM et UMTS.

Services terrestres fixes	Services de radiocommunication entre points fixes (téléphonie en ondes courtes, faisceaux hertziens, etc.)
Services fixes par satellite	Services de radiocommunication entre points fixes utilisant une ou plusieurs liaisons par satellite
Services radiomobiles terrestres	Services entre deux points dont l'un au moins se déplace pendant la communication (le mobile peut être terrestre, en zone urbaine ou rurale, aéronautique ou maritime)
Services de radiodiffusion	Services de radiocommunication caractérisés par le fait que les points de réception forment un public réparti sur un vaste territoire (ex : télévision hertzienne, télévision directe par satellite, radiodiffusion sonore)
Services de radiorepérage	Services ayant pour but de repérer et/ou localiser un objet à la surface de la terre (repérage de skieurs enfouis sous une avalanche, les concurrents d'une course, une flotte de véhicules d'urgence)
Services de collecte de données	Services destinés à collecter des données recueillies en des points fixes ou mobiles (pour la navigation maritime : le système ARGOS ; pour les géomètres : le théodolite couplé à un GPS et à un Système d'Information Géographique)

Sources : C.Turck, 2005, d'après J. Lavergnat, 1997.

Figure 49 : Inventaire des principaux types de services radioélectriques

**Orange
SPV C500
avec Kit GPS**

Un mobile qui choisit à tout moment le meilleur trajet

■ Vous l'aimerez pour :

- Sa compacité
- Son environnement Windows Mobile 2003
- Son design
- Sa compatibilité **navigation GPS**

■ Caractéristiques :

- Autonomie : 5h en communication et 230h en veille
- Bluetooth
- Modem intégré
- Appareil photo et lecteur vidéo intégrés
- Ecran 65 536 couleurs
- Fonction e-mail



The image shows a black mobile phone, the Orange SPV C500, with a screen displaying a weather application. The screen shows a blue sky with white clouds, the text 'Orange SPV C500', and the date '24.06.2003'. Below the screen are several buttons, including a home button, a back button, and a numeric keypad. The phone is shown from a front-facing perspective.

Sources : Orange France, 2005, publicité pour les portables 3G diffusée sur le Web.

Figure 50 : Exemple de téléphone portable de troisième génération (3G) utilisant la norme UMTS, et intégrant des services de navigation par GPS

2.2 - Les besoins des concepteurs de systèmes de télécommunication

Un concepteur de système de télécommunication, lorsqu'il envisage d'installer un nouveau réseau, se pose un certain nombre de questions concernant la propagation des ondes radioélectriques sur la zone géographique à couvrir. On peut décomposer la démarche des concepteurs de systèmes de la façon suivante :

- Quelle est la nature du service de télécommunication envisagé ?

- Quelle est la nature des messages à transmettre ?

Cette question est en réalité complexe, puisqu'elle vise à connaître aussi bien le type de message (son, données, images fixes ou animées) que la quantité d'information à transmettre (par exemple 5 Mbit.s^{-1} ou 500 Mbits.s^{-1}).

- Quelle est la répartition spatiale des points d'émission et de réception ?

Par répartition, il faut entendre à la fois les distances entre les émetteurs et les récepteurs potentiels ainsi que leurs localisations géographiques. Cette question est décisive pour le choix de la gamme de fréquences à utiliser.

- Quels sont les effets de propagation d'ondes radio auxquelles on peut s'attendre ?

Les techniciens et ingénieurs spécialistes de la propagation devront pouvoir dresser une liste qualitative des effets de propagation auxquels le futur système de télécommunication sera soumis (variation des conditions ionosphériques, prise en compte des trajets multiples, etc.) et permettre ainsi aux concepteurs du système de télécommunication une première estimation des points techniques qui devront s'adapter aux variations spatiales et temporelles de la propagation des ondes.

2.3 - Les différentes gammes de fréquence

La classification des ondes électromagnétiques utilise comme critère la longueur d'onde dans le vide (Figure 50).

Aux fréquences inférieures à 30 MHz, la propagation est influencée fortement par la conductivité du sol, qui dépend du type d'occupation du sol (culture d'hivers, pâturage herbacé, bois, lacs, bâti dense, zone industrielle, etc.) et de la saison (hivers, printemps, été, automne), ainsi que par les caractéristiques de l'ionosphère qui est la partie ionisée de l'atmosphère terrestre (comprise entre 50 et 1000 km d'altitude). Lorsqu'on utilise des fréquences plus élevées, l'importance de l'ionosphère diminue. La partie basse de l'atmosphère, appelée troposphère, joue quand à elle un rôle très important pour les fréquences supérieures à 300 MHz.

Au-delà de 6 GHz, les phénomènes météorologiques comme la pluie ou la neige deviennent prépondérants.

Fréquences	Longueurs d'ondes	Abréviation
$3 \text{ kHz} < f < 30 \text{ kHz}$	myriamétriques	VLF (very low frequency)
$30 \text{ kHz} < f < 300 \text{ kHz}$	kilométriques	LF (low frequency)
$300 \text{ kHz} < f < 3 \text{ MHz}$	hectométriques	MF (medium frequency)
$3 \text{ MHz} < f < 30 \text{ MHz}$	décamétriques	HF (high frequency)
$30 \text{ MHz} < f < 300 \text{ MHz}$	métriques	VHF (very high frequency)
$300 \text{ MHz} < f < 3 \text{ GHz}$	décimétriques	UHF (ultra high frequency)
$3 \text{ GHz} < f < 30 \text{ GHz}$	centimétriques	SHF (super high frequency)
$30 \text{ GHz} < f < 300 \text{ GHz}$	millimétriques	EHF (extremely high frequency)

Sources : C.Turck, FTR&D, 2002.

Figure 51 : Classification des fréquences par longueur d'ondes

Les ondes radio Ultra Hautes Fréquences (UHF) sont utilisées dans les systèmes de télécommunications radiomobiles du type GSM. Elles ont des fréquences comprises entre 300 MHz et 3 GHz.

Dans notre travail nous nous sommes intéressés aux systèmes de communication radiomobiles du type GSM¹²⁰ fonctionnant avec des ondes UHF à une fréquence de 900 MHz.

La longueur d'onde pour les ondes UHF est de l'ordre du décimètre. Pour les systèmes GSM la longueur d'onde est de 30 centimètres. Donc tout objet ayant une taille supérieure à 30 centimètres (bâti, tronc d'arbre, etc.) aura un impact important (affaiblissement du signal, obstacle) sur la propagation du signal radio.

¹²⁰ GSM : abréviation du terme *Global System for Mobile communications*, qui correspond à la norme de téléphonie radiomobile de deuxième génération (2G) utilisée majoritairement en Europe. Les fréquences porteuses des réseaux radiomobiles GSM utilisées en France correspondent au 900 Mhz pour les réseaux Orange et SFR et au 1800 Mhz pour le réseau Bouygues Télécom.

Pour avoir une définition plus complète du terme GSM : se référer au Lexique.

3 – Le développement de modèles de propagation

3.1 - Pourquoi et comment faire de la modélisation de la propagation des ondes radioélectriques

L'étude de la propagation des ondes radioélectriques appartient au domaine de la physique qui étudie l'électromagnétisme : en effet, les ondes radioélectriques sont de nature électromagnétique, c'est-à-dire qu'elles se composent d'un champ électrique E et d'un champ magnétique H .

Les paramètres permettant de caractériser la propagation des ondes électromagnétiques sont le champ électrique, E , le champ magnétique, H , l'induction électrique, D et l'induction magnétique B . Seuls les vecteurs E et B produisent des actions par lesquelles il est possible de mesurer le champ électromagnétique.

Lorsqu'il existe dans l'espace des particules chargées en mouvement (caractérisées par leur densité volumique ρ), ce déplacement de charges crée un courant de densité j .

Les cinq paramètres (E , B , D , H et j) définissant l'état électromagnétique d'un milieu sont reliés entre eux par les équations de MAXWELL :

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (1) \quad \text{Equation de Maxwell-Gauss}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (2) \quad \text{Equation de conservation du flux de } \vec{B}$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3) \quad \text{Equation de Maxwell-Faraday (phénomène d'induction)}$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4) \quad \text{Equation de Maxwell-Ampère}$$

Avec :

t : le temps

ρ : la densité volumique de charge d'une particule en mouvement

E : le champ électrique

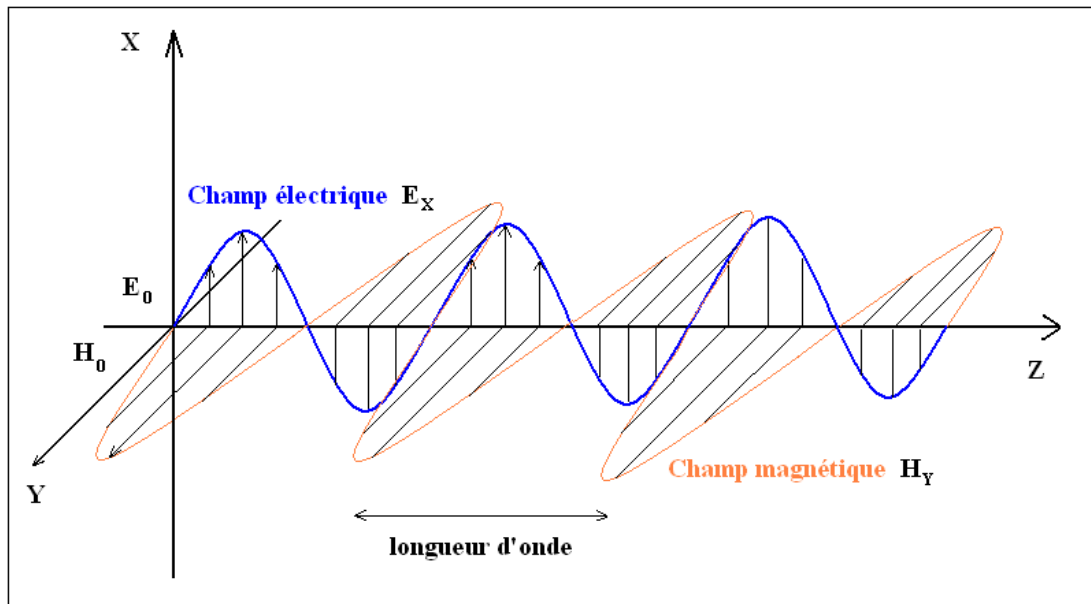
B : l'induction magnétique

D : l'induction électrique

H : le champ magnétique

j : la densité de courant

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ étant le courant de déplacement.



Sources : C.Turck, FTR&D, 2002.

Figure 52 : Représentation schématique en 3D de la propagation d'une onde électromagnétique

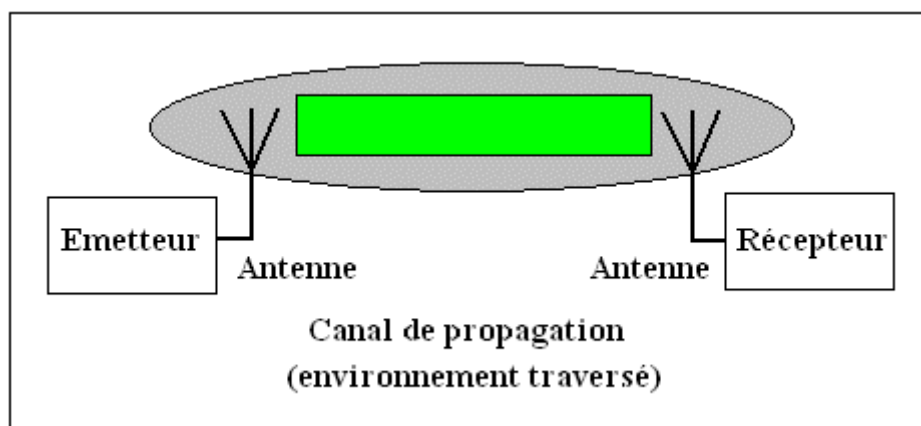
L'étude des ondes électromagnétiques se préoccupe du transport de l'énergie électromagnétique d'un point à l'autre d'un milieu matériel caractérisé par ses propriétés électriques.

Les usages pratiques des ondes électromagnétiques ont donné naissance à de nombreuses applications diverses et variées. Plus le temps passe, plus ces applications se diversifient et se raffinent : télécommunications mobiles, télélocalisation, télévision, radar, télédétection spatiale ...

Historiquement ce sont les améliorations des techniques de télécommunications radioélectriques qui ont fait évoluer la conception des modèles de propagation d'ondes radio. Au départ l'ambition était de pouvoir estimer le niveau d'énergie électromagnétique en tout point afin, soit de pouvoir dimensionner les systèmes de télécommunication [e. g. pouvoir déterminer le nombre d'antennes relais nécessaires dans une liaison point à point (Émetteur-récepteur), ou bien encore la puissance d'un émetteur radio], soit de déterminer leur couverture spatiale (e. g. la portée d'une antenne relais en milieu urbain dense). On a donc cru que l'on pouvait dissocier totalement les phénomènes de propagation de l'usage qui en était fait. Mais dès lors que les techniques de télécommunications se sont compliquées, notamment par les progrès en traitement du signal et l'introduction de la numérisation du signal, on s'est vite rendu compte que cette idée était fautive et qu'en réalité chaque application demandait une démarche particulière, et donc une modélisation spécifique pour chaque type d'application (e. g. liaisons terrestres fixes, liaisons fixes par satellite, liaisons radiomobiles).

3.2 - Le canal de propagation

Les systèmes radioélectriques peuvent schématiquement être décomposés en cinq parties (figure 53) : deux dispositifs électroniques constituant aux deux bouts de la liaison l'émetteur et le récepteur, le canal de propagation support de la transmission proprement dite et les deux antennes servant d'interfaces entre les deux dispositifs électroniques et l'environnement. Le canal de propagation peut ainsi être défini comme le milieu à travers lequel les ondes radioélectriques se propagent. Ce milieu peut correspondre à l'atmosphère terrestre, à l'ionosphère ; ou bien encore, pour les systèmes radiomobiles, à l'environnement géographique traversé (milieu rural, urbain, montagneux, etc.).



Sources : C.Turck, FTR&D, 2002.

Figure 53 : Schématisation d'une liaison radioélectrique

D'un point de vue technique, ce qui est important, c'est la possibilité pour le récepteur de recouvrer sans erreurs l'information (sons, images, etc.) que l'émetteur avait l'intention de lui transmettre. Deux phénomènes peuvent entraver le bon déroulement de cette transmission : d'une part le signal transmis subit des altérations au cours de sa propagation (affaiblissement, distorsions) et d'autre part viendront s'ajouter des perturbations électromagnétiques d'origine naturelle (e. g. bruits cosmiques) ou anthropique (e. g. bruits industriels ou urbains). Connaître le canal de propagation c'est donc être capable de déduire le signal reçu en fonction du signal émis.

3.3 - La nature des milieux géographiques concernés

La nature et le type de milieu géographique (naturel et anthropique) traversé par les ondes radio est l'élément primordial de toute étude de propagation.

Dans cette seconde partie du mémoire nous ne ferons qu'une brève présentation générale de ces milieux géographiques ; une analyse détaillée du milieu géographique sera effectuée dans la troisième partie du mémoire.

Dans le cas des systèmes de radiocommunications mobiles du type GSM 900 MHz seul le milieu géographique (relief et type de sursol) a un impact important sur la propagation des ondes radio. L'ionosphère, les conditions atmosphériques, le climat, etc., ont très peu d'impact sur la propagation du signal radio pour une fréquence de 900 MHz. Pourquoi ? Parce

que l'élément déterminant dans tout phénomène de propagation des ondes UHF¹²¹ est la taille des objets traversés par l'onde radio : pour les ondes UHF la longueur d'onde étant de 30 centimètres, tous les éléments de petite taille comme les gouttelettes de pluie, le brouillard, les polluants atmosphériques ou les feuilles des arbres, n'auront aucun impact sur la propagation du signal radio à 900 ou 1800 MHz. Par contre les objets de 30 centimètres et plus (mobilier urbain, bâti, troncs d'arbres, etc.) vont considérablement atténuer la propagation du signal jusqu'à l'affaiblir complètement.

3.4 - Les effets du terrain et du sursol sur la propagation radioélectrique

Aux fréquences supérieures à 30 MHz, c'est la configuration géométrique du sol (topographie, orographie, etc.) et /ou du sursol (bâtiments, mobilier urbain, routes, végétation, etc.) qui a la plus grande influence, quoique certains phénomènes comme les trajets multiples puissent être particulièrement sensibles à la réflectivité de certaines zones comme les lacs et les flancs de montagnes en milieu naturel, ainsi que les façades de bâtiments en milieu urbain.

La nature du sol (plaine, montagne, lac, bord de mer, etc.) et le type d'occupation du sol (boisé, cultures, bâti dense, construction industrielle, etc.) sont les éléments déterminants dans l'étude et la modélisation de la propagation des ondes radioélectriques, notamment pour les systèmes de téléphonie radiomobiles GSM 900-1800 MHz et UMTS¹²² 1900 MHz.

3.5 – Développement de modèle

Quel que soit le point de vue adopté, une étude scientifique dans ce domaine s'appuie sur une certaine modélisation de la réalité. Il nous a donc paru indispensable dans le paragraphe qui suit d'analyser les différentes manières de modéliser les phénomènes de propagation d'ondes radio afin de bien mesurer ce qu'on peut attendre de tel ou tel type de modèle, ou les différents éléments dont il est nécessaire d'améliorer la prise en compte.

3.5.1 - Les objets constitutifs d'un modèle

Avant d'aborder les buts et les méthodes de la modélisation, il est important d'examiner les divers éléments qui entrent dans la constitution d'un modèle.

- **Les paramètres et/ou variables d'état :**

Du point de vue de l'informatique, en algorithmique, il n'y a pas de différence significative entre paramètre et variable ; on peut dire qu'un paramètre est plus difficile à faire varier qu'une variable. En géographie par contre, les modèles en Analyse Spatiale font bien la différence entre les paramètres du modèle, qui permettent d'ajuster le modèle, et les variables (données géographiques et autres types de données) qui correspondent aux informations en entrée du modèle. Les variables existent donc par elles-mêmes, alors que les paramètres font partie intégrante du modèle et ne peuvent exister en dehors.

En revanche, il faut bien faire la différence entre variable exogène et variable endogène.

¹²¹ UHF : Ultra Hautes Fréquences, la fréquence de ces ondes est comprise entre 300 MHz et 3 GHz. Les ondes radio UHF utilisées dans les systèmes de télécommunications radiomobiles du type GSM ont des fréquences de 900 et 1800 MHz.

¹²² L'UMTS - Universal Mobile Telecommunication System - est une technologie de téléphonie mobile de 3ème génération qui offre une vitesse de transmission bien supérieure au réseau GSM /GPRS actuel. La fréquence des ondes radio utilisées dans les systèmes de télécommunications radiomobiles du type UMTS est de 1900 MHz.

- **Les variables exogènes :**

Ce sont les variables qui sont imposées de l'extérieur au système, et sur lesquelles l'expérimentateur peut agir. Par exemple dans un modèle de propagation la distance émetteur-récepteur, ou bien encore la fréquence d'émission, doivent être considérées comme exogènes. Ce sont généralement ces variables que l'on optimise dans la création et le dimensionnement d'un système de télécommunication.

- **Les variables endogènes :**

Ce sont les variables qui tirent leur valeur du système lui-même ; elles sont imposées par le milieu. En propagation du signal l'intensité de pluie, la hauteur des immeubles, la rugosité du sol ou la nature du couvert végétal en font partie.

Par ailleurs deux modèles d'un même système peuvent se distinguer par leurs variables respectives. Un cas particulier important est celui où l'on voit s'opérer ce qu'on peut appeler une réduction d'échelle. En propagation radio il est plus immédiat d'aborder les systèmes par leur aspect microscopique. Le passage à des grandeurs d'état macroscopique reste à faire dans la plupart des modèles de propagation d'ondes radio. L'étude de la mobilité des personnes est un exemple d'une réduction d'échelle efficace. On peut ainsi passer de l'échelle microscopique¹²³, correspondant à l'étude de la mobilité d'un individu, qui correspond alors à un « micro objet »¹²⁴ (par exemple le parcours d'un individu à pieds en ville¹²⁵), à l'échelle macroscopique, correspondant à l'étude de la mobilité d'une cohorte d'individus un espace plus vaste (un quartier, un tronçon de route, etc.).

Certaines variables ne sont pas ou difficilement quantifiables et ne représentent donc pas une grandeur physique observable. Les effets saisonniers, climatiques, la végétation sont rarement quantifiables en modélisation radio. Il n'empêche que leur prise en compte est souvent fondamentale pour la justesse du modèle ; on discrétise généralement ces grandeurs non mesurables en classes selon des règles statistiques.

Les variables d'entrée peuvent être déterministes ou aléatoires. Par exemple, la distance est déterministe alors que le taux d'ozone dans l'air est aléatoire.

- **Les variables de sortie :**

Ce sont bien entendu les grandeurs que l'on cherche à modéliser, les informations que l'on obtient en sortie du modèle.

On serait alors tenter de dire que puisque ce sont les performances du système de télécommunication radioélectrique qui nous intéressent, il suffirait de les prendre pour variables de sortie. Mais ce point de vue présente l'inconvénient majeur de réintroduire complètement les systèmes de transmission dans les études de propagation. La démarche la

¹²³ Pour approfondir les notions d'échelle en modélisation et d'emboîtement d'échelles, consulter l'ouvrage collectif publié sous la dir. de Lena Sanders, 2001, *Modèles en analyse spatiale*, Editions Hermes Science, Traité IGAT, Paris, 333 pages. Notamment les chapitres :

- *Echelles géographiques et méthodes statistiques multidimensionnelles*, Hélène Mathian et Marie Piron, pages 61 à 103.
- *Modèles spatiaux de microsimulation*, Einar Holm et Lena Sanders, pages 187 à 217.
- *D'images en modèles : applications et association de modèles*, Françoise Dureau et Christiane Weber, pages 253 à 282.

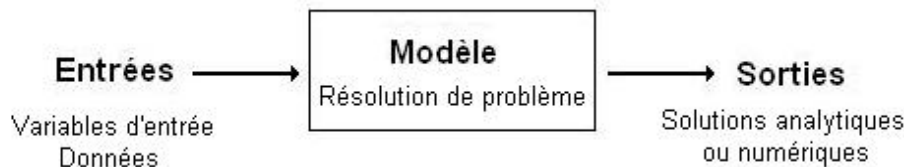
¹²⁴ In Einar Holm et Lena Sanders, 2001, *Modèles spatiaux de microsimulation*.

¹²⁵ Confère travaux de recherche de Christophe Enaux et Thierry Ramadier sur la mobilité des jeunes enfants en milieu urbain, Laboratoire Image et Ville, Strasbourg, 2004. Web : <http://imaville.u-strasbg.fr>

plus adaptée semble alors de passer par le problème intermédiaire suivant : quelles sont les caractéristiques du canal de propagation qui sont nécessaires à l'évaluation des performances de la liaison.

- **Les relations : Phase de résolution du problème scientifique**

Le modèle est achevé, le problème scientifique est résolu, lorsqu'on a réussi à déduire la solution analytique ou numérique au problème posé. Le modèle permet ainsi de déduire les variables de sortie recherchées à partir des variables d'entrée. Les différentes méthodes de résolution de problème mise en œuvre dans un modèle, peuvent être de nature très différentes : méthodes conceptuelles, mathématiques, empiriques, statistiques, informatiques, spatiales, etc. Au niveau des résultats obtenus, on trouve toutes les situations intermédiaires allant de simples solutions analytiques (par exemple l'affaiblissement en fonction de la distance Emetteur-Récepteur) jusqu'à des solutions numériques, qui peuvent parfois être complexes, comme par exemple dans le cas des algorithmes de calculs programmables (par exemple la méthode de l'équation parabolique pour calculer l'affaiblissement des ondes au voisinage du sol).



Sources : C.Turck, LIV, 2005.

Figure 54 : Les différentes phases de résolution d'un problème scientifique

3.5.2 - Types de modélisation en téléphonie radiomobile

Les ambitions qui président à la modélisation d'un phénomène de transmission du signal (radioélectrique, sonore, numérique, etc.) ou d'un système de télécommunication sont variées. La manière dont la réalité et l'environnement sont pris en compte est changeante selon le type de modèle.

En téléphonie radiomobile, on distingue trois grandes catégories de modèles, qui ne sont pas exclusives l'une de l'autre :

- **Les modèles descriptifs : visualiser, représenter et décrire**

Il s'agit de fournir des relations entre les variables caractéristiques d'un phénomène (propagation du signal, etc.) ou du système étudié (système de télécommunication, système spatial, etc.). Le but principal est alors de représenter et/ou de décrire ce que l'on observe.

De tels modèles sont *a priori* très satisfaisant pour les ingénieurs en télécommunication puisqu'ils prétendent décrire la réalité. Mais en réalité, ces modèles descriptifs présentent souvent l'inconvénient d'être établis à partir de bases de données trop restreintes, à partir de généralités (des éléments récurrents de la réalité, qui sont considérés comme des indices et des preuves scientifiques), ce qui rend leur validité relative.

Ceci nous ramène au problème de la conceptualisation du monde, et de la manière dont le chercheur va appréhender la réalité sur le terrain.

- **Les modèles explicatifs : expliquer et comprendre**

En ce qui concerne les modèles explicatifs, le but n'est plus exclusivement de traduire en équations ce qu'on peut observer mais de trouver les raisons qui peuvent expliquer les variations et/ou l'intensité du phénomène de propagation, le comportement du système de télécommunication. Ainsi, on recherche les causes et par l'utilisation d'outils théoriques on prétend rendre compte des observations. Le modèle explicatif trouve sa justification dans l'interprétation des résultats expérimentaux.

- **Les modèles prévisionnels : prévoir**

Dans les modèles prévisionnels, on se propose, à partir d'observations indépendantes de la grandeur que l'on étudie, de prévoir sa valeur. Un tel modèle ne peut être que causal, au sens où les variables de sortie ne dépendent que des variables d'entrée. Par contre, un tel modèle n'a pas d'ambition explicative.

Ce type de modèle est celui sur lequel l'ingénieur en télécommunications radiomobiles concentrera ses efforts, puisque c'est celui qui est le plus couramment employé par les concepteurs de systèmes de télécommunication.

3.6 – La conception d’un modèle de propagation pour les systèmes de télécommunications radiomobiles du type GSM 900 MHz

Afin d’offrir un service de téléphonie radiomobile de bonne qualité à leur abonnés, les opérateurs de téléphonie mobile effectuent des études techniques, pour optimiser le système (les relais de base, les antennes, etc.) et le réseau (la couverture du territoire, l’implantation des antennes sur le terrain). Pour ce faire, les opérateurs disposent de services techniques qui effectuent des mesures du signal radio sur le terrain et mettent au point les outils d’ingénierie informatique permettant de visualiser et de prévoir la couverture radioélectrique pour une zone géographique donnée. Pour cela ils utilisent et mettent au point des modèles de propagation des ondes radioélectriques utilisées par le réseau de télécommunication radiomobile, afin de les aider à améliorer la qualité (couverture, transmission) du réseau de télécommunication.

3.6.1 - Présentation générale

Les modèles de propagation sont utilisés lors de la conception d’une interface radio pour en optimiser les performances et également lors du déploiement des systèmes sur le terrain pour déterminer la couverture radioélectrique.

Les modèles seront implantés dans des outils d’ingénierie pour prédire différentes quantités utiles pour le déploiement de systèmes de télécommunication radio ainsi que pour l’étude de la couverture radio (choix des sites, allocation de fréquences, définition des puissances) et la définition des brouillages. Les modèles sont très dépendants des bases de données géographiques comportant des éléments relatifs à la topographie et aux types d’occupation du sol. Ceci est dû au fait que la manière dont les ondes radio UHF¹²⁶ vont se propager dans un espace donné est intimement liée aux obstacles (bâtiments, troncs d’arbres, flancs de montagnes, etc.) rencontrés le long du canal de propagation. De ce fait, la modélisation des objets géographiques est essentielle dans tout modèle de propagation des ondes UHF.

3.6.1.1 - Notion de réseau cellulaire

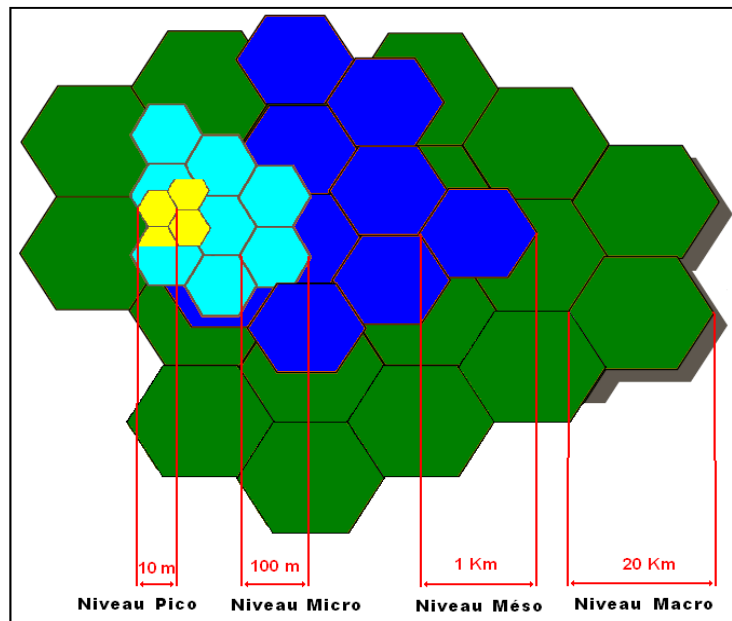
Devant l’augmentation sans cesse croissante du nombre d’abonnés au téléphone mobile, les opérateurs ont été amenés à densifier leur réseau de télécommunication : ils augmentent le nombre des stations relais et réduisent la taille des cellules composant le réseau. Une cellule c’est la zone géographique couverte par une station de base. On distingue quatre types de cellules selon la taille de la zone géographique couverte : Macro cellule, Petite ou Méso cellule, Micro cellule et Pico cellule.

Pour chaque type de cellule ont été développés plusieurs modèles de propagation d’ondes radio différents. Ainsi nous pouvons faire une première distinction des modèles de propagation selon la taille des cellules du réseau radiomobile.

Mais ce critère de différenciation selon la taille de la cellule ne suffit pas, il est nécessaire d’y adjoindre une typologie selon le type de milieu géographique. Ainsi, il existe des modèles spécifiques aux milieux montagneux, d’autres pour les zones rurales, d’autres encore pour les zones urbaines.

¹²⁶ UHF : ondes radioélectriques Ultra Haute Fréquence, correspondant à des fréquences comprises entre 300 MHz et 3 GHz.

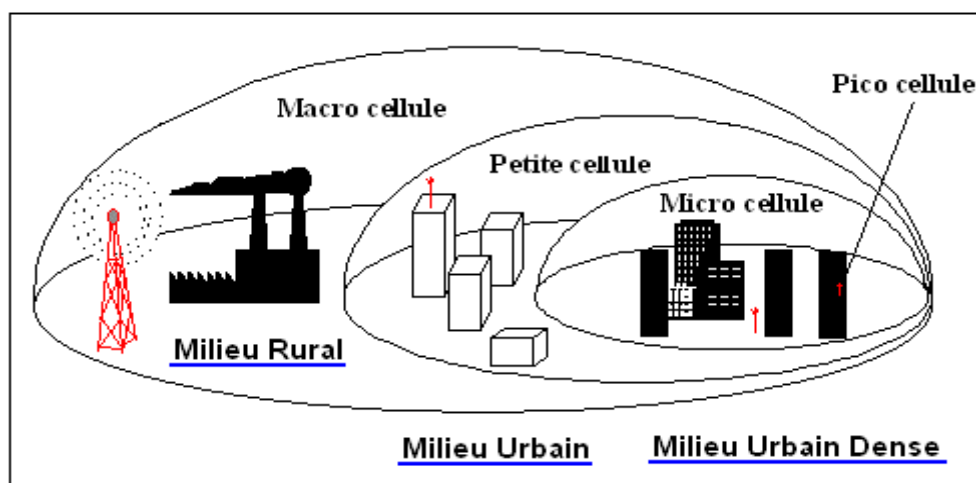
La cellule la plus grande est la macro cellule. Le milieu géographique environnant est le plus souvent rural ou montagneux, et l'antenne de la station de base est positionnée sur un point très élevé. La distance entre la station de base et le mobile peut être supérieure à une dizaine de kilomètres (figures 55 et 56).



Sources : C.Turck, Laboratoire Image et Ville, Strasbourg, 2004.

Figure 55 : Le Multi échelle : les cellules du réseau en nid d'abeille

Face à l'augmentation croissante du nombre d'abonnés au réseau radiomobile en milieu urbain, il a fallu diminuer la taille des cellules afin de réduire la distance de réutilisation des fréquences allouées. La plus courante des cellules implantées en ville est la petite cellule, qui a un rayon inférieur à quelques kilomètres. L'antenne de la station de base est dans ce cas située au-dessous du niveau des toits.



Sources : FTR&D, 2001.

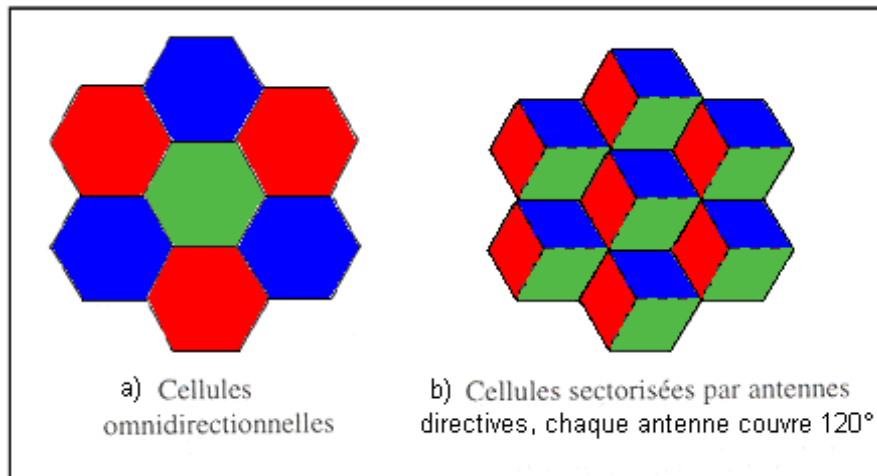
Figure 56 : Les différentes échelles du réseau radiomobile

En milieu urbain très dense, la petite cellule est remplacée par la microcellule, qui a un rayon de quelques centaines de mètres. Les antennes sont situées sous le niveau des toits, ce qui implique que la propagation des ondes est guidée par les rues.

Enfin, à l'intérieur des bâtiments, on utilise la pico cellule, de quelques dizaines de mètres de rayon. Elle correspond aux communications en indoor, c'est-à-dire à l'intérieur même des bâtiments (ou de tunnels, de stations de métro, etc.) dans lesquels sont placés les antennes des stations de base.

Les cellules forment un maillage régulier de l'espace ayant un motif en forme de nid d'abeille (figure 55). On utilise le plus souvent dans les études théoriques des cellules à peu près hexagonales qui donnent une bonne couverture spatiale. Dans la pratique, la forme exacte doit s'adapter à la réalité rencontrée sur le terrain, comme par exemple les effets du relief.

Les stations de base peuvent être situées au centre des cellules et utiliser des antennes omnidirectionnelles (figure 57 a). On peut également avoir recours à des stations de base communes à trois cellules (figure 57 b) placées aux sommets des hexagones du réseau, et disposant d'antennes directives ne couvrant qu'un secteur de 120 degrés pour chaque cellule. Cette stratégie permet de réduire les risques de brouillage entre cellules réutilisant les mêmes fréquences.



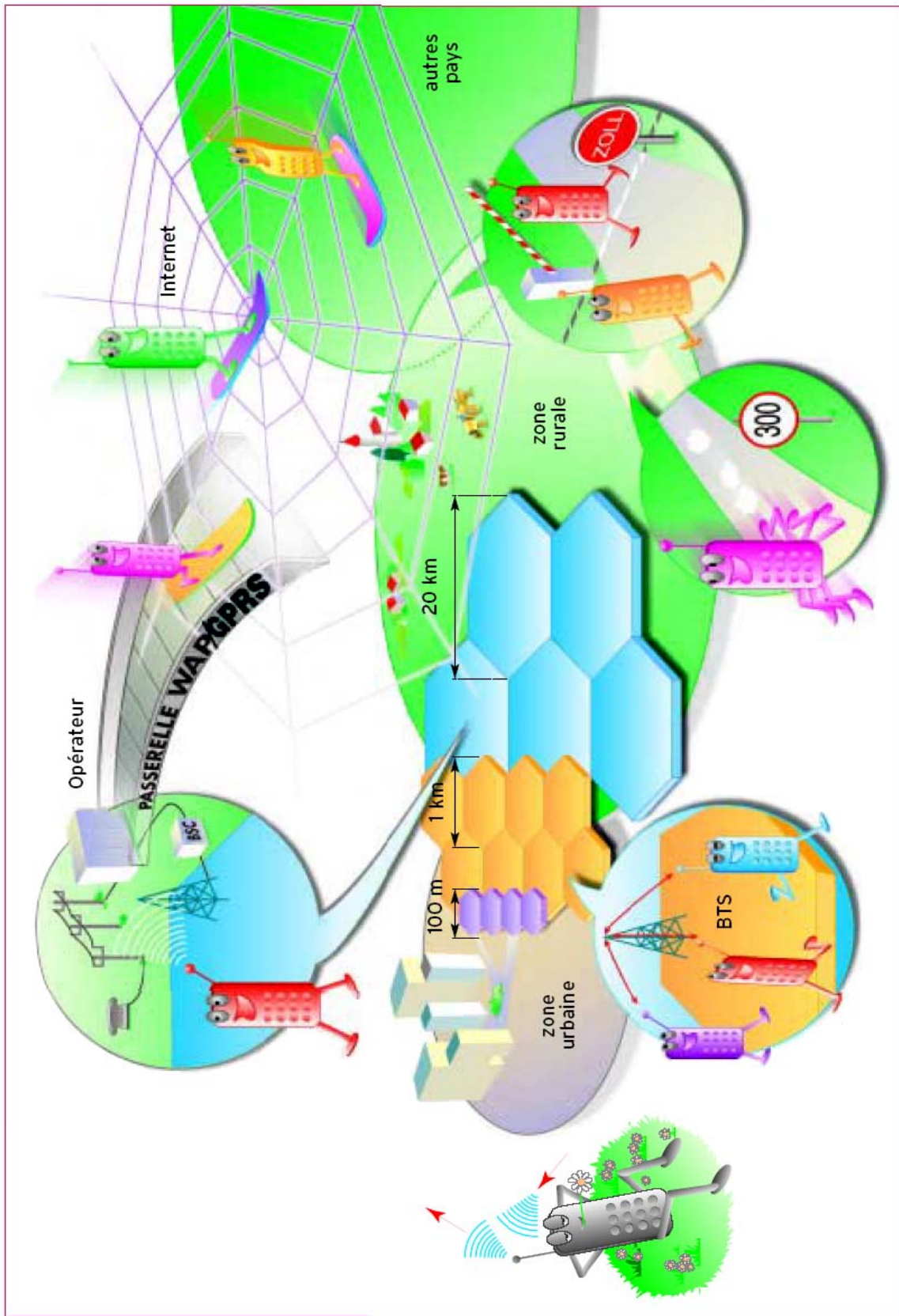
Sources : C.Turck, FTR&D, 2003.

Figure 57 : Exemple de réseaux cellulaires omnidirectionnel, et directionnel (zone de couverture de 120 degrés pour chaque antenne).

Lors du déploiement des systèmes radiomobiles, la partie la plus difficile est l'interface radio car elle n'est pas connue à l'avance et elle dépend de la situation que l'on rencontrera sur le terrain. La réception par un mobile du signal radioélectrique émis par une station de base est déterminée par le passage de ce signal dans le canal de propagation qui dépend de nombreux paramètres comme par exemple des obstacles le long de la liaison, des caractéristiques radio du système...

Pour cela, on a de plus en plus recours à la simulation grâce à de puissants logiciels d'ingénierie radio qui permettent d'effectuer un certain nombre de fonctions comme les calculs de couvertures, l'analyse des interférences, l'allocation des fréquences... Ces outils de simulation se basent sur un certain nombre de données comme les données géographiques numérisées mais aussi sur des algorithmes qui permettent de simuler la propagation des ondes radio dans les différentes configurations rencontrées sur le terrain. Ceci correspond aux modèles de propagation des ondes radioélectriques.

3.6.1.2 – Le fonctionnement d'un réseau de téléphonie radiomobile



Sources : Dossier technique « La téléphonie mobile », FNAC, France, 2003.

Figure 58 : Le fonctionnement d'un téléphone mobile

Un téléphone mobile est actif en permanence : même quand il est en veille, il émet régulièrement un signal pour indiquer sa position.

Pour permettre à tous les usagers de téléphonie radiomobile d'utiliser leur mobile en même temps, il est nécessaire de partager l'espace hertzien disponible. Pour ce faire, il est indispensable de morceler l'espace, de le diviser en unités géographiques fondamentales. Ces zones géographiques ont la forme de cellules hexagonales et constituent ainsi un réseau de cellules en nid d'abeille (figure 58).

Une cellule, c'est la zone géographique couverte par un relais, par une station de base¹²⁷.

Chaque relais est le support d'une ou de plusieurs antennes : soit une seule antenne omnidirectionnelle qui couvre 360 degrés, soit plusieurs antennes, par exemple 3 antennes directives couvrant chacune un secteur de 120 degrés (figure 59).

Les opérateurs implantent les antennes sur des points hauts (pylônes, montagnes, toits d'immeubles, etc.).

La station de base reçoit l'identification des portables en veille, pour les localiser, et assure la transmission des communications. Une cellule ne peut accueillir qu'un nombre limité d'utilisateurs. C'est pourquoi elles sont toutes petites en ville (quelques centaines de mètres), là où la densité de portables est importante et beaucoup plus étendues en pleine campagne (plusieurs dizaines de kilomètres). Lorsque l'on passe d'une cellule à l'autre, les informations de gestion des abonnés sont transmises d'une station de base à l'autre, afin que la communication ne soit pas coupée. Ce processus baptisé « *hand over* » fait appel à de puissantes ressources informatiques : cette tâche doit pouvoir être effectuée avec des mobiles se déplaçant jusqu'à 300 Km/h.

Il n'y a pas de coupure de communication aux passages de frontières du pays grâce au « *roaming* » (« itinérance » en français). Avec l'abonnement *ad hoc*, partout où l'on trouve des téléphones mobiles GSM, chaque usager est identifiable et se retrouve ainsi automatiquement identifié sur les cellules du réseau de télécommunication du pays voisin de la même façon que sur le territoire national.

Les relais sont reliés à des contrôleurs de station de base¹²⁸ (BSC), eux-mêmes connectés au réseau téléphonique public par l'intermédiaire des centres de commutation des mobiles, gérés par les opérateurs. Grâce au WAP¹²⁹ passerelle de conversion de langages, les mobiles peuvent accéder à Internet. Mais la vitesse de transmission du GSM est assez limitée. Le GPRS¹³⁰, qui correspond en fait à une amélioration du système GSM, permet un accès plus large et plus rapide à de nombreux services multimédias.

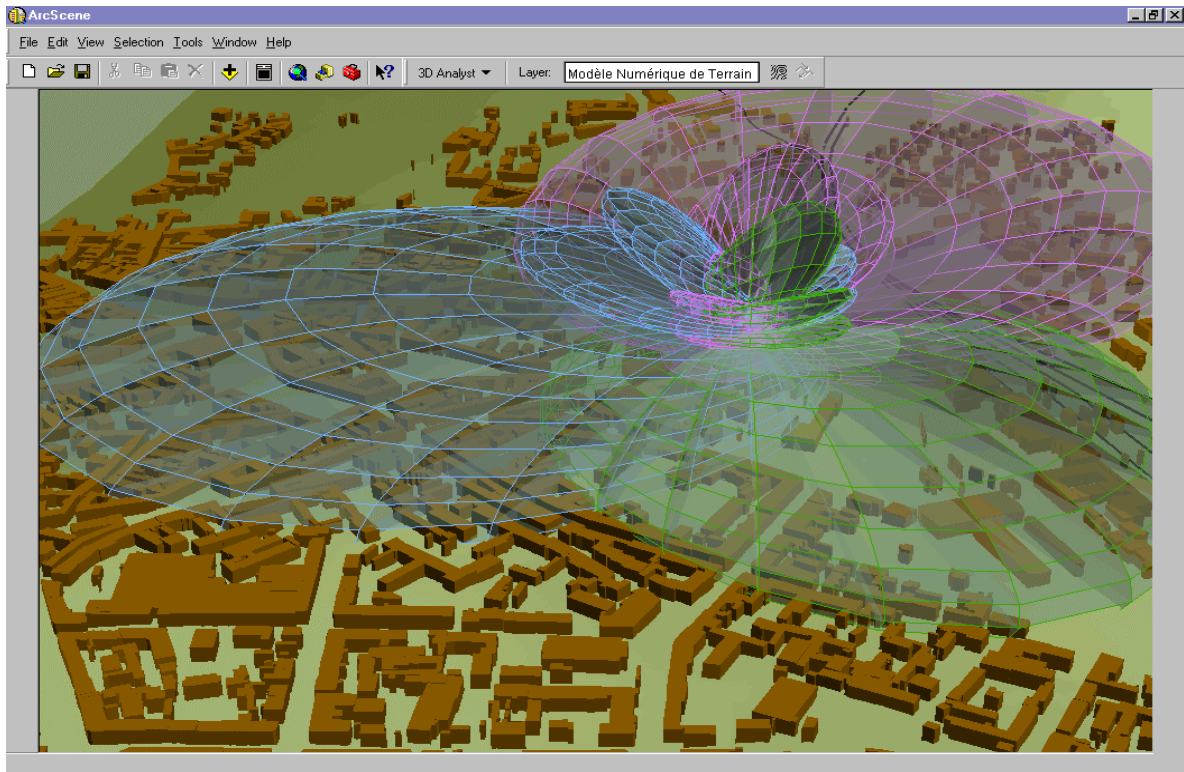
Les systèmes de communication de troisième génération, baptisés UMTS, sont beaucoup plus rapides et permettent une transmission optimale des données (son, images, Web, etc.)

¹²⁷ BTS : *Base Transceiver Station* en anglais ; une station d'émission-réception de base, aussi appelée un « relais », correspond à la station émettrice et réceptrice des ondes radioélectriques pour une cellule donnée du réseau de télécommunication radiomobile.

¹²⁸ BSC : le contrôleur de station de base, *Base Station Controller* en anglais.

¹²⁹ WAP : passerelle de conversion de langages, *Wireless Application Protocol* en anglais.

¹³⁰ GPRS : *General Packet Radio Service* en anglais. C'est un service de transmission des données sans fil basé sur la transmission par paquets. Par exemple l'envoi d'un email depuis le téléphone portable par le biais du système GPRS entraîne sa division en « paquets » d'informations. Chaque paquet s'achemine vers le lieu de destination du message en empruntant l'itinéraire le plus rapide, puis les paquets sont à nouveau assemblés pour reconstituer le message initial.



Sources : ESRI, Redland, USA, 2001.

Figure 59 : Visualisation en 3D, sous SIG (ArcView 8, module ArcScene), des diagrammes d'antenne pour 3 antennes directives implantées sur le même relais.

La figure 59 permet de visualiser en trois dimensions la manière dont les ondes radioélectriques se propagent dans l'espace urbain à partir d'une antenne relais. On distingue bien les différents lobes de rayonnement pour chacune des trois antennes, grâce à une modélisation graphique 3D du type « fil de fer ».

La zone géographique prise en compte pour ce calcul correspond à une zone urbaine dense. Les données géographiques utilisées correspondent à une extrusion¹³¹ du bâti en 3D au format vectoriel « shapefile¹³² » (comme pour la BD Topo de l'IGN).

Le logiciel utilisé pour mettre en œuvre le modèle de propagation d'ondes radioélectrique de Hata et les diagrammes d'antennes 3D (figure 59), est le Système d'Information Géographique ArcView, édité par la société ESRI.

¹³¹ Extrusion : transformation d'un objet géographique en deux dimensions (polygone correspondant au bâti dans notre cas) en un objet géographique à trois dimensions (un cube, un volume).

¹³² Fichier de forme : « shapefile » en anglais, est un format de données géographiques du type vectoriel utilisé sous ArcGIS. Trois types de formes vectorielles sont prises en charge dans ce format : les points, les lignes et les polygones.

3.6.1.3 - Définition : qu'est-ce qu'un modèle de propagation

Un modèle de propagation des ondes radio est un modèle mathématique, qui permet de simuler le canal de propagation entre un émetteur et un récepteur. Le modèle mathématique est ensuite mis en œuvre dans un algorithme, puis dans un programme informatique. Il permet de prédire le niveau moyen du signal radio que l'on reçoit en n'importe quel point à partir d'un certain nombre de paramètres (caractéristiques techniques, type d'environnement géographique traversé le long de la liaison...). Il modélise donc les variations dues aux obstacles rencontrés par les ondes le long du canal radiomobile (effet de masques) auxquelles il faudra rajouter ensuite un algorithme pour tenir compte des variations rapides (fading).

Le développement d'un modèle de propagation est stratégique pour un opérateur de télécommunications mobiles, puisqu'il est à la base de tous les calculs qui peuvent être fait par un logiciel d'ingénierie radio (niveau de champ radio reçu, affaiblissement du signal, calcul des interférences, analyse du hand-over...). Cet outil lui apporte une aide précieuse pour le dimensionnement correct du réseau (implantation des relais sur le terrain). Ceci permet à l'opérateur de télécommunication d'optimiser l'implantation de ses relais, ce qui induit un gain important en terme de coûts tout en ayant la meilleure couverture possible du territoire.

L'élaboration d'un modèle de propagation nécessite des études poussées pour obtenir un modèle optimal du point de vue des performances de prédiction (résultats radio calculés proches des mesures radio collectées sur le terrain), mais aussi qui réponde aux exigences d'exploitation quotidienne du réseau par l'opérateur comme par exemple le temps de calcul des couvertures de champs radio en temps réel.

Ainsi, de nouveaux modèles de propagation voient le jour, afin d'analyser plus finement les différents milieux géographiques et phénomènes physiques de propagation à prendre en compte, concevoir de nouveaux algorithmes de simulation après définition des nouveaux paramètres d'entrée, ainsi que de définir et réaliser des campagnes de mesures spécifiques pour l'optimisation et la validation du nouveau modèle.

3.6.1.4 - Domaine d'application d'un modèle

Il existe une multitude de modèles de propagation d'ondes radioélectriques, qui ont chacun leur domaine d'application bien défini. Chaque opérateur de téléphonie mobile (Orange, SFR, Bouygues, etc.), ainsi que les concepteurs de matériel de télécommunication (Alcatel, Sagem, Siemens, Nokia, etc.) développent chacun leurs propres modèles de propagation d'ondes radio pour qu'ils répondent au mieux à leurs exigences.

Il n'existe pas de modèle universel, par contre certains algorithmes présents dans la littérature sont considérés comme des références (Okumura-Hata¹³³, Walfisch-Ikegami...) qui sont ensuite adaptés par chacun d'après ses propres études.

De plus, l'utilisation d'un modèle doit se faire en respectant son domaine d'application qui dépend essentiellement de deux facteurs :

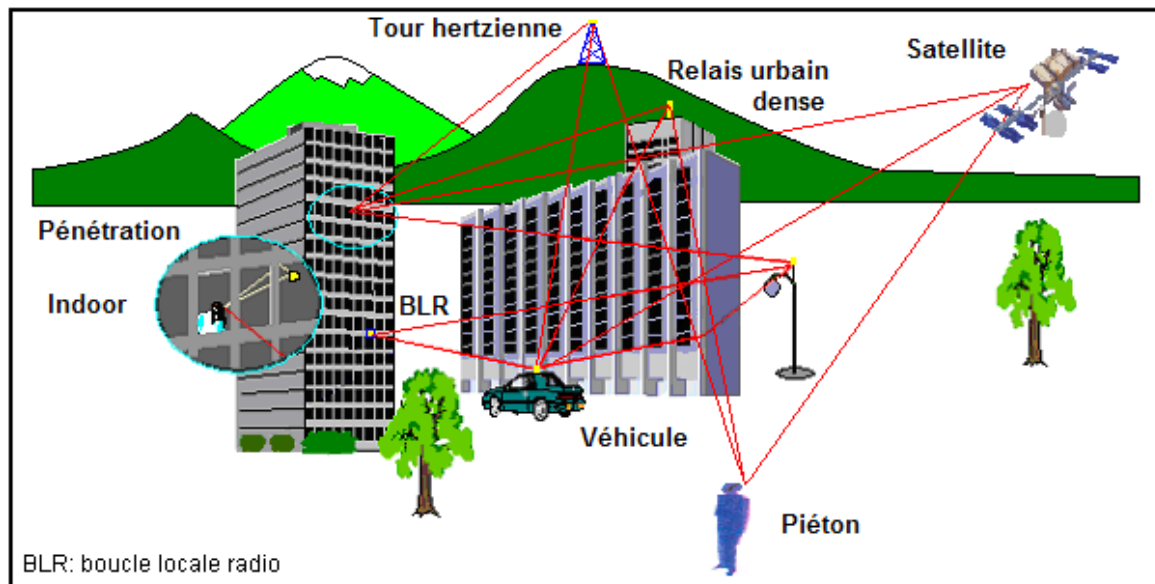
- Le type de système de télécommunication radioélectrique considéré : celui-ci fixe directement un certain nombre de paramètres radio qui sont pris en compte dans le modèle comme par exemple la fréquence, la dimension des cellules (qui fixe la distance maximale d'utilisation), la hauteur et le type d'antennes...
- L'environnement : le type de milieu géographique traversé le long de la liaison influe sur la propagation du signal de façon différente et on doit donc avoir des modèles capables de simuler chaque cas :
 - Premier cas : Les modèles pour l'extérieur avec des phénomènes très différents suivant le milieu de propagation (urbain, suburbain, rural, maritime, montagneux...) nécessitent des développements de modèles pour chaque cas.
 - Deuxième cas : Les modèles de pénétration pour l'utilisation des portables à l'intérieur des bâtiments à partir d'émetteurs situés à l'extérieur.
 - Troisième cas : Les modèles *Indoor*¹³⁴ pour la couverture intérieure à partir d'émetteurs situés à l'intérieur même des bâtiments.
 - Quatrième cas : Les modèles pour le canal Terre-satellite.

¹³³ HATA M., 1980.

¹³⁴ *Indoor* : mot anglais qui signifie « à l'intérieur » et qui désigne un milieu de propagation situé à l'intérieur de bâtiments ou d'espaces confinés comme par exemple les couloirs du métro.

On voit donc que pour un même système de télécommunication radiomobile, il faut plusieurs types de modèles pour calculer les couvertures dans les différents environnements rencontrés (rural, urbain dense, indoor, etc.) puisque les phénomènes de propagation à prendre en compte ne sont pas les mêmes selon le milieu géographique traversé.

La figure 60 illustre les différents types de milieux géographiques traversés par les ondes radio ainsi que les différentes technologies de télécommunications mise en œuvre (satellite, antenne relais, tour hertzienne, etc.).



Sources : FTR&D, 2003.

Figure 60 : Utilisation d'un mobile dans différents types d'environnement géographique

3.6.1.5 - Les différents types de modèles

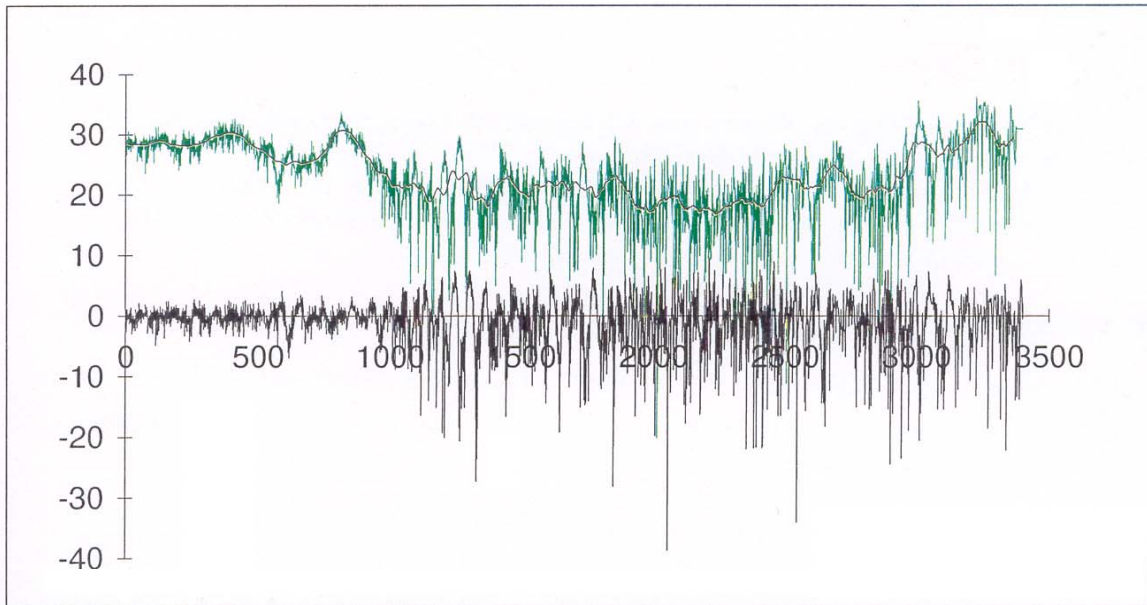
Il existe une multitude de modèles de propagation d'ondes radioélectriques, chaque auteur apportant sa connaissance et son savoir-faire à la complexité de la tâche consistant à simuler le canal de propagation, qui est variable dans le temps et dans l'espace.

Nous limiterons notre recherche aux modèles de propagation qui sont utilisés pour la planification d'un réseau de téléphonie radiomobile GSM, et les modèles actuellement développés pour la conception de systèmes concernant l'UMTS, qui sont plutôt à large-bande (modélisation de la réponse impulsionnelle).

Ainsi, on cherche à prédire les variations lentes du signal radioélectrique, qui correspond en fait à une moyenne locale. En effet, les évanouissements dus au *fading*¹³⁵ sont très perturbants et on peut avoir des trous de l'ordre de -40 dB¹³⁶ dans certains cas. La figure 61 illustre une mesure d'affaiblissement radio GSM le long d'un parcours routier. On a affiché les mesures brutes (en vert) sur lesquelles on a superposé le signal moyen que l'on en a déduit. La courbe située sur l'axe des abscisses (en noir) correspond aux évanouissements rapides du signal, obtenu par soustraction point à point des mesures brutes du champ moyen.

¹³⁵ *Fading* : terme anglais qui signifie « affaiblissement, dispersion », et qui désigne les phénomènes d'affaiblissement liés à des variations rapides du signal radioélectrique.

¹³⁶ dB : décibels



Sources : France Télécom, CNET, 1996.

Figure 61 : Exemple de signal radio mesuré le long d'un parcours routier, avec en vert les mesures brutes (sur lesquelles a été superposé le champ moyen) et en noir la courbe des évanouissements rapides seule (fading).

Les modèles de propagation ont pour but de prédire au mieux les variations lentes du signal radio dues aux obstacles (dits aussi « effets de masques ») le long de la liaison Émetteur-Récepteur. Pour modéliser ce phénomène, différentes approches sont possibles :

- **Modèles théoriques, déterministes :**

Ce type de modèle s'appuie sur les lois fondamentales de la physique du signal radioélectrique ainsi que sur des modèles de l'atmosphère et des modèles de terrain. Les problèmes électromagnétiques, dans le contexte d'un environnement géographique donné, conduisent rarement à des solutions analytiques, même en faisant des simplifications rigoureuses. C'est la raison pour laquelle ce type de modélisation est assez rare en propagation radioélectrique. Cependant, ce type de modèle ne se résume pas forcément à l'établissement de formules mathématiques.

Ce type de modélisation n'existe en fait que sur le papier puisqu'il est très ambitieux de prétendre modéliser l'ensemble des phénomènes qui influent sur la propagation du signal radio. De plus, il est très complexe de vouloir tenir compte également des variations temporelles (variations saisonnières, mobilité des obstacles...). Cependant, des modèles théoriques ont été développés, pour avoir une modélisation la plus proche de la réalité avec notamment des algorithmes déterministes pour le calcul de la diffraction (par exemple la méthode de Vogler [VOGLER, 1982]¹³⁷). Des modèles à base de TGD (Théorie Géométrique de Diffraction) ont également fait l'objet de publications [KELLER, 1962]¹³⁸.

Les modèles déterministes sont très complexes, leur utilisation implique une connaissance très approfondie du sujet. Ils sont donc dédiés préférentiellement à des travaux de recherche, ce qui les rend incompatibles avec l'ingénierie des réseaux radiomobiles où l'on a besoin d'outils rapidement opérationnels. De plus, les performances de ces modèles ne sont pas toujours à la hauteur de ce que l'on pourrait espérer d'une telle approche.

¹³⁷ VOGLER L. E., *An attenuation function for multiple knife-edge diffraction*, Radio-science, Vol. 17, n°6, pages 1541-1546, 1982.

¹³⁸ KELLER J. B., *Geometrical theory of diffraction*, JOSA, Vol. 52, pages 116-130, 1962.

- **Modèles empiriques ou statistiques :**

Ce type de modèle n'a d'autres justifications que de décrire mathématiquement (le plus souvent grâce aux statistiques) un ensemble de mesures collectées sur le terrain ou de données expérimentales ; il s'agit de modèles de représentation de la réalité. La majorité des modèles de propagation appartiennent à ce type de modèle.

Si le modèle empirique est bien construit, avec la rigueur exigée par l'analyse statistique, il représentera correctement les données qui ont servi à l'établir.

Parce qu'en général, il est relativement simple et facile à mettre en œuvre (en terme de développement mathématique et de programmation informatique), le concepteur de système de télécommunication aura tendance à le préférer à tout autre.

Il faut bien garder à l'esprit que dans le cas d'un modèle empirique il n'est pas prouvé que le modèle fonctionne dans d'autres conditions (fréquence différente, milieu géographique différent, etc.) que celles qui ont présidé à son établissement. Toute généralisation du modèle est donc toujours un peu hasardeuse. En particulier deux erreurs doivent être évitées : l'erreur de paramètre et la fausse dépendance entre les variables. L'erreur de paramètre consiste à prendre une grandeur liée à une variable d'entrée comme variable indépendante ou à faire intervenir des variables d'entrée liées. La fausse dépendance est plus difficile à détecter car elle provient de l'existence d'une variable cachée qui, furtivement, lie deux variables qui n'ont en fait aucun lien direct de cause à effet. Par exemple, si l'on considère la température à la surface du sol en ville et la densité de véhicules motorisés on peut trouver que l'une favorise l'autre, alors que bien évidemment, c'est la présence d'une forte densité de population humaine qui explique les deux accroissements. Les situations réelles, pour n'être pas toujours aussi simples à comprendre, n'en conduisent pas moins à des résultats parfois aberrants. Dès lors que le nombre de mesures expérimentales est limité, un échantillonnage spatial particulier pourra entraîner une corrélation entre la distance et par exemple la hauteur des antennes. Un modèle empirique où la distance euclidienne a été choisie comme variable d'entrée pourra donner de très mauvais résultats appliqués à d'autres simulations si en réalité, c'est la hauteur (de l'antenne, du sursol, du mobile, etc.) qui est déterminante.

Si nous insistons sur cet aspect des choses, c'est qu'en physique de la propagation du signal radio on travaille presque toujours avec des bases de données de petite taille (données radioélectriques : affaiblissements du signal mesurés, etc.) compte tenu de la difficulté à les obtenir, du prix très élevé¹³⁹ des campagnes de mesure sur le terrain, et du nombre de variables dont peut prétendre le phénomène étudié.

Dans une telle approche, purement statistique, il n'y a aucune base théorique sur la propagation du signal radio, le calcul de l'affaiblissement de la liaison est déduit uniquement à partir de statistiques appliquées aux données collectées sur un ensemble de campagnes de mesures, qui doivent donc être les plus représentatives possibles des configurations rencontrées sur le terrain. Le modèle le plus connu de cette catégorie est celui d'Okumura-Hata¹⁴⁰, qui est basé sur l'analyse statistique d'un grand nombre de mesures expérimentales effectuées pour l'agglomération de Tokyo et sa périphérie.

¹³⁹ Le coût d'une campagne de mesure pour un opérateur de télécommunication (par exemple des mesures ponctuelles de l'affaiblissement du signal radio collectées sur des parcours routiers couvrant l'ensemble d'une agglomération, comme par exemple la Communauté Urbaine de Strasbourg) est de l'ordre de 150 000 euros pour une campagne de mesure d'une durée d'une semaine employant 4 techniciens de mesures.

¹⁴⁰ HATA M., *Empirical formula for propagation loss in land mobile radio service*, IEEE Transaction on Vehicular technology, Vol. 29, pages 317-325, 1980.

Les paramètres pris en compte correspondent aux caractéristiques des systèmes de télécommunication (fréquence, hauteurs des antennes), à la distance émetteur-récepteur et à des données sur l'environnement géographique (type d'occupation du sol, degré d'urbanisation...).

Les performances obtenues avec ce type d'approche sont variables suivant le modèle et le milieu géographique étudié, mais il est clair que l'utilisation d'un tel modèle doit se faire avec beaucoup de précautions pour qu'il donne des résultats acceptables. Il faut entre autre se trouver dans un environnement géographique qui fasse parti de son domaine d'application et qui soit assez proche des situations qui ont été mesurées sur le terrain et qui ont servies à son élaboration.

Ces modèles ont été très utilisés dans les années 70-80 lorsqu'on ne disposait pas encore de données géographiques numériques pour représenter l'environnement. Ils permettaient alors d'avoir des algorithmes simplifiés pour avoir rapidement une idée du signal que l'on pouvait recevoir en un point. Mais à l'heure actuelle avec l'évolution technologique due à la forte croissance de la puissance du matériel informatique, des grands progrès en matière de collecte automatique des données géographiques (capteurs CCD¹⁴¹ en télédétection, numérisation des données analogiques, etc.), et développement de nombreux algorithmes de traitements de l'information (images, signal radio, etc.), il est actuellement possible de disposer d'un volume de données important et d'en déduire un certain nombre de paramètres utiles pour effectuer un calcul d'affaiblissement de propagation. C'est pourquoi les modèles purement statistiques sont de moins en moins utilisés, les opérateurs de télécommunication se tournant plus vers une troisième approche qui correspond aux modèles semi-empiriques.

- **Modèles semi-empiriques :**

Ces modèles sont une combinaison des deux approches décrites précédemment. Il s'agit de modèles dont les variables d'entrée et de sortie sont choisies en fonction d'une analyse physique du phénomène. Si cette analyse est poussée suffisamment loin, il se peut qu'on puisse déterminer la forme *a priori* des relations entre les variables. La partie empirique réside alors dans l'estimation des valeurs numériques des coefficients du modèle à partir des résultats expérimentaux. Il est clair que cette approche est meilleure que la précédente car on évite ainsi les erreurs de modélisation dues aux variables liées. C'est pourquoi, on attachera toujours plus de confiance aux généralisations de ce type de modèle qu'à celles provenant de modèles purement empiriques.

Les modèles semi-empiriques se basent sur une partie théorique assez simplifiée pour tenir compte des phénomènes de propagation influents (calcul de diffraction multiple, réflexion...). Puis à partir de cela, un certain nombre de corrections statistiques sont effectuées sur l'ensemble des variables calculées par le modèle ce qui permet de l'ajuster par rapport aux situations réelles rencontrées sur le terrain.

Pour développer ce type de modèles, il faut donc disposer de données assez précises sur l'environnement en présence (données géographiques numériques) et de données expérimentales (campagnes de mesures sur le terrain).

¹⁴¹ Capteur CCD : capteurs numériques. *CCD* est un terme anglais dont l'équivalent en français est *DTC*, qui signifie « Dispositif à Transfert de Charge ». Ce type de capteur numérique équipe les caméras professionnelles en audiovisuel, ainsi que les capteurs numériques effectuant les prises de vue par les satellites de télédétection de nouvelle génération.

- **Modèles stochastiques :**

En propagation radioélectrique, il s'agit de la situation la plus usuelle. Cette catégorie de modèle recouvre les trois catégories précédentes. On trouve des modèles stochastiques théoriques, empiriques et semi-empiriques. Un modèle est stochastique dès qu'une variable d'entrée ou de sortie est aléatoire. Les relations du modèle feront alors intervenir les variables déterministes ainsi que des statistiques provenant des variables aléatoires ou des paramètres permettant de préciser leurs lois de probabilité. Souvent ces statistiques et/ou paramètres sont déterminés grâce à d'autres variables d'entrée.

C'est principalement à ce type de modèle que l'on s'intéresse à l'heure actuelle pour la planification des réseaux radiomobiles.

3.6.1.6 - Comment construire un modèle

Il n'y a pas de démarche scientifique unique en modélisation. Néanmoins une démarche raisonnée permet d'éviter certaines erreurs. Parmi les questions que l'on doit se poser tout au long de l'élaboration du modèle on trouve :

- **Quel est le problème à résoudre ?**

C'est une phase d'analyse où l'on cherche à dégager les variables de sortie (liens avec les systèmes de télécommunications utilisés) ainsi que les mécanismes élémentaires de propagation tels que la réfraction, la diffusion et la diffraction, qui permettront de dégager les éléments influençant le phénomène, le processus de propagation des ondes radio (réfraction de l'atmosphère, forme et taille des immeubles, topographie du terrain, types d'occupation du sol, etc.).

- **Recherche des variables d'entrée**

C'est un point très important pour lequel il est difficile de dégager une méthodologie générale. Tout d'abord, il est important de bien avoir à l'esprit que dans les phénomènes de propagation du signal, l'échelle avec laquelle on va appréhender les milieux naturels et/ou anthropiques joue un rôle primordial.

Il est également clair qu'un modèle est d'autant plus commode à utiliser que le nombre de variables d'entrée est réduit. Il est donc parfaitement légitime d'accepter une certaine dégradation des performances du modèle (justesse de la prédiction du signal reçu) en échange d'une simplification du modèle ou d'un gain en temps de calcul machine. Dans le cas des milieux urbains, par exemple, un Modèle Numérique de Surface (hauteur du sursol) et une théorie de la diffraction pourraient idéalement constituer un modèle parfait ; il n'empêche que la découverte d'une ou de plusieurs variables (à différentes échelles) résumant les propriétés d'une ville (morphologie urbaine, etc.) du point de vue de la propagation radioélectrique serait du plus haut intérêt. C'est à cette problématique que nous nous sommes intéressés dans notre recherche, nous la présenterons dans la suite de ce mémoire.

- **Recherche des relations**

Cette phase combine des études théoriques, des campagnes de mesure ainsi que des simulations numériques.

Deux approches principales sont possibles :

Première approche : On cherche à partir de processus fondamentaux connus à mettre en évidence, à la fois les paramètres pertinents et leurs relations avec les variables de sortie. Cette approche utilise tout l'arsenal théorique de l'électromagnétisme et de la géographie. Actuellement l'accroissement continue de la puissance des ordinateurs et l'efficacité croissante des méthodes numériques rend cette approche de plus en plus attrayante car, si la démarche est longue, c'est sans nul doute la plus riche et la mieux contrôlée en ce sens qu'on maîtrise à tout moment l'enchaînement des causes et des effets. On aboutit alors à des modèles théoriques ou semi-empiriques.

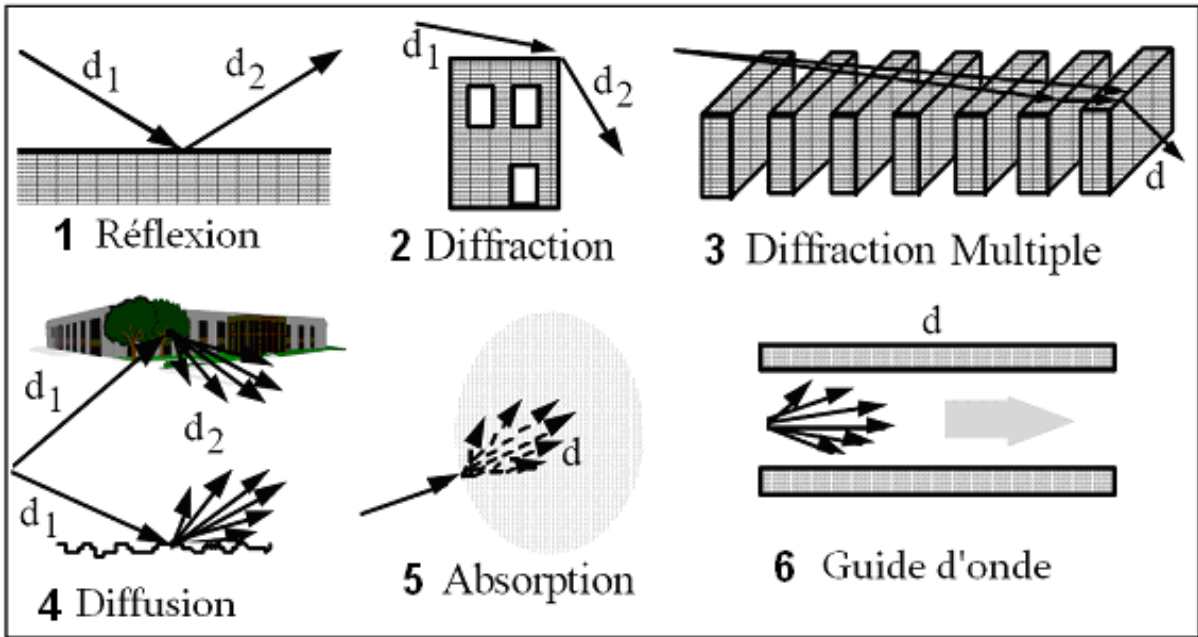
Deuxième approche : On cherche directement des relations entre les variables d'entrée et les variables de sortie en utilisant pour cela une technique de régression statistique. Sans faire partie *stricto sensu* des techniques de régression, la méthode de l'équiprobabilité est très souvent utilisée dans ce cas. Rapide, cette seconde approche aboutit à des modèles purement empiriques, mais elle recèle le danger d'aboutir à des lois dépendant de paramètres cachés ou ne respectant pas le principe de causalité.

3.6.2 - Données utilisées pour la modélisation

Les modèles actuels effectuent un certain nombre de calculs pour prédire le signal reçu en n'importe quel point en tenant compte des phénomènes de propagation. Les algorithmes qui en découlent se basent sur des données géographiques pour pouvoir effectuer les calculs d'affaiblissement. Enfin, du fait de la simplification de l'approche théorique utilisée, il est nécessaire d'améliorer la précision du modèle pour l'ajuster aux situations réelles, et ceci à partir des mesures issues d'un certain nombre de campagnes de mesure. Des corrections statistiques sont donc effectuées à partir des données expérimentales.

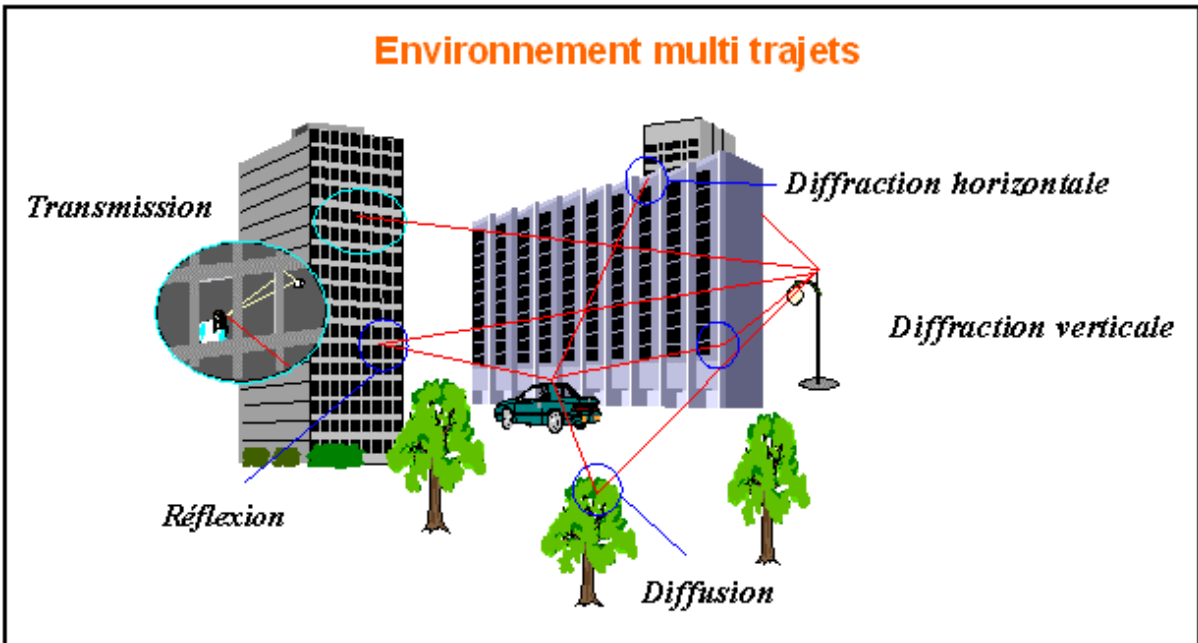
3.6.2.1 – Les différents mécanismes de propagation pris en compte

Dans un milieu homogène idéal, l'onde émise se propage sous forme de rayons rectilignes. Mais la plupart du temps l'onde va rencontrer des obstacles matériels (constructions humaines, relief) qui vont entraîner une modification du trajet de l'onde émise. En fonction de la nature de l'impact, l'onde subira des phénomènes de réflexion (figure 62.1), de diffraction (figure 62.2-3), de diffusion (figure 62.4), d'absorption (figure 62.5) ou de transmission par conduit (figure 62.6).



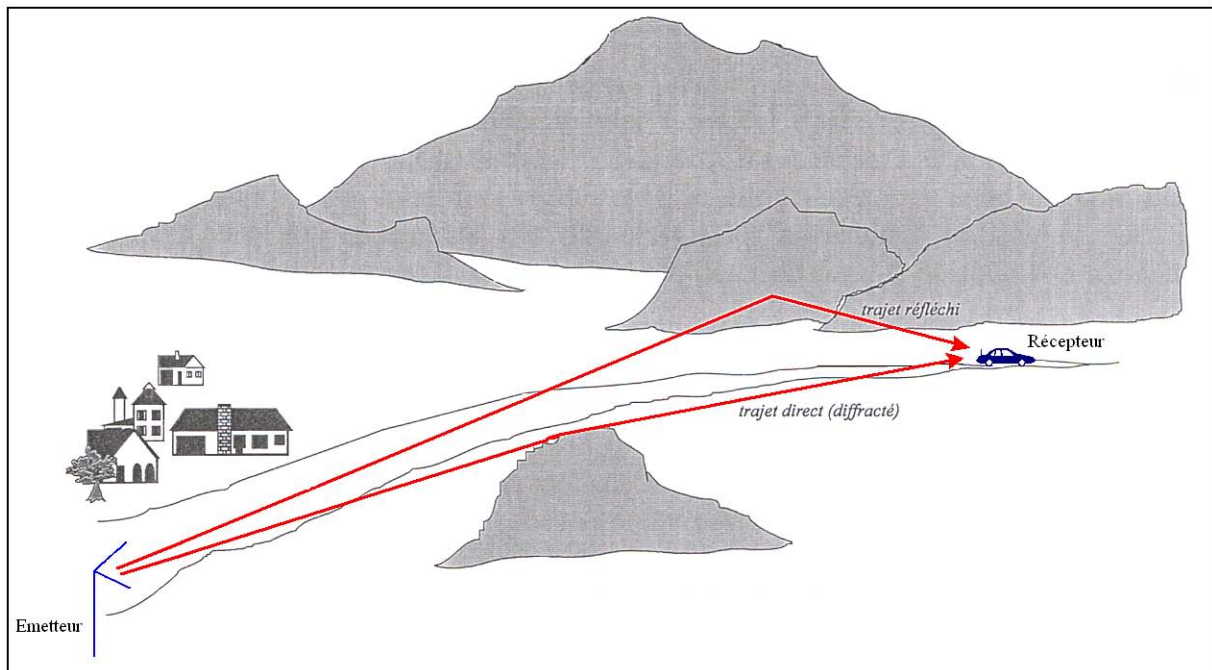
Sources : C.Turck, FTR&D, 2003.

Figure 62 : Les différents mécanismes de propagation radioélectrique



Sources : FTR&D, 2003.

Figure 63 : Mécanismes de propagation des ondes radioélectriques en milieu urbain



Sources : FTR&D, 2003.

Figure 64 : Mécanismes de propagation des ondes radioélectriques en milieu montagneux

Pour la partie théorique du modèle, on se base sur des algorithmes qui permettent de calculer l'affaiblissement le long de la liaison E-R. Cet affaiblissement est dû à l'effet de la distance Emetteur-Récepteur qui est prise en compte dans la formule de calcul de l'affaiblissement en espace libre, auquel on rajoute des termes qui proviennent de l'influence des obstacles naturels ou anthropiques. Le signal radio subit des diffractions et des réflexions sur ces obstacles. Les modèles doivent donc prendre en compte ces phénomènes, qui diffèrent fortement suivant le type d'environnement géographique traversé.

Par exemple, l'effet des réflexions n'est important que dans des environnements très particuliers comme le milieu urbain où les contributions du signal reçues par réflexion sur les façades des immeubles peuvent être très importantes et cela d'autant plus que dans ce cas, le signal diffracté peut être fortement affaibli du fait de la hauteur des immeubles (figure 63).

Cela est également vrai en milieu montagneux où les réflexions sur les flancs des montagnes sont en général très fortes en amplitude et en délai, ce qui induit des trajets réfléchis pouvant être plus puissants que le trajet direct entre l'émetteur et le récepteur, surtout si celui-ci est obstrué par des obstacles naturels comme par exemple une colline (figure 64).

Cependant, la prise en compte des phénomènes de réflexion et de diffusion sur les obstacles sont propres à des modèles particuliers développés pour ces environnements complexes, les méthodes utilisées seront donc décrites au cas par cas lorsqu'on présentera chaque modèle.

Dans le paragraphe qui suit, nous allons tout d'abord décrire les calculs qui sont communs à tous les modèles, c'est-à-dire le calcul d'affaiblissement en espace libre et le calcul d'affaiblissement de diffraction par les obstacles.

3.6.2.1.1 – Affaiblissement de propagation en espace libre :

Ce calcul décrit la propagation d'une onde dans le cas idéal où l'on fait abstraction de tous les obstacles le long de la liaison E-R. En pratique, cela n'est jamais vérifié mais on considère que lorsque l'on a visibilité entre l'émetteur et le récepteur, on assimile la propagation à celle en espace libre. On rappelle que la notion de visibilité optique pour les ondes radioélectriques passe par le dégagement de la première zone de Fresnel (c'est-à-dire pas d'obstacles dans l'ellipsoïde ayant pour foyers l'émetteur et le récepteur, et pour rayon $R = 0,5 \cdot \sqrt{\lambda d}$).

Un émetteur de puissance P_e , alimentant une antenne isotrope¹⁴², crée à une distance d une onde sphérique. L'antenne isotrope n'étant pas réalisable dans la pratique, on définit le gain de l'antenne dans la direction du récepteur G_e et la PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente) par $PIRE = P_e \cdot G_e$. Si on place une antenne de réception (gain G_r) à la distance d , on montre que la puissance reçue est alors :

$$P_r = (\lambda / 4\pi d)^2 \cdot P_e \cdot G_e \cdot G_r \quad (5)$$

Avec :

λ : longueur d'onde (en mètres)

d : distance entre l'émetteur et le récepteur (en mètres)

P_r : puissance reçue au niveau du récepteur (en décibels)

Si on exprime cela en terme d'affaiblissement radio en décibels et en fonction de la fréquence (en Mégahertz), on obtient alors la relation bien connue donnant la formule mathématique de calcul de l'affaiblissement radio en espace libre (en supposant les antennes omnidirectionnelles avec $G_e = G_r = 1$) :

$$A_{EL} = 20 \log d + 20 \log F - 27,55 \quad (6)$$

Avec :

A_{EL} : affaiblissement en espace libre (donné en décibels)

d : distance entre l'émetteur et le récepteur (en mètres)

F : fréquence d'émission de l'onde radio (en mégahertz)

On remarque que cette formule dépend uniquement de la distance pour un système de télécommunication donné qui est un paramètre très influent pour le calcul d'affaiblissement. Des études ont montré que le facteur 2 devant le terme $10 \log d$ tel qu'il est défini par la formule précédente n'est pas suffisant dans des conditions réelles et le facteur est plus proche de 4 (le terme est alors égal à $40 \log d$) dans des environnements très urbanisés. Des corrections statistiques ont donc été apportées dans les différents modèles de propagation sur la prise en compte de la distance d , puisque l'on n'est jamais (ou très rarement) dans les conditions d'espace libre (surtout en milieu urbain).

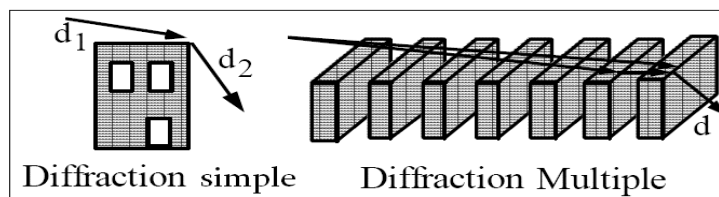
La formule de calcul de l'affaiblissement radioélectrique en espace libre permet ainsi de calculer l'affaiblissement subi par le signal entre l'émetteur et le récepteur du fait uniquement de sa propagation dans le vide. On dit alors que le récepteur est en visibilité directe de l'émetteur.

Pour connaître l'affaiblissement total de l'onde, il est bien entendu nécessaire de rajouter un calcul d'affaiblissement de diffraction afin de tenir compte de la présence d'obstacles le long de la liaison.

¹⁴² Antenne isotrope : se dit d'une antenne dont les propriétés physiques (l'émission du signal radioélectrique) sont identiques dans toutes les directions.

3.6.2.1.2 – Affaiblissement de diffraction

Les conditions réelles sont en général très éloignées du cas idéal de la propagation en espace libre et les obstacles naturels (collines, zones boisées...) ou construits par l'homme (bâtiments, mobilier urbain, ponts,...) obstruent fréquemment la ligne de visibilité Emetteur-Récepteur. On doit alors tenir compte de leur influence pour prédire l'affaiblissement de propagation d'une liaison radioélectrique qui se manifeste par le rayonnement du signal dévié par ces obstacles. C'est ce que l'on appelle la diffraction qui est donc essentiellement un problème de conditions aux limites. Le phénomène de diffraction se produit lorsqu'une onde rencontre une arête (toits, coins d'un bâtiment, gros tronc d'arbre, etc.) dont la dimension est supérieure à la longueur d'onde λ de l'onde radio ($\lambda = 32$ centimètres pour les ondes radio UHF à 900 MHz). La diffraction constitue l'un des éléments les plus importants intervenant dans la propagation des ondes radioélectriques [BOITHIAS, 1983]¹⁴³. L'utilisation de la Théorie Géométrique de la Diffraction développée par Mac NAMARA¹⁴⁴ en 1990, permet de modéliser ce phénomène sous forme de rayons comme sur la figure 65.

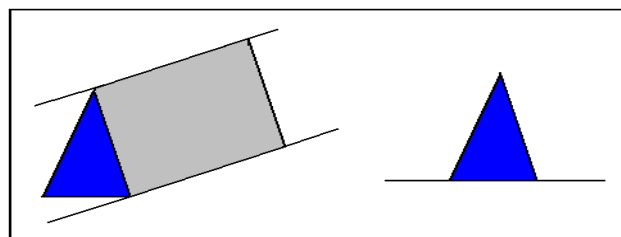


Sources : C.Turck, FTR&D, 2003.

Figure 65 : La Diffraction des ondes

Un certain nombre de méthodes ont été définies pour résoudre ce problème et donner une estimation du champ diffracté par les obstacles. Certaines proposent des solutions théoriques (Méthode de Vogler¹⁴⁵, ...) mais qui ne sont pas utilisables dans la pratique du fait de leur complexité incompatible avec les contraintes de temps d'exécution d'un outil d'ingénierie. D'autres solutions basées sur de approximations permettent d'avoir des algorithmes simples mais au détriment de la précision du calcul et au prix de limites de validité très strictes.

La méthode simplifiée la plus utilisée est basée sur les travaux de Fresnel¹⁴⁶ qui considère un obstacle comme un écran transversal dont le bord est infiniment mince (comme une « lame de couteau », *knife-edge* en anglais), qui est parfaitement absorbant et qui est un demi plan infini (ce qui veut dire que le signal ne peut passer qu'au-dessus de l'obstacle, pas par les côtés) comme le montre la figure 67. A partir de cette forme d'obstacle, on peut déduire le champ reçu au niveau du récepteur grâce à la résolution des intégrales de Fresnel.



Sources : C.Turck, Laboratoire Image et Ville, 2004.

Figure 66 : Modélisation des obstacles au moyen de « lames de couteaux » en vue 2D et 3D

¹⁴³ BOITHIAS L., *Propagation des ondes radioélectriques dans l'environnement terrestre*, Ed. Dunod, 1983.

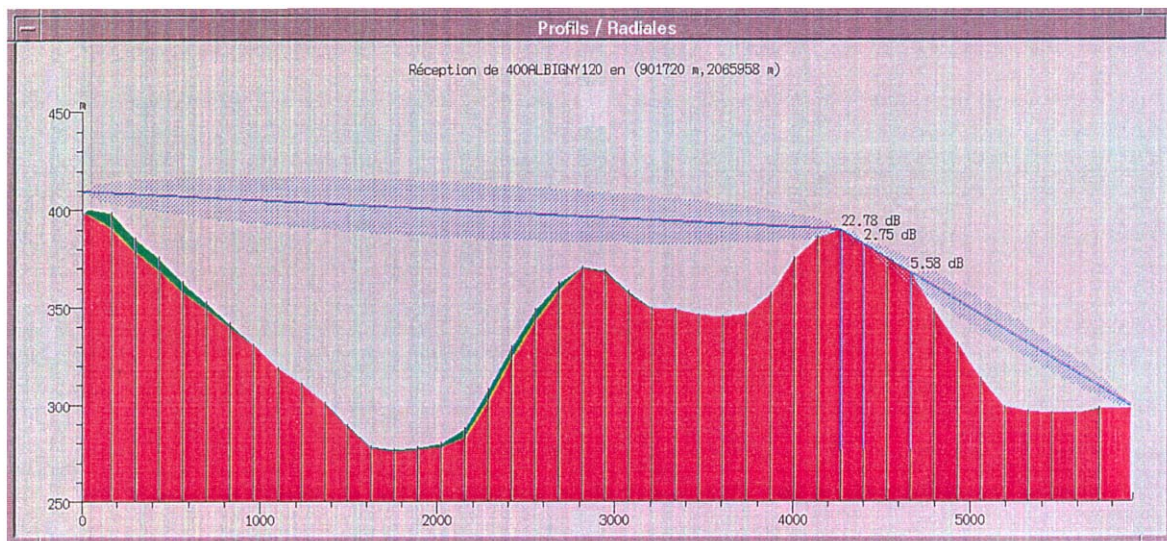
¹⁴⁴ McNAMARA D.A, PISTORIUS C.W.I., MALHERBE J.A.G., *The Uniform Geometrical Theory of diffraction*, Artech House, London, 1990.

¹⁴⁵ VOGLER L.E., *An attenuation function for multiple knife-edge diffraction*, Radio-Science, Vol. 17, n°6, pages 1541-1546, 1982.

¹⁴⁶ La Méthode de l'Optique Physique a été développée par FRESNEL en 1818, par combinaison du principe de Huygens (1678) et du principe d'interférence de Young (1801).

Un certain nombre de méthodes proposent de transposer ces travaux au cas le plus fréquemment rencontré dans la réalité, à savoir la diffraction par plusieurs obstacles (figure 65). Ainsi, la méthode de Millington¹⁴⁷ propose l'extension des intégrales de Fresnel au cas de deux obstacles, d'autres algorithmes moyennant un certain nombre d'approximations permettent une extension à un nombre fini d'obstacles (Epstein-Peterson¹⁴⁸, Deygout¹⁴⁹, ...). Pour pouvoir effectuer les calculs de diffraction dans les modèles de propagation destinés à l'ingénierie des liaisons radioélectriques, France Télécom R&D a testé plusieurs méthodes qui peuvent être applicables au niveau de la précision des résultats et du temps d'exécution. La méthode retenue pour leurs modèles est celle de J. Deygout [DEYGOUT, 1966], avec qui France Télécom R&D a collaboré afin d'optimiser l'utilisation de sa célèbre formule de diffraction multiple dans le domaine des radiomobiles (Modèle de propagation d'ondes radio CAPADOCE optimisé, 1991).

Ainsi, les modèles de propagation comportent entre autre un calcul d'extraction de profil en lame de couteaux entre l'émetteur et le récepteur, et ceci grâce à des données géographiques de sol (Modèle Numérique de Terrain) et de sursol (Modèle Numérique de Surface au format maillé, ou bien BD TOPO® de l'Institut Géographique National au format vectoriel). Après une synthétisation de ce profil pour ne conserver que les pics pertinents, on applique les algorithmes de diffraction multiple pour déduire un affaiblissement dû à la diffraction, que l'on ajoute à l'affaiblissement d'espace libre. Un certain nombre de corrections, entre autres statistiques, sont appliquées car les algorithmes sont très simplifiés, ils ne tiennent pas compte de tous les phénomènes de propagation. La figure 67 montre un exemple de profil de diffraction en zone montagneuse tel qu'il est extrait par le modèle développé par FTR&D à partir des données géographiques de sol et de sursol.



Sources : FTR&D, 2001.

Figure 67 : Exemple de profil de diffraction (trait en bleu) calculé par le modèle FTR&D à partir du Modèle Numérique de Terrain (en rouge) et du Modèle Numérique de Surface (en vert).

¹⁴⁷ MILLINGTON G., HEWITT R., IMMERZI F. S., *Double knife-edge diffraction in field-strength predictions*, Proc. IEE Monogr., 507E, 419-429, 1962.

¹⁴⁸ EPSTEIN J., PETERSON W., *An experimental study of wave propagation at 850 MC*, Proceedings of the I.R.E., vol. 41, pages 595-611, 1953.

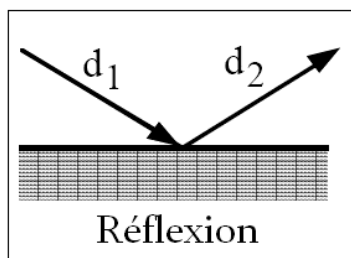
¹⁴⁹ DEYGOUT J., *Multiple knife-edge diffraction of microwaves*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, n°4, vol. AP-14, pages 480-489, 1966.

DEYGOUT J., *Correction factor for multiple knife-edge diffraction*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, n°8, vol. AP-39, pages 1256-1258, 1991.

3.6.2.1.3 – La réflexion des ondes radioélectriques

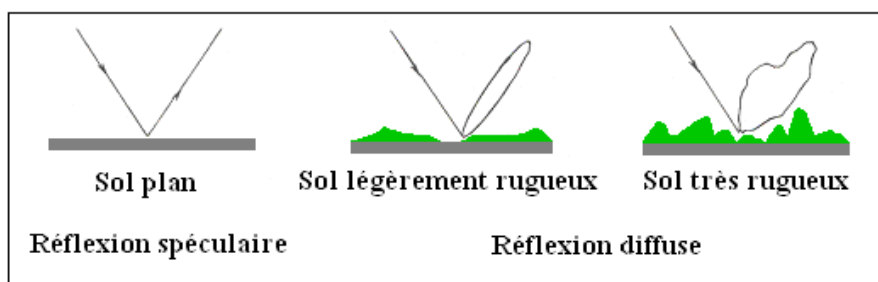
On assiste à un phénomène de réflexion des ondes électromagnétiques lorsque l'onde incidente rencontre une surface dont les dimensions sont grandes (dimension surface $\gg 32$ cm pour une fréquence $f = 900$ MHz) et les irrégularités petites (dimension irrégularités $\ll 32$ cm pour $f = 900$ MHz) par rapport à la longueur d'onde λ ($\lambda = 32$ cm pour les ondes UHF à 900 MHz).

Le champ réfléchi est lié au champ incident par l'intermédiaire des formules de Fresnel¹⁵⁰ (1818).



Sources : C.Turck, FTR&D, 2003.

Figure 68 : La Réflexion des ondes



Sources : J. Lavergnat, 1997.

Figure 69 : De la réflexion spéculaire à la réflexion diffuse

On distingue la réflexion spéculaire et la réflexion diffuse.

La réflexion spéculaire

La réflexion spéculaire est induite en présence d'une surface homogène parfaitement plane. Elle est due à la présence sur le trajet de l'onde d'obstacles tels que le sol, les façades d'immeubles et les surfaces planes. L'affaiblissement de propagation induit par la réflexion spéculaire découle des relations de Fresnel et dépend des caractéristiques diélectriques (conductivité σ , permittivité ε) de la surface réfléchissante. Des études ont ainsi été menées concernant les caractéristiques de différents types de sol (très sec, moyennement sec, humide) et d'eau (eau de mer, eau pure, glace) en fonction de la fréquence. De même pourrait-on effectuer des recherches du même ordre sur le revêtement du sol (sol nu, dalle de béton, dalle en grès, goudron, herbes, etc.), des façades des bâtiments (grès, pierre, béton, verre, métal, etc.) et des toitures (tuiles, tôle, béton, etc.) afin d'obtenir une typologie des revêtements ainsi que les valeurs de conductivité et de permittivité correspondantes. Ce type de recherche, de classification des objets géographiques, notamment en milieu urbain¹⁵¹, à partir de leur

¹⁵⁰ Les quatre formules de calcul proposées par Fresnel en 1818 permettent de calculer les facteurs de réflexion R_V et R_H et de transmission T_V et T_H des ondes électromagnétiques.

¹⁵¹ WEBER C., 2002, Images satellitaires et milieu urbain, Editions Hermès, Collection Géomatique, Paris, 185 pages.

caractéristiques radiométriques (réflectance, bilan radiatif, etc.) fait l'objet de recherches approfondies par des géographes spécialisés dans le domaine de la Télédétection.

La réflexion diffuse

La réflexion diffuse est due aux réflexions sur des surfaces qui ne sont pas planes mais rugueuses ; ces surfaces présentent des inégalités de hauteur en différents points. Il en résulte qu'une onde incidente n'est plus réfléchiée dans une direction unique mais diffusée dans de multiples directions.

La question qui se pose est donc de savoir si une surface donnée peut être considérée comme lisse ou non. Une réponse à cette question peut être donnée en utilisant le critère de Rayleigh (figure 70). Soit h la hauteur des irrégularités de la surface. Elle introduit entre deux rayons incidents i une différence de marche $\Delta l = 2h \cdot \sin\Phi$ et donc un déphasage $\Delta\Phi$:

$$\Delta\Phi = [(4\pi h)/\lambda] \cdot \sin\Phi \quad (7)$$

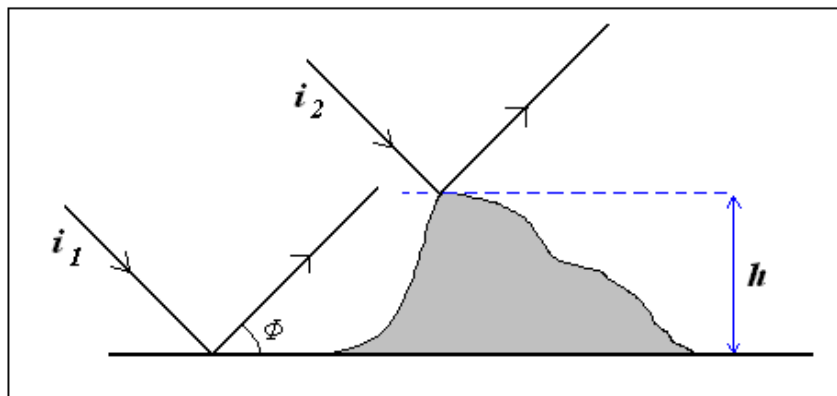
Avec :

λ : la longueur d'onde

Φ : l'angle d'incidence, c'est-à-dire l'angle formé entre le sol et l'onde incidente.

Lorsque la hauteur des irrégularités de surface h est suffisamment petite pour que ces deux ondes soient en phase, on se trouve dans le cas précédent de réflexion spéculaire. Sinon la surface est considérée comme rugueuse. En résumé, on peut dire que la réflexion est diffuse lorsque $\Delta\Phi > \pi/2$, c'est-à-dire lorsque $h > \lambda/8 \sin\Phi$.

La rugosité dépend donc de la fréquence f , de l'angle d'incidence Φ et de la hauteur des irrégularités h .

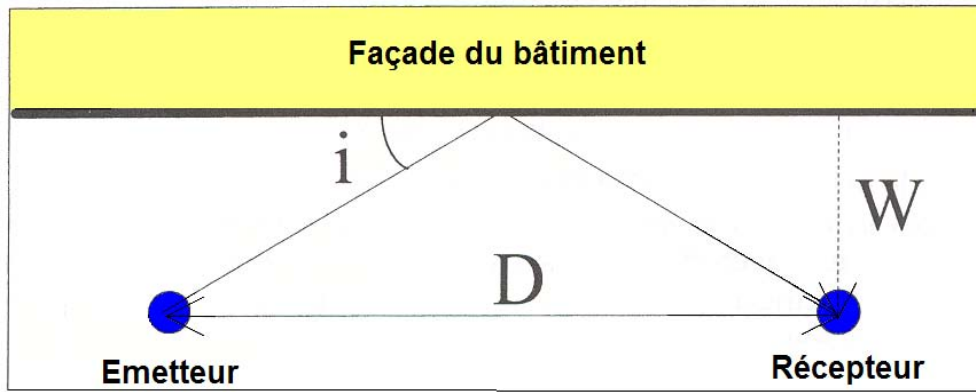


Sources : C.Turck, Laboratoire Image et Ville, 2004.

Figure 70 : Vue de profil - Critère de Rayleigh : déphasages créés par une irrégularité de surface de hauteur h .

Nous pouvons illustrer ce phénomène par l'exemple décrit ci-dessous [SIZUN, 2003]¹⁵² : étude d'une réflexion simple dans une rue sur une façade d'immeuble. L'émetteur et le récepteur sont éloignés l'un de l'autre d'une distance D et localisés à une distance W de la façade du bâtiment (figure 71).

¹⁵² SIZUN H., 2003, *La propagation des ondes radioélectriques*, Editions Springer, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Paris, 355 pages.



Sources : H. Sizun, FTR&D, 2003.

Figure 71 : Vue du dessus - Géométrie d'une réflexion sur une façade de bâtiment

L'angle i de réflexion spéculaire est donné par les lois de l'optique géométrique :

$$\sin(i) = \frac{W}{\sqrt{W^2 + D^2 / 4}} \quad (8)$$

Le critère de rugosité s'écrit alors :

$$\text{Si } h > \frac{\lambda \sqrt{W^2 + D^2 / 4}}{8W} \text{ alors la réflexion est diffuse} \quad (9)$$

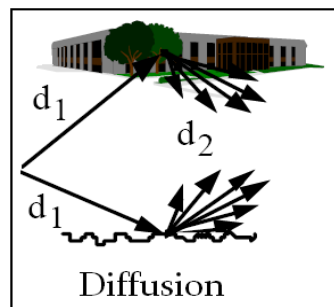
Avec :

h : hauteur des irrégularités de surface (décrochement de façades, balcons, etc.)

W : distance entre l'émetteur et le récepteur

D : distance entre l'émetteur et/ou récepteur et la façade du bâtiment

3.6.2.1.4 – La diffusion des ondes



Sources : C.Turck, FTR&D, 2003.

Figure 72 : La Diffusion des ondes

Les diffuseurs atmosphériques :

Dans une liaison terrestre ou Terre-satellite les ondes électromagnétiques ne se propagent pas dans le vide. L'atmosphère, outre les gaz qu'il contient et qui ont un effet absorbant sur les ondes, contient en suspension des particules diélectriques (isolantes pour l'électricité) telles les hydrométéores¹⁵³, poussières et grains de sable qui augmentent l'atténuation du signal radio en espace libre (phénomène de divergence géométrique), provoquent des déphasages¹⁵⁴ (différences de phase entre les ondes radio) et des dépolarisations (opération qui détruit la polarisation) nuisibles au bon déroulement de la transmission du signal.

Du point de vue de la Physique, l'analyse de ces différents phénomènes ressort de la Théorie de la Diffusion (qui se base sur les équations de Maxwell).

On distingue la diffusion par une particule isolée (par exemple une goutte de pluie) et la diffusion par un ensemble de particules diffusantes (pluie et brouillard, etc.).

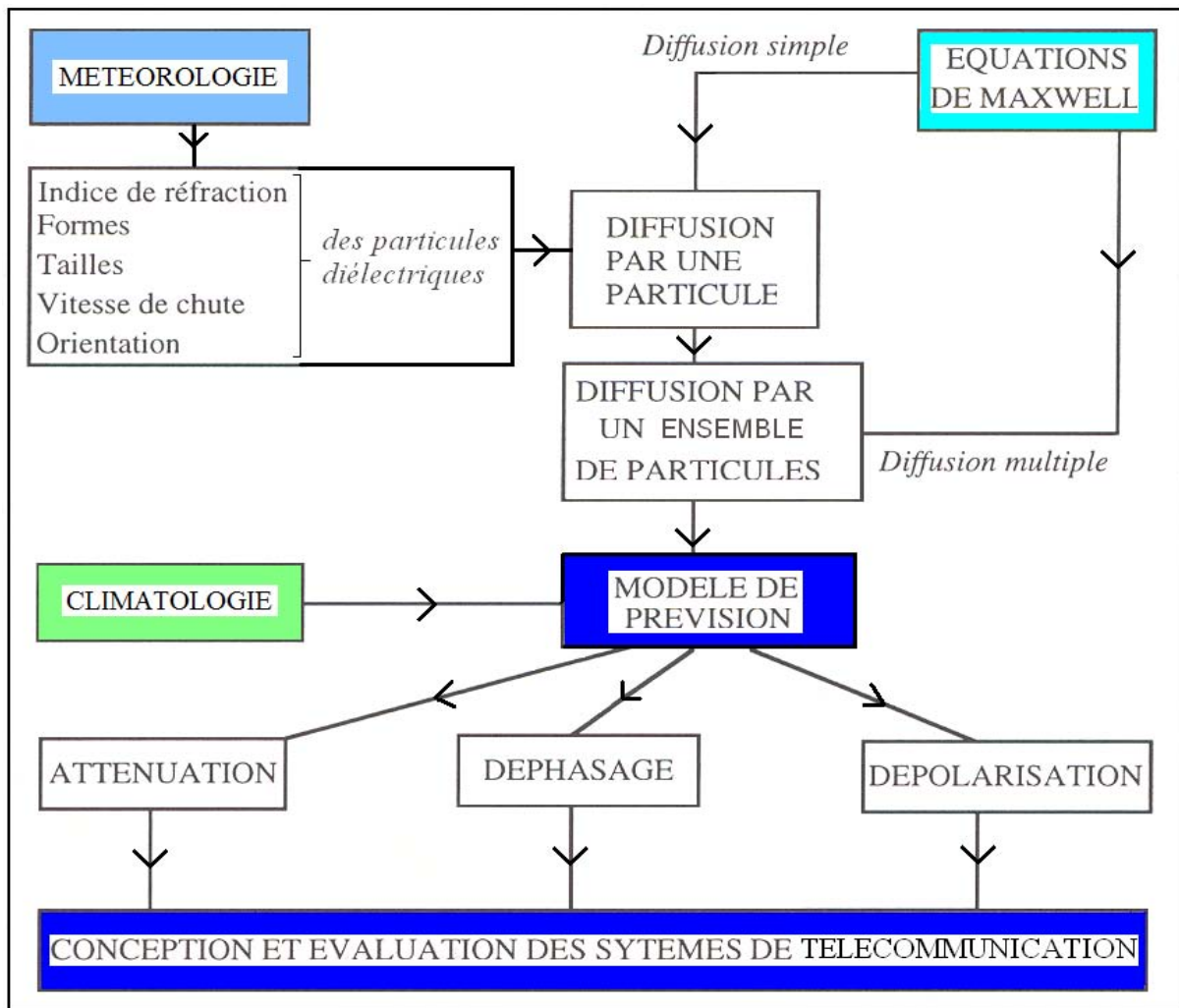
L'importance des effets de diffusion dépend du rapport entre la longueur d'onde λ et la taille des particules diffusantes.

La figure 73 illustre la complexité du phénomène de diffusion atmosphérique.

Mais pour les systèmes de téléphonie radiomobiles GSM (900 MHz et 1800 MHz) et UMTS (1900 MHz), la longueur d'onde est décimétrique. Or les particules diélectriques tels les hydrométéores sont de très petites tailles (quelques millimètres au maximum). La diffusion atmosphérique n'a donc pas d'impact sur la propagation des ondes radioélectriques pour les systèmes de télécommunication radiomobiles auxquels nous nous intéressons.

¹⁵³ Les hydrométéores regroupent toutes les précipitations qui se produisent dans l'atmosphère : la pluie, la rosée, le brouillard, le givre, la grêle et la neige. Le volume des précipitations s'exprime en litre par m^2 . On le mesure avec un pluviomètre.

¹⁵⁴ Déphasage : Différence de phase entre deux phénomènes alternatifs de même fréquence. Dans notre cas le phénomène alternatif correspond à la propagation des ondes radioélectriques.



Sources : C. Turck, 2003, d'après J. Lavergnat, 1997.

Figure 73 : Les différents modèles d'analyse de la diffusion atmosphérique

La diffusion par des obstacles naturels ou anthropiques :

Bien que les obstacles soient généralement de grande taille par rapport à la taille des ondes radioélectriques, leurs surfaces doivent être bien souvent considérées comme « rugueuses » [balcons et fenêtres des façades de bâtiments, mobilier urbain, feuillage des arbres (dans le cas des ondes millimétriques, qui sont utilisées notamment par le système GPS¹⁵⁵)].

La diffusion apparaît lorsque l'obstacle présente de nombreuses irrégularités de la même taille que la longueur d'onde λ (32 cm pour le GSM 900).

Les trajets de propagation diffusés se rencontrent plus particulièrement lorsque l'onde rencontre des surfaces qui ne sont pas lisses (relief accidenté, végétation, mer, etc.) ou des petites hétérogénéités (par rapport à la longueur d'onde). La notion de surface lisse est étroitement liée à la fréquence.

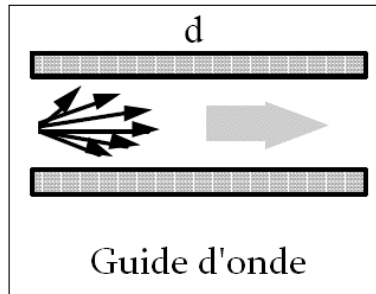
Pour la problématique qui nous intéresse, c'est-à-dire la modélisation de la propagation des ondes radioélectriques pour les systèmes radiomobiles, la diffusion ne revêt pas une grande importance. Elle n'est donc pas prise en compte dans les modèles dédiés aux radiomobiles.

¹⁵⁵ GPS : *Global Positioning System*. Système américain de localisation des objets géographiques fixes ou des mobiles (homme, avion, etc.) à partir d'un réseau de satellites géostationnaires. La transmission du signal entre les satellites et le récepteur GPS se fait grâce à des micro-ondes, qui sont très sensibles aux objets de petite taille comme les feuilles des arbres, les hydrométéores, ainsi qu'à la largeur des rues (visibilité du réseau de satellites).

3.6.2.1.5 – La propagation par conduit, guide d'ondes

Certains environnements particuliers (rues étroites, tunnels, etc.) se comportent comme de véritables guides d'ondes vis-à-vis de la propagation des ondes radioélectriques, ce phénomène est due à de multiples réflexions successives sur les parois.

Dans ce cas, on applique la théorie des modes de propagation et celle des rayons, et ceci plus particulièrement lorsque la longueur d'onde est très petite par rapport à la section transverse du tunnel ou de la ruelle, par exemple [SIZUN, 2003].



Sources : C.Turck, FTR&D, 2003.

Figure 74 : Le guidage des ondes

3.6.2.2 – Description des données géographiques

Pour effectuer une prédiction du champ radioélectrique reçu en un point donné, les modèles de propagation se basent sur la coupe de profil du terrain (la coupe topographique) et du sursol (la hauteur du bâti, de la végétation, des ponts...) entre l'émetteur et le récepteur. Celle-ci est extraite à partir de données géographiques qui donnent, avec une résolution plus ou moins fine suivant le type d'environnement (de plusieurs centaines de mètres en milieu rural jusqu'à quelques mètres voir décimètres en milieu urbain dense), la topographie du sol et des informations sur le sursol : type d'occupation du sol (bâtiments, végétation, eau...), type d'utilisation du sol (bâti urbain dense à vocation commerciale, bâti urbain dense à vocation résidentielle...), hauteur du sursol, etc.

Les données géographiques numériques sont divisées en deux grandes catégories : les données maillées (raster, pixel), et les données vectorielles.

3.6.2.2.1 – Les données maillées (raster, pixel)

Les fichiers maillés permettent d'avoir un quadrillage continu couvrant toute une zone géographique donnée, avec pour chaque maille des informations géographiques soit sur la hauteur du terrain (le Modèle Numérique de Terrain), soit sur les caractéristiques du sursol (le Clutter, le Modèle Numérique de Surface).

Dans le domaine des télécommunications on regroupe sous le terme de « sursol » tous les éléments naturels (bois, cultures...) ou constructions humaines (bâtiments, mobilier urbain, ponts...) situés au dessus du niveau du sol.

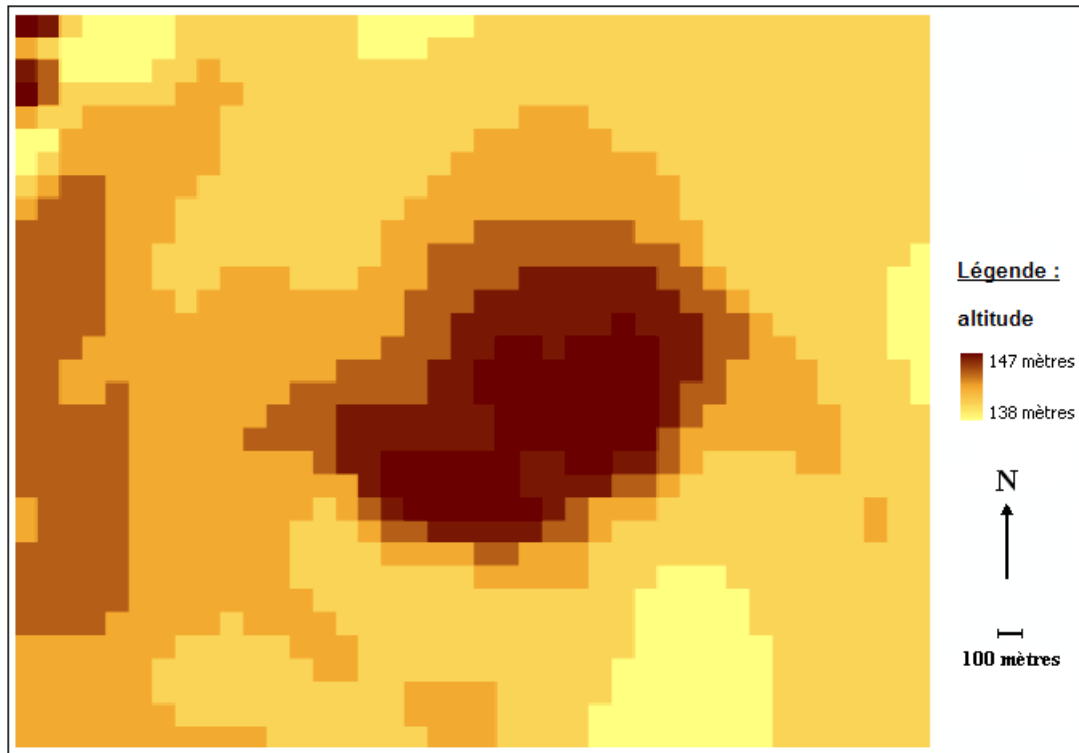
Dans le domaine des télécommunications, le terme de « Clutter » désigne la carte d'occupation du sol.

3.6.2.2.1.1 – Le Modèle Numérique de Terrain

Le Modèle Numérique de Terrain contient les informations concernant la topographie, c'est-à-dire qu'il fournit pour chaque maille l'altitude du terrain.

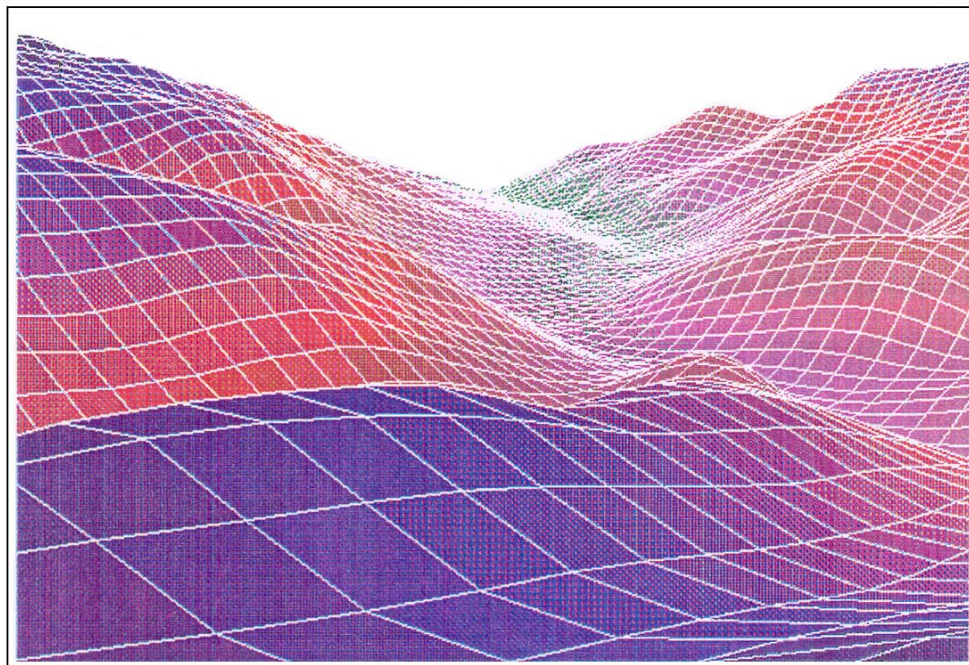
L'opérateur national dispose d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) au pas de 100 mètres couvrant toute la France. Un MNT au pas de 25 mètres est également disponible pour les grandes agglomérations françaises.

Nous reviendrons en détail sur les MNT (principe de construction, fournisseurs de données, résolution, etc.) dans la troisième partie.



Sources : C.Turck, Laboratoire Image et Ville, Strasbourg, 2003.

Figure 75 : Visualisation en 2D d'un Modèle Numérique de Terrain avec une résolution de 100 mètres
 Zone de Strasbourg Centre-ville.



Sources : C.Turck, FTR&D, 2003.

Figure 76 : Visualisation d'un Modèle Numérique de Terrain en 2,5 D
 Zone géographique de moyenne montagne.

3.6.2.2.1.2 – Le Clutter

Le Clutter contient des informations concernant la nature du sursol (figure 77). Le Clutter correspond à ce qu'on appelle en géographie « la carte d'occupation du sol », c'est-à-dire qu'il fournit, pour chaque maille, le type d'occupation du sol majoritaire. On dispose donc d'un fichier géographique offrant une description statistique (% de l'élément majoritaire dans la maille) du sursol.

Le nombre de thèmes ainsi que la résolution du fichier géographique peuvent être très variés (résolution de 100 mètres jusqu'à 1 mètre selon la zone géographique à étudier ; nombre de thèmes pouvant varier de 3 (eau, bois, bâti) jusqu'à 20 (lacs, cours d'eau, routes, autoroutes, bâti pavillonnaire, bâti urbain dense, bâti de grands ensembles, bâti industriel, place végétalisée, place minérale, etc.).

France Télécom R&D dispose d'un fichier de clutter maillé au pas de 400 mètres couvrant toute la France. Il contient 7 classes (% de l'élément dans la maille de 400m x 400 m) définis comme suit : eau, bois, autres thèmes (prairies, champ...), roche nue, bâti diffus, bâti mixte, bâti dense.

France Télécom R&D dispose également d'un fichier plus précis sur les grandes agglomérations. C'est un fichier de sursol maillé au pas de 100 mètres qui comprend 4 classes d'occupation du sol (% de l'élément dans la maille de 100 m x 100 m) définis comme suit : espaces ouverts (open), eau, bois, bâti.



Sources : C.Turck, Laboratoire Image et Ville, Strasbourg, 2003.

Figure 77 : Visualisation du Clutter 4 thèmes avec une résolution de 25 mètres
Zone de Strasbourg Centre-ville.

Nous reviendrons en détail sur les cartes d'occupation du sol (principe de construction, fournisseurs de données, résolution, etc.) dans la troisième partie du mémoire.

3.6.2.2.1.3 – Le Modèle Numérique de Surface

Le Modèle Numérique de Surface contient les informations concernant la hauteur de sursol, c'est-à-dire qu'il fournit pour chaque maille l'altitude du sursol.

France Télécom R&D dispose d'un Modèle Numérique de Surface (MNS) au pas de 400 mètres couvrant toute la France.

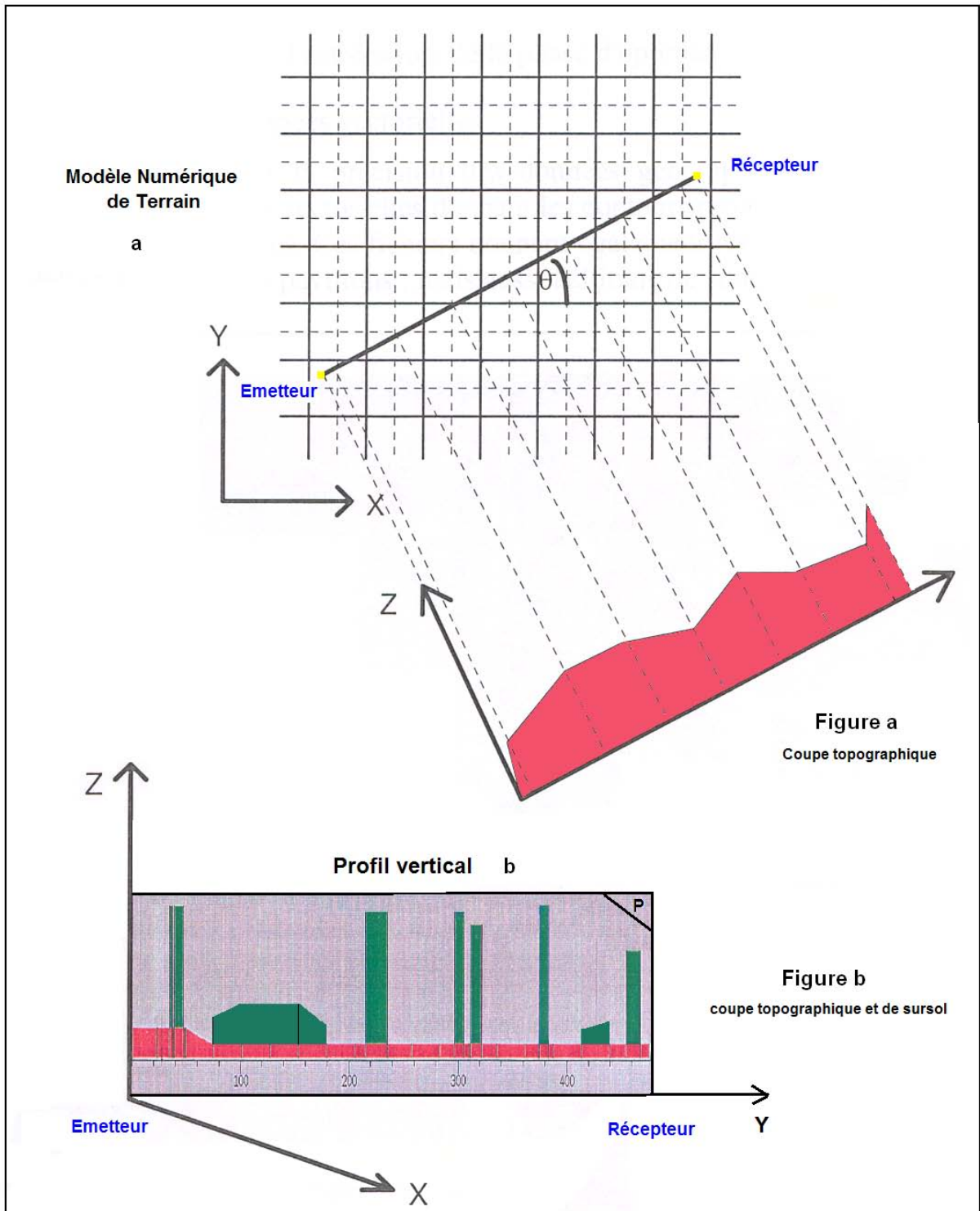
France Télécom R&D dispose également d'un fichier plus précis sur les grandes agglomérations. C'est un fichier de sursol maillé au pas de 100 mètres qui comprend 4 classes de hauteur définies comme suit :

- Classe 1 = hauteur de sursol supérieur à 10 mètres
- Classe 2 = hauteur de sursol supérieur à 20 mètres
- Classe 3 = hauteur de sursol supérieur à 40 mètres
- Classe 4 = hauteur maximale de sursol dans la maille

La figure 78 présente l'extraction à partir des données maillées (MNT et MNS) de la coupe topographique du terrain entre l'émetteur et le récepteur (figure 78 a) ; puis l'obtention, à partir de ce profil, de la coupe verticale des obstacles entre l'émetteur et le récepteur, ce qui correspond en ingénierie radio au profil de diffraction (figure 78 b).

Le Modèle Numérique de Surface fournit une information sur la hauteur du sursol dans la maille, ce qui est très intéressant pour déduire alors le profil de diffraction. Pour l'obtenir, le modèle de propagation doit d'abord extraire les données du sol à partir du Modèle Numérique de Terrain. Puis il extrait du MNS la hauteur de sursol, et il rajoute la hauteur du sursol sur le profil topographique déjà déduit du MNT. L'extraction du profil vertical émetteur-récepteur à partir de fichiers maillés se fait avec des algorithmes très simples. Il suffit de trouver le point du quadrillage qui est le plus proche des points de la droite reliant l'émetteur et le récepteur. On obtient donc finalement le profil de diffraction (figure 78 b) composé de pics (« lame de couteaux ») sur lequel on pourra appliquer les algorithmes de diffraction multiple.

Il faut noter que les données géographiques et notamment sur le sursol servent aussi à déduire un certain nombre de nouvelles variables géographiques (par exemple, le type d'occupation du sol et la hauteur du sursol pour les mailles proches du mobile) qui serviront de variables d'entrée lors de la phase d'optimisation statistique du modèle de propagation radio.

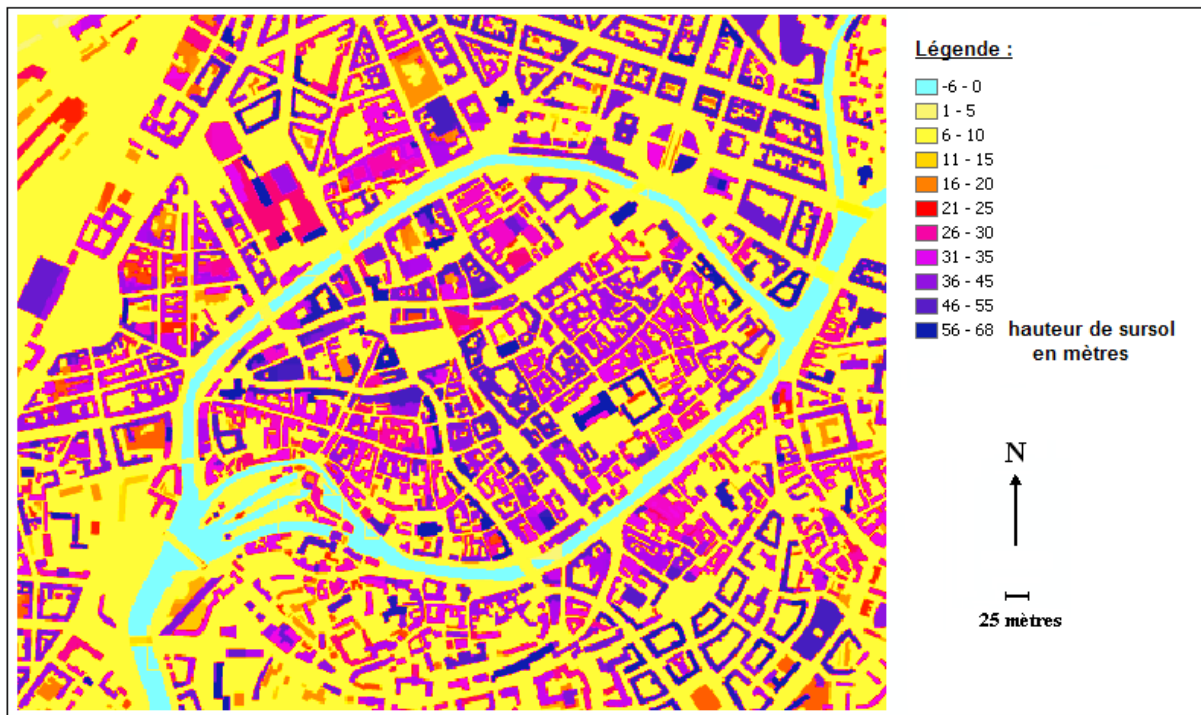


Sources : FTR&D, 2003.

Figure 78 : Extraction de la coupe topographique et du profil de diffraction entre l'Emetteur et le Récepteur

Figure 78.a : Coupe topographique du terrain entre l'émetteur et le récepteur.

Figure 78.b : Coupe topographique du terrain et coupe verticale des obstacles (sursol) entre l'émetteur et le récepteur (profil de diffraction).



Sources : C.Turck, Laboratoire Image et Ville, Strasbourg, 2003.

Figure 79 : Visualisation en 2D d'un Modèle Numérique de Surface avec une résolution de 25 mètres
Zone de Strasbourg Centre-ville.

Nous reviendrons en détail sur les Modèles Numériques de Surface (principe de construction, fournisseurs de données, résolution, etc.) dans la troisième partie.

France Télécom R&D dispose également de fichiers géographiques spécifiques combinant à la fois des données d'altitude du sol et du sursol dans un même fichier, et avec une résolution pouvant aller jusqu'à 25 mètres. De plus ces fichiers géographiques sont dans un format propriétaire (format France Télécom) adapté aux outils d'ingénierie de l'opérateur.

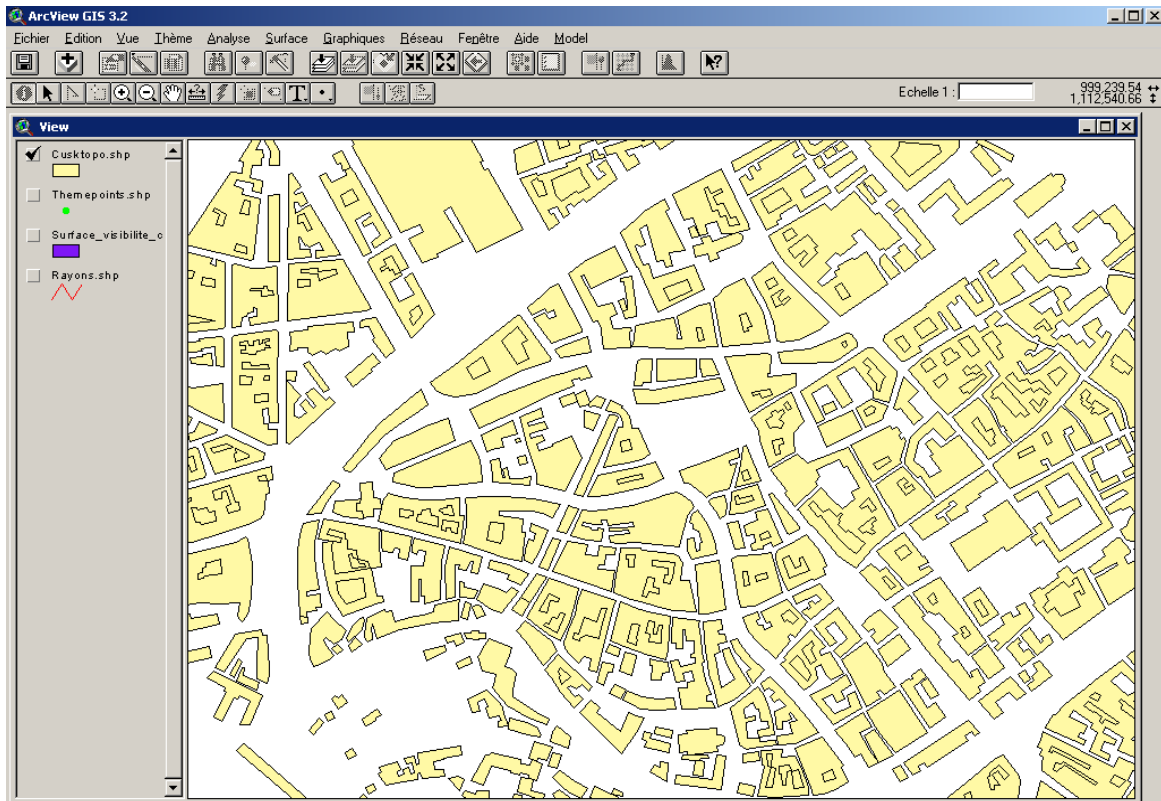
3.6.2.2.2 – Les données vectorielles

Les données géographiques peuvent également être représentées sous la forme de données vectorielles. Ces données sont majoritairement utilisées pour modéliser les zones urbaines. Les données géographiques vectorielles donnent les contours projetés au sol des bâtiments, ainsi que les contours des zones boisées, les plans d'eau, les dalles (places minérales) ; ainsi que l'altitude de ces différents éléments du sursol (le sommet des bâtiments, des bois, etc.). Elles ont une résolution de l'ordre du mètre.

Dans un fichier au format vectoriel, les différents éléments sont représentés soit par des points, soit par des lignes (correspondant à deux points reliés par un segment de droite, un arc) soit par des polygones (correspondant à un ensemble de segments et de points reliés entre eux, et formant une figure géométrique fermée).

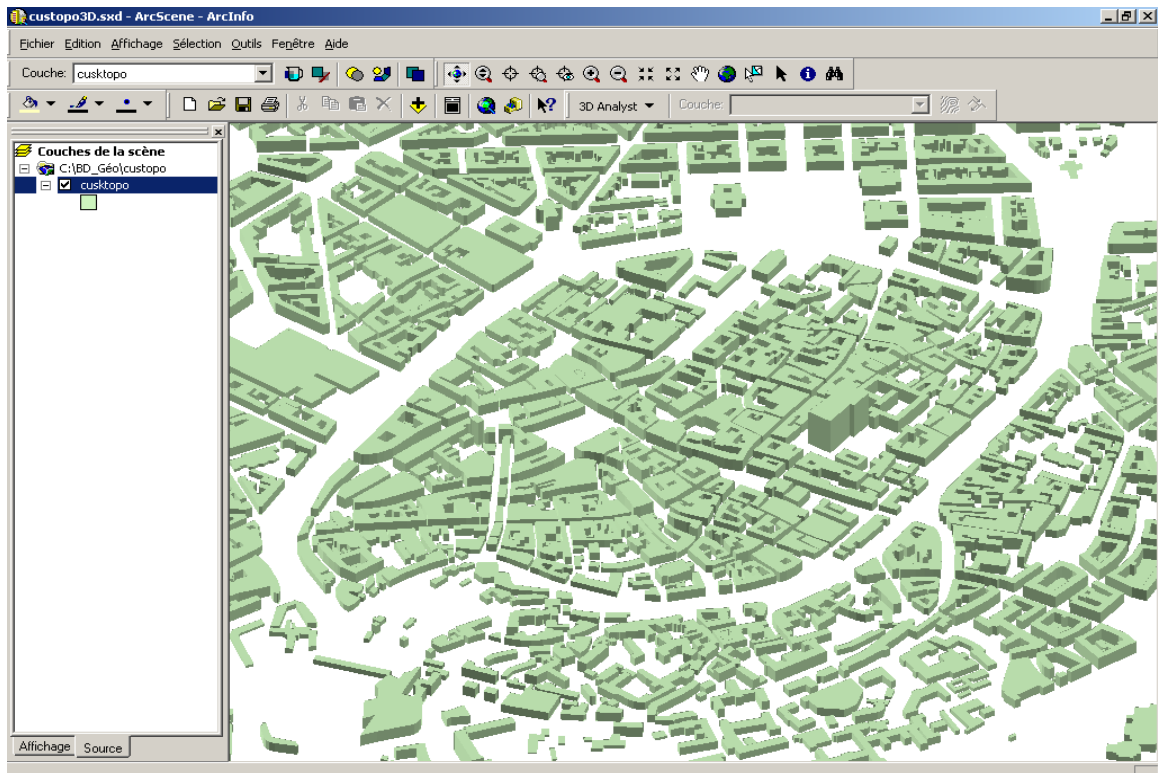
Comme pour les données maillées, on peut extraire le profil de diffraction à partir des contours de base vectoriels. Pour cela, on doit d'abord extraire le profil de terrain à partir du MNT 25 mètres. Puis on extrait les différents contours de bâtiments et de zones boisées à partir des données vectorielles.

Dans le modèle de propagation, des algorithmes ont été développés pour remplacer le profil du bâtiment par une arête. On obtient alors un profil de diffraction classique sur lequel on pourra calculer la diffraction des ondes radioélectriques.



Sources : C.Turck, Laboratoire Image et Ville, Strasbourg, 2003.

Figure 80 : Visualisation 2D des données géographiques vectorielles :
La BD TOPO® de l'IGN - Strasbourg Centre Place Kléber



Sources : C.Turck, Laboratoire Image et Ville, Strasbourg, 2003.

Figure 81 : Visualisation 3D de la BD TOPO® de l'IGN – Strasbourg Centre

Ces données géographiques vectorielles sont très intéressantes pour la modélisation en milieu urbain puisqu'elles décrivent très précisément le sursol (résolution métrique) et cela de façon réaliste. Le revers est que ces données doivent être mises à jour régulièrement, car toute nouvelle construction ou toute destruction d'immeuble peut alors donner de grandes variations de prédiction radio. Elles sont donc plus sensibles à ce problème de mise à jour des données que les fichiers maillés puisque ceux-ci correspondent une valeur moyenne sur l'ensemble de la maille, du pixel. Enfin, on pourrait ajouter à ces inconvénients le coût assez élevé de ces données, c'est pourquoi les opérateurs de réseaux radiomobiles ne les achètent que pour les zones urbaines où la demande en communications mobiles est la plus forte.

Nous reviendrons en détail sur les contours de base vectoriels (principe de construction, fournisseurs de données, etc.) dans la troisième partie du mémoire.

3.6.2.3 – Obtention de données radioélectriques expérimentales

L'élaboration puis la validation d'un modèle, et ceci quelque soit le type de modèle (modèle de propagation du signal en télécommunication, modèle d'analyse spatiale en géographie, etc.), s'effectue à partir de concepts théoriques ainsi que de données mesurées sur le terrain. La validation et l'optimisation du modèle s'effectuent en comparant les données mesurées sur le terrain avec les valeurs calculées par le modèle.

Le premier aspect d'une campagne de mesure est sa définition précise, c'est-à-dire la détermination des paramètres que l'on veut mettre en évidence lors des mesures. Ce sont entre autre le type de campagne [mesures en extérieur, pénétration radio dans les bâtiments, mesures effectuées à l'intérieur des bâtiments (Indoor), ...], le type de signal que l'on veut mesurer (champ, réponse impulsionnelle, qualité, ...), les caractéristiques de l'environnement (milieu urbain, montagnoux, rural ; mais aussi les caractéristiques morphologiques et architecturales des bâtiments pour les modèles de pénétration et l'Indoor), les caractéristiques radio (fréquence, type et hauteur des antennes, distance maximale, ...).

3.6.2.3.1 – Mesures de champ en extérieur

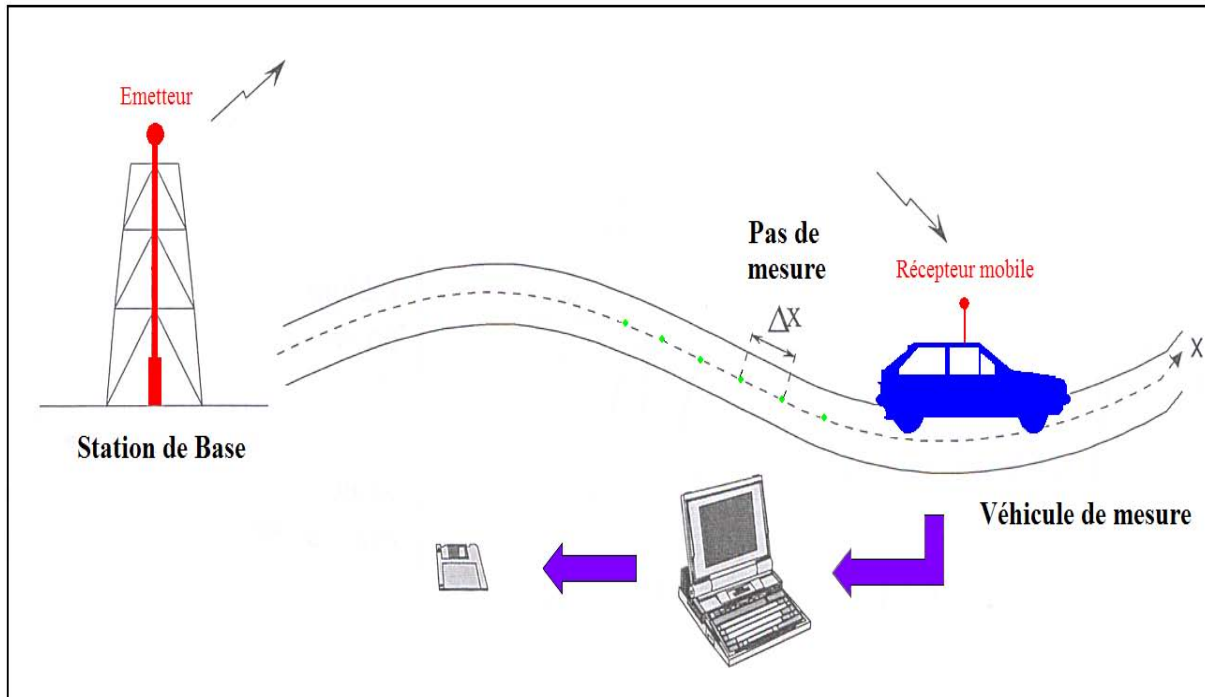
La méthodologie utilisée pour les mesures de champ radioélectrique en extérieur est la suivante :

- Une station émettrice fixe émet avec une puissance donnée une onde porteuse non modulée sur une fréquence donnée.
- Un véhicule équipé d'un récepteur mesureur de champ suit un trajet défini au préalable et relève la valeur du champ mesuré à intervalles de distance fixes (appelés pas de mesure ΔX). Les valeurs sont stockées sur un système d'acquisition numérique (le plus souvent un ordinateur portable).
- Ensuite vient la phase de post traitement : on effectue un traitement *a posteriori* des données collectées afin de définir les coordonnées géographiques (X,Y) de chaque point de mesure (phase de digitalisation et de géoréférencement), et on effectue un moyennage des données afin d'obtenir le niveau moyen du champ et éliminer ainsi les fluctuations rapides (« fading ») du signal radio mesuré (le bruit).

L'intérêt de l'utilisation d'un Système d'Information Géographique lors de la collecte des données sur le terrain apparaît clairement. En effet, l'utilisation d'un GPS connecté à un logiciel SIG, lors de la collecte des données, permet d'obtenir automatiquement des données

géoréférencées, et rend inutile la phase de digitalisation des données, et permet également d'améliorer la qualité des données (précision, erreurs de localisation).

L'introduction de l'utilisation des SIG dans les processus de collecte des données sur le terrain ainsi que dans les post traitements des données a donc été proposé dès 2001 à France Télécom R&D (aux différents laboratoires effectuant des campagnes de mesures) puis à l'opérateur de téléphonie mobile Orange : l'opérateur effectue des mesures de terrain afin d'évaluer la performance de son réseau.



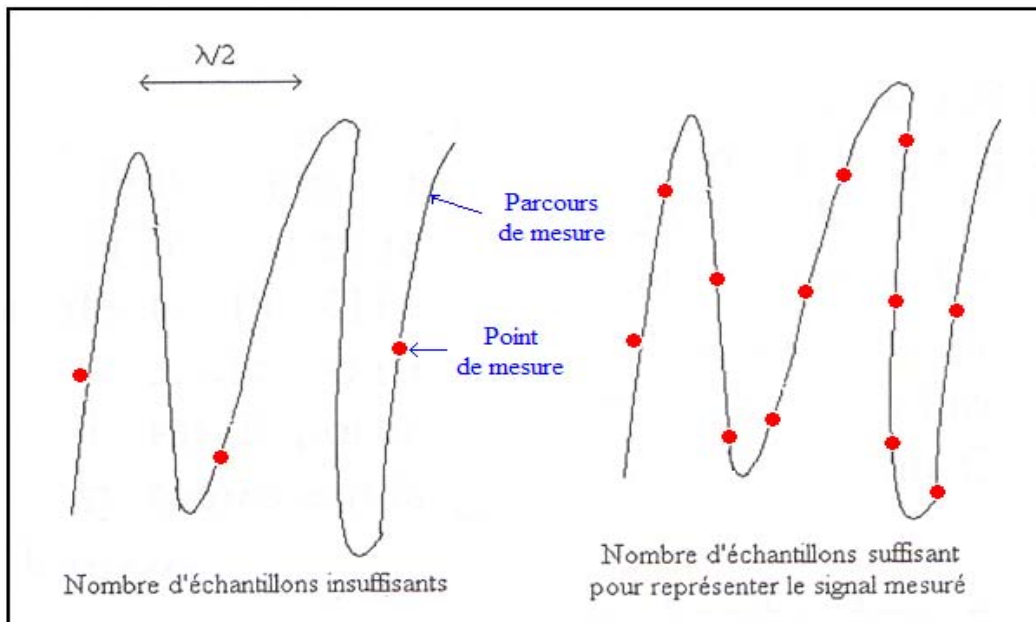
Sources : C.Turck, FTR&D, 2003.

Figure 82 : Principe de la mesure du champ radioélectrique en extérieur

Le choix de l'échantillonnage spatial des données est très important, deux aspects doivent être pris en compte :

- Au niveau du choix du pas d'échantillonnage : Le signal mesuré n'est pas continu, il correspond en fait à une série de points de mesures. Le choix du pas de mesure doit être fait de telle manière que cet échantillonnage spatial soit représentatif du comportement du champ radioélectrique sur l'ensemble d'une zone géographique donnée. En général on considère que le signal radio mesuré est affecté par des évanouissements rapides avec une périodicité d'environ une demie longueur d'onde ($\lambda/2$). Il faut donc que le nombre d'échantillons soit supérieur à cette périodicité pour faire apparaître ces variations du signal (figure 83). On utilise en général un pas de mesure de l'ordre du quart de la longueur d'onde ($\lambda/4$).

- Au niveau du calcul de la valeur moyenne du champ : Le signal mesuré est échantillonné avec une périodicité spatiale donnée, et il est alors possible de calculer la moyenne locale, on obtient ainsi le niveau moyen du champ en éliminant les variations rapides (figure 61). Pour effectuer cette moyenne, il faut choisir un estimateur et déterminer l'intervalle de moyennage (ou bien le nombre d'échantillons à moyennage, ce qui revient au même). Celui-ci est un compromis entre un minimum pour que les variations rapides du signal soient bien équilibrées et un maximum pour ne pas éliminer aussi les variations lentes. Différentes études ont montré qu'une longueur de moyennage de l'ordre de 40λ était un bon compromis, cette valeur pouvant varier suivant le pas de mesure que l'on adopte du fait de la longueur d'onde considérée. Pour ce qui est du choix de l'estimateur, on utilise en général une moyenne glissante.



Sources : C.Turck, FTR&D, 2003.

Figure 83 : Méthode d'échantillonnage spatial

Du point de vue cartographique, les données sont représentées sous forme ponctuelle : pour chaque point de mesure on dispose des coordonnées géographiques (X,Y) ainsi que de l'affaiblissement radioélectrique mesuré (figure 83).

Une fois ces différentes phases de travail terminées (collectes et traitements des données obtenues lors de la campagne de terrain), on peut alors stocker ces données radio (mesure de champ radio moyen) dans une base de données. On pourra alors utiliser les mesures dans l'outil de planification du réseau radiomobile, ainsi que pour valider les modèles de propagation d'ondes radio.



Sources : C.Turck, Laboratoire Image et Ville, Strasbourg, 2003.
Données géographiques : LIV, 2000 ; données radio : FTR&D, 2001.

Figure 84 : Exemple de parcours de mesure à Strasbourg

3.6.2.3.2 – Autres types de campagnes de mesures

- Pour ce qui est des mesures à l'intérieur des bâtiments pour étudier soit la pénétration des ondes (émetteur à l'extérieur), soit la propagation Indoor (émetteur à l'intérieur), les méthodes pour les mesures dans les couloirs sont pratiquement les mêmes que pour les mesures extérieures. Dans ce cas, le véhicule est en fait un chariot qui transporte le même matériel que précédemment, c'est-à-dire le mesureur de champ avec un micro-ordinateur pour le stockage des données collectées. Le nombre de points de mesures collectés dans ce type de campagne est très faible du fait des dimensions réduites de l'environnement (taille du bâtiment) et aussi que cela demande une très bonne précision du positionnement de la mesure (de l'ordre de 20 cm au lieu de plusieurs mètres tolérés en extérieur).
- Pour les mesures dans les pièces, on fixe l'antenne de réception sur un tourniquet qui effectue alors une série de mesures lors de sa rotation en une position donnée. On refait cette opération plusieurs fois dans chaque pièce pour différentes de position du chariot. On doit également (comme pour les mesures dans les couloirs) effectuer ces mesures sur les différents étages pour voir l'influence de la pénétration à travers les planchers et connaître l'étendue de la couverture dans le bâtiment.
- D'autres types de mesures qui concernent aussi bien l'extérieur que l'intérieur des bâtiments sont les mesures à large-bande qui permettent d'obtenir la réponse impulsionnelle du canal de propagation (annexe 2) pour caractériser par exemple les réflexions produites par les obstacles (flanc de montagnes, etc.).
- On peut mentionner aussi les mesures de qualité où l'on cherche dans ce cas à mesurer des paramètres liés au T.E.B. (Taux d'Erreur Bit) qui permettent d'estimer la qualité de la liaison en fonction du fading, de la vitesse du mobile, du niveau de champ moyen et des interférences.

3.6.3 - Les critères d'évaluation d'un modèle

Pour pouvoir évaluer les performances d'un modèle, on doit disposer de paramètres statistiques qui permettent d'estimer sa précision. On définit donc pour chaque point de mesure l'erreur de prédiction en tant que différence entre l'affaiblissement mesuré sur le terrain et l'affaiblissement prédit par le modèle de propagation :

$$E = A_{\text{mesuré}} - A_{\text{prédit}} \quad (10)$$

Avec :

E : l'erreur de prédiction (en décibels, dB)

A : l'affaiblissement du signal radioélectrique (en décibels)

A partir de cette valeur, on détermine un certain nombre de paramètres statistiques qui résument les caractéristiques de la distribution des erreurs.

Il s'agit de :

$\langle E \rangle$: la valeur moyenne de l'erreur de prédiction (en décibels)

σ : l'écart-type de l'erreur de prédiction (en décibels)

Q_x : les pourcentages de points pour lesquels la valeur absolue de l'erreur de prédiction est inférieure à X dB.

Avec ces différents paramètres, on peut alors juger de la précision d'un modèle. On admet en général qu'un modèle est acceptable pour l'ingénierie s'il est centré ($\langle E \rangle$ inférieur à 1 dB en valeur absolue) avec un écart-type le plus faible possible (6 à 7 dB actuellement pour les radiomobiles). Il faut de plus que ces critères soient vérifiés aussi bien d'un point de vue global (sur la totalité des sites de mesure) que pour chaque site pris séparément, pour pouvoir juger de la robustesse du modèle.

4 – Les modèles utilisés en ingénierie des systèmes radiomobiles

4.1 - Introduction

Le présent chapitre décrit les différents modèles de propagation qui sont utilisés en ingénierie des systèmes radiomobiles. Ceux-ci se différencient essentiellement par leur environnement d'application et on les classera donc suivant ce critère en partant des modèles pour les grandes cellules en rural (modèles macro cellulaires) pour aller jusqu'aux modèles pour l'intérieur des bâtiments (modèles pico cellulaires) en passant par les modèles pour les milieux urbanisés (modèles micro cellulaires).

Un modèle de propagation d'ondes radioélectriques comporte à la base un (des) algorithme (s) qui permet de simuler le canal de propagation entre un émetteur et un récepteur. Il permet ainsi de prédire le niveau moyen du signal que l'on reçoit en n'importe quel point à partir d'un certain nombre de paramètres (caractéristiques radio, environnement géographique de la liaison, etc.). Il modélise donc les variations du signal reçu dues aux obstacles du canal radiomobile (effets de masques) auxquelles il faudra rajouter ensuite un algorithme pour tenir compte des variations rapides du signal reçu (fading).

Le modèle est à la base de tous les calculs qui peuvent être fait par un logiciel d'ingénierie radio (niveau de champ radio reçu, calcul des interférences, analyse du hand-over, etc.). Le modèle de propagation apporte au logiciel d'ingénierie une aide précieuse pour le dimensionnement du réseau.

Il doit aussi permettre de minimiser le temps de calcul des couvertures de champs. Il faut donc être très attentif aux différents paramètres d'entrée du modèle.

4.2 – Les modèles pour les grandes cellules

Dans les réseaux de télécommunications radiomobiles la cellule la plus grande est la macro cellule. Le milieu géographique environnant est en général rural ou montagneux et l'antenne de station de base est positionnée sur un point très élevé. La distance entre la station de base et le mobile peut être supérieure à une dizaine de kilomètres.

Les modèles pour les grandes cellules sont des modèles semi empiriques basés sur l'analyse de la coupe topographique (le profil du terrain) entre l'émetteur et le récepteur ainsi que la coupe verticale des obstacles se trouvant le long de ce profil (forêt, constructions, etc.).

Dans cette catégorie, on placera les modèles utilisés pour calculer l'affaiblissement de propagation à partir des données maillées (maille de 100 mètres de résolution). Ces modèles sont plutôt utilisés pour les environnements montagneux, ruraux ou peu urbanisés car les phénomènes de propagation en milieu urbain dense sont particuliers et demandent des modèles spécifiques. Les données géographiques disponibles en continue pour l'ensemble du territoire français sont des données maillées, c'est pourquoi ces modèles se basent sur celles-ci pour calculer la diffraction sur le MNT et le sursol.

Pour cela, ces modèles utilisent des algorithmes d'extraction pour obtenir un profil en « lames de couteaux » (figure 66) sur lequel ils appliquent les algorithmes de diffraction multiple type Deygout (1966). A partir delà, un certain nombre de corrections statistiques sont effectuées à partir des mesures radio collectées sur le terrain pour rendre ces modèles plus précis et applicables dans différents environnements. Ces corrections prennent en compte le sursol au

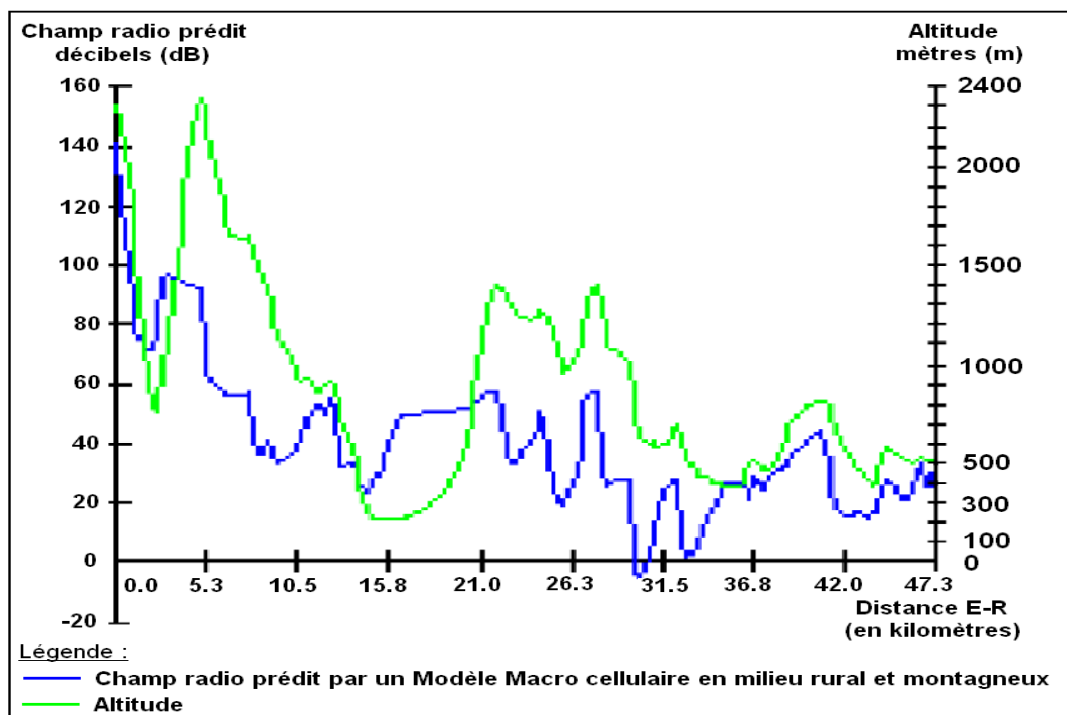
voisinage de l'émetteur et du mobile, les trajets maritimes (réflexions sur l'eau dans les régions côtières), les effets dus à la végétation...

Ce type de modèle atteint ses limites en milieu urbain dense où l'on doit avoir des données géographiques plus précises pour modéliser correctement tous les phénomènes. Cela est également vrai en milieu montagneux où les réflexions sur les montagnes sont très importantes et il faut donc en tenir compte au niveau de la prédiction.

On distingue deux types de modèles macro cellulaires : les modèles ruraux et suburbains, et les modèles montagneux.

4.2.1 – Modèles macro cellulaires ruraux et suburbains

Les modèles ruraux effectuent leur calcul de prédiction uniquement à partir de la coupe de terrain entre l'émetteur et le récepteur. Ils calculent l'affaiblissement dû à la diffraction du signal par les obstacles (sol et sursol) rencontrés le long du profil. Ces modèles permettent d'estimer la couverture radioélectrique d'une zone géographique donnée avec une précision de l'ordre de 6 à 7 dB d'écart type par rapport à la moyenne de l'erreur entre les valeurs d'affaiblissements mesurées et les valeurs d'affaiblissements prédites.



Sources : C.Turck, d'après TDF (site web TDF), 2002.

Figure 85 : Comparaison entre l'altitude du sol et le champ radio prédit par un modèle macro cellulaire rural

Le modèle macro cellulaire CNET-UHF (modèle LD)

Le modèle CNET-UHF a été développé par France Télécom R&D. Il traite de la propagation des ondes radio pour des fréquences de 400, 900 et 1800 MHz. Il est utilisable en milieu rural, en milieu urbain, en milieu maritime, etc.

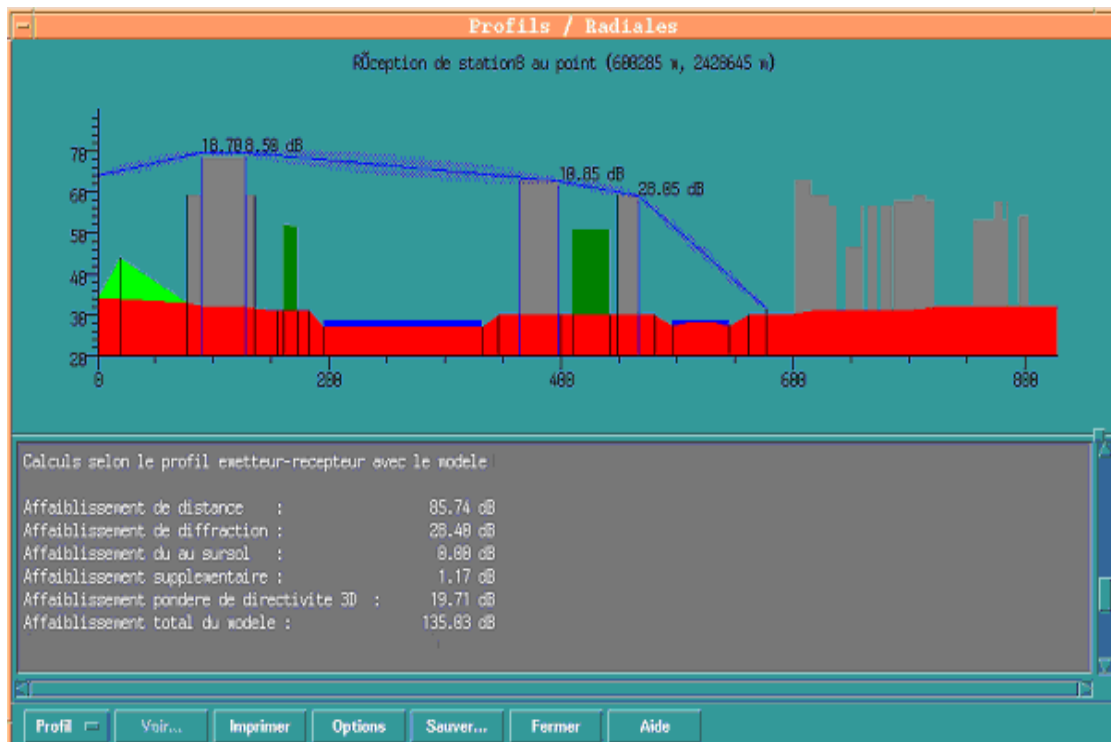
Le modèle CNET-UHF, également appelé modèle LD (en référence aux données géographiques « Localisées » 100 mètres et « Délocalisées » 400 mètres qui sont utilisées dans le modèle), prend en compte les phénomènes suivants pour le calcul de l'affaiblissement radio total :

- la propagation en espace libre,
- la diffraction sur arêtes multiples (méthode de Deygout),
- l'affaiblissement du au sursol,
- des termes correctifs (affaiblissements supplémentaires) afin de tenir compte de la hauteur effective de l'antenne, de la dénivellation, du nombre de points présents dans l'ellipsoïde de Fresnel, etc.

Il s'appuie sur des bases de données géographiques de type maillées pour le sursol (Clutter 4 thèmes, et hauteur de sursol) ainsi que sur un Modèle Numérique de Terrain (100 mètres de résolution).

Pour les données géographiques de sursol le modèle CNET-UHF utilise deux fichiers de données géographiques maillées spécifiques, dans un format propriétaire de France Télécom : des données maillées surnommés «données localisées » au pas de 100 mètres et des données maillées surnommées «données délocalisées » au pas de 400 mètres.

En terme de performances le modèle est centré (valeur moyenne nulle entre affaiblissements mesurés et affaiblissements prédits) et l'écart-type est proche de 7 dB.

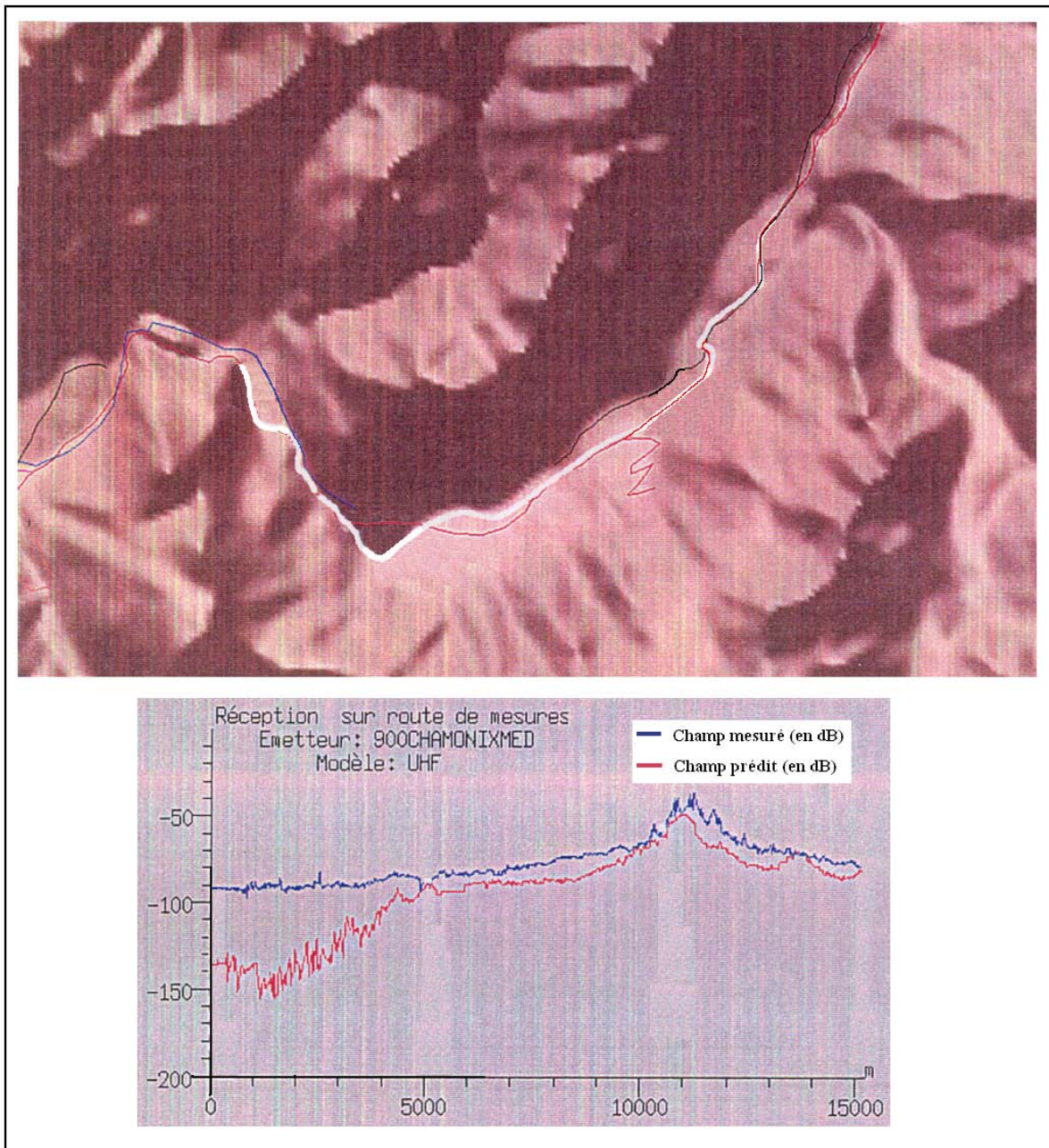


Sources : FTR&D, 2002

Figure 86 : Modèle macro cellulaire rural CNET-UHF : Coupe de profil entre l'Emetteur et le Récepteur

4.2.2 – Le Modèle macro cellulaire montagneux

La simulation de la propagation des ondes radio dans un environnement montagneux est difficile car le signal reçu ne provient pas forcément du trajet direct émetteur-récepteur comme le suppose l'approche classique décrite au chapitre précédent, il passe dans de nombreux cas sur les côtés par réflexion sur les parois des montagnes (figure 87). Il faut donc en tenir compte pour le calcul du champ utile, mais aussi pour le calcul des interférences car il se peut que l'on reçoive un très bon niveau de signal (du fait des réflexions) en un point où un modèle classique prédit un très grand affaiblissement car le trajet émetteur-récepteur est obstrué par le relief. Il est clair que cela peut alors donner de très grandes erreurs de prédiction lors du dimensionnement et de l'ingénierie du réseau mobile.



Sources : CNET, 1996.

Figure 87 : Comparaison entre mesure et prédiction avec un modèle de propagation d'ondes radio classique
Zone géographique : Chamonix, Savoie

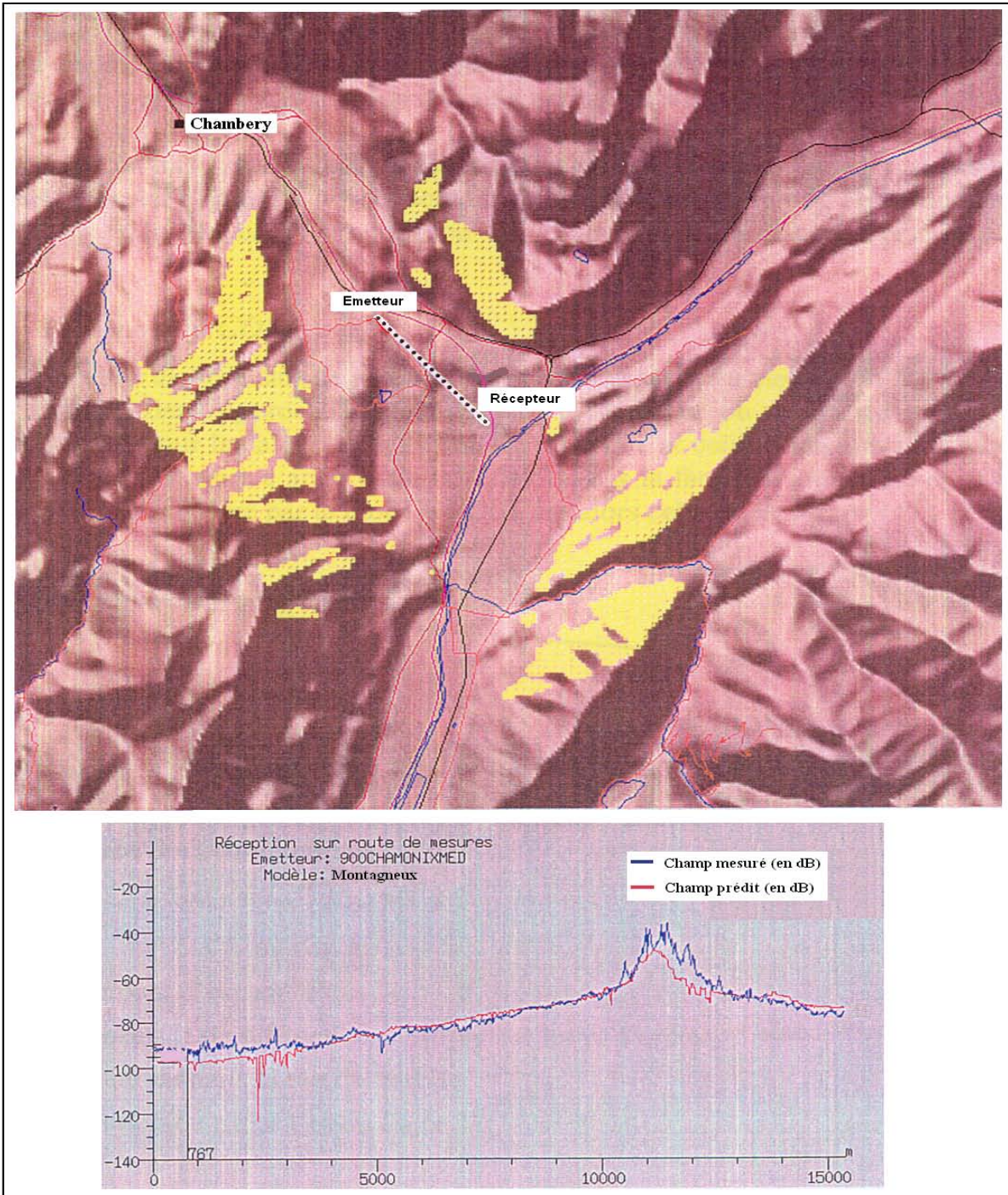
Ces réflexions sur le flanc des montagnes avoisinantes (HASHEMI, 1993a), (KIRLIN, 1994) sont non seulement influentes au niveau du calcul de la puissance reçue, mais aussi au niveau des retards des différents échos qui peuvent être très importants (jusqu'à 50 micro secondes) et donc générer de l'interférence inter-symbole très pénalisante en réception. Des égaliseurs sont utilisés pour remédier à ce problème, mais cela peut être insuffisant dans cet environnement. A titre d'exemple, l'égaliseur spécifié pour le système GSM est prévu pour fonctionner avec des retards pouvant aller jusqu'à 16 μ s, on voit donc l'écart qui existe avec les retards que l'on peut observer en milieu montagneux. C'est pourquoi les opérateurs de télécommunication doivent réaliser une ingénierie très soignée dans ces régions, en utilisant par exemple des antennes directives pour concentrer le signal émis vers les zones de couvertures et réduire les lobes dans les directions des montagnes. Les antennes peuvent être aussi inclinées dans le plan vertical (« tilt ») pour les mêmes raisons afin de couvrir les vallées tout en évitant alors d'émettre trop de signal vers le sommet des montagnes.

Pour ce qui est du calcul de la puissance du signal reçu, il faut tout d'abord déterminer les zones de réflexion. Des algorithmes existent pour délimiter ces zones de réflexions (en jaune sur la figure 88). Puis on va calculer la puissance des trajets réfléchis et ajouter cela au calcul du trajet direct émetteur-récepteur.

L'identification des zones de réflexion induit des algorithmes de calcul de l'affaiblissement radio plus complexes et des temps de calcul plus longs. Différentes méthodes ont été recherchées afin d'optimiser les temps de calcul nécessaires à la prévision (SIZUN, 2003) :

- La recherche des trajets réfléchis confinée dans une ellipse dont les foyers sont l'émetteur et le récepteur et dont le retard maximum autorisé Δt_{max} est égal à 25 μ s,
- La prise en compte d'une seule réflexion sur les parois en visibilité à la fois de l'émetteur et du récepteur,
- La prise en compte de la taille de la maille. Il apparaît que des mailles de 400 mètres constitue un compromis entre le temps de calcul et la précision de la prévision.
- Le regroupement des mailles sous forme de facettes afin de ne retenir qu'un seul profil entre le point de réception et le barycentre du groupe de mailles.
- Le prétraitement des données géographiques pour déterminer la visibilité entre les mailles et éviter ainsi l'extraction d'un grand nombre de profils.

Les résultats obtenus avec une telle approche sont très convenables comparés aux modèles classiques. L'écart-type entre les affaiblissements mesurés et les affaiblissements prédits est de l'ordre de 6,4 dB. L'amélioration des performances apportée par ce modèle montagneux par rapport au modèle macro cellulaire classique est importante, non seulement en haute montagne (Alpes, Pyrénées) mais aussi en zone de moyenne montagne (Vosges) (BOURDEILLES, 1997).



Sources : FTR&D, 2002.

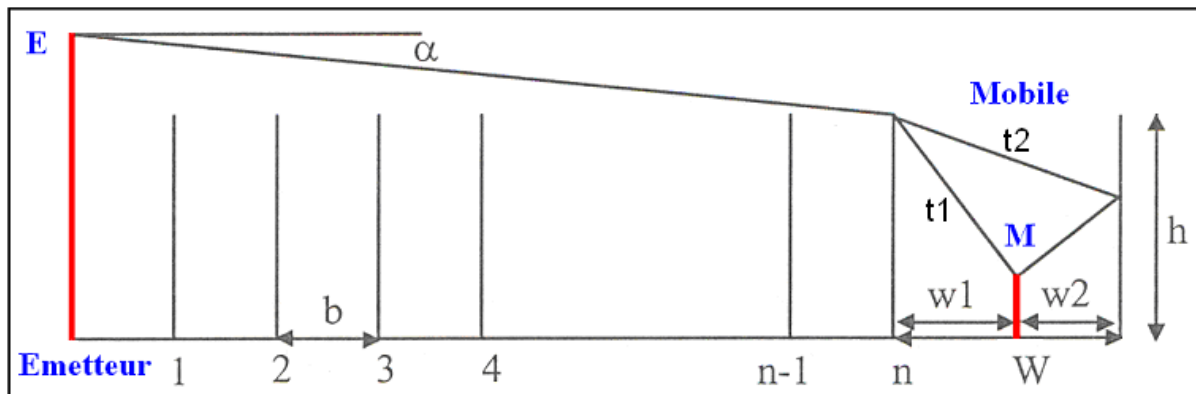
Figure 88 : Comparaison entre mesure et prédiction avec un modèle de propagation d'ondes radio macro cellulaire qui calcule les réflexions sur les flancs des montagnes - Zone géographique : Chamonix, Savoie

4.3 - Les modèles pour les petites cellules

4.3.1 – Le modèle COST-CNET

L'amélioration des modèles de propagation purement statistiques pour les petites cellules en milieu périurbain et urbain est obtenue par l'intégration du mode profil et de différents algorithmes de diffraction multiple sur une succession d'arêtes.

Le modèle COST-CNET est un modèle semi empirique en 2D qui a été développé pour modéliser le signal radio pour les petites cellules (méso cellules) d'un réseau radiomobile. Il convient plus particulièrement à l'ingénierie du GSM à 900 MHz et du DECT¹⁵⁶ à 1800 MHz, avec une émission de 5 à 15 mètres au-dessus des toits. Il a été élaboré par FTR&D (anciennement CNET : Centre National d'Etude des Télécommunications) dans le cadre du programme européen COST 231. Il correspond en fait à la synthèse de deux approches célèbres dans la modélisation radio en milieu urbain, celle de Walfisch-Bertoni pour le calcul de la diffraction multiple (WALFISH, 1988), et celle d'Ikegami pour le calcul de la diffraction sur la dernière arête et la réflexion sur la façade de l'immeuble situé en face dans la rue où est localisé le mobile (IKEGAMI, 1984).



Sources : CNET, 1996.

Figure 89 : Profil E-R considéré par le modèle COST-CNET

Avec :

h : hauteur des bâtiments,

b : distance entre les bâtiments,

W : largeur de la rue dans laquelle est localisé le mobile,

$w1$: distance entre le mobile et le bâtiment sur lequel l'onde radio est diffractée,

$w2$: distance entre le mobile et le bâtiment sur lequel l'onde radio est réfléchi,

n : arêtes des bâtiments (façades, coins de bâtiment),

$t1$: trajet de l'onde diffractée par la dernière arête au niveau du toit,

$t2$: trajet de l'onde réfléchi sur la façade de l'immeuble opposé,

α : angle formé entre l'horizontale et la direction de propagation de l'onde radio émise depuis l'émetteur,

M : le mobile,

E : l'émetteur.

¹⁵⁶ DECT : Digital European Cordless Telephone. Norme européenne de téléphone sans fil, sur la bande 1880-1900 MHz. Numérique et utilisant la compression, elle est de meilleure qualité que les systèmes analogiques précédents, et assure en plus la confidentialité des communications car les canaux ne se recouvrent plus.

Le profil considéré comme idéal par le modèle COST-CNET suppose que tous les bâtiments sont de la même hauteur h et sont espacés de la même distance b . Dans la rue où est localisé le mobile, rue de largeur W , on suppose que l'on reçoit le trajet diffracté seul (trajet 1) ainsi que la composante réfléchie sur la façade de l'immeuble opposé (trajet 2). Les formules de calcul permettent alors de calculer l'affaiblissement total de la liaison qui est en fait la somme de 3 composantes :

$$L_{total} = L_0 + L_{msd} + L_{rts} + L_{deg} \quad (11)$$

Avec:

L_{total} : affaiblissement total,

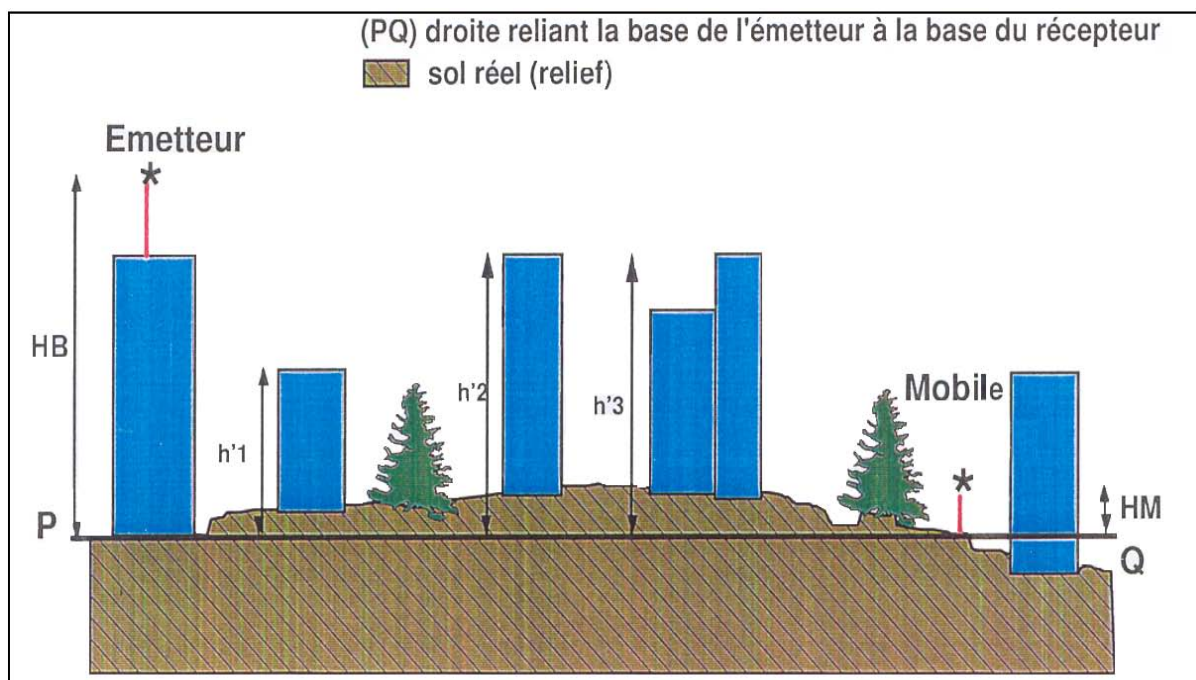
L_0 : affaiblissement d'espace libre,

L_{msd} : affaiblissement de diffraction multiple sur les $n-1$ arêtes,

L_{rts} : affaiblissement dans la rue du mobile (superposition du trajet 1 et du trajet 2),

L_{deg} : affaiblissement lié à la diffraction sur l'arête principale.

Le problème principal du modèle COST-CNET est bien entendu de savoir comment passer d'un environnement réel (le profil réel : figure 90), tel qu'il est extrait des bases de données géographiques vectorielles (contours de bases des bâtiments : BD Topo© de l'IGN) et d'un MNT au pas de 25 mètres, au profil idéalisé (figure 89) d'où sont extraits les paramètres nécessaires pour le calcul de l'affaiblissement radioélectrique par le modèle COST-CNET. De ce profil théorique (figure 89) sont alors extraites les variables morphologiques (largeur moyenne des rues, largeur de la rue où se trouve le mobile, hauteur des bâtiments, etc.) mais aussi des variables qualitatives (récepteur en visibilité ou non de l'émetteur, présence de végétation, zone de bâti dense, zone pavillonnaire, etc.) caractéristiques du milieu géographique en présence.



Sources : FTR&D, 2000.

Figure 90 : Exemple de profil E-R réel rencontré sur le terrain

Avec :

- * : position du mobile
- HB : hauteur de la station de base,
- HM : hauteur du mobile,
- PQ : distance euclidienne entre l'émetteur et le récepteur,
- h'1, h'2, h'3 : hauteur des bâtiments.

De plus, le domaine de validité de ce modèle est très strict et il doit être également corrigé à partir des mesures par régression linéaire sur un certain nombre de variables pour améliorer la prédiction. Afin d'adapter le modèle à des configurations réelles et d'améliorer ses performances, il est en fait construit de manière semi statistique, l'affaiblissement total prédit par le modèle COST-CNET s'exprimant alors sous la forme mathématique suivante :

$$AFF = L_0 + \alpha L_{msd} + \beta L_{rts} + \gamma L_{deg} + \sum c_i P_i \quad (12)$$

Où les P_i désignent les différentes variables géométriques utilisées et où les coefficients α, β, γ et c_i sont les coefficients obtenus par simple régression linéaire sur un ensemble de mesures donné.

Au niveau des performances, les algorithmes développés pour calculer le profil idéal à partir des données vectorielles et des corrections statistiques effectuées à partir d'un grand nombre de mesures en urbain permettent d'obtenir un modèle centré avec un écart-type de l'ordre de 6 dB.

4.3.2 – Le modèle de LEE

Le modèle de Lee (LEE, 1982) est basé sur des mesures réalisées dans différents environnements (espace libre, espace ouvert, périurbain, urbain) ainsi que sur le calcul de la hauteur effective de l'antenne d'émission. L'affaiblissement total est donné par la relation suivante :

$$L = 10n \log_{10} d - 20 \log_{10} h_b(\text{eff}) - P_0 - 10 \log h_m + 29 \quad (13)$$

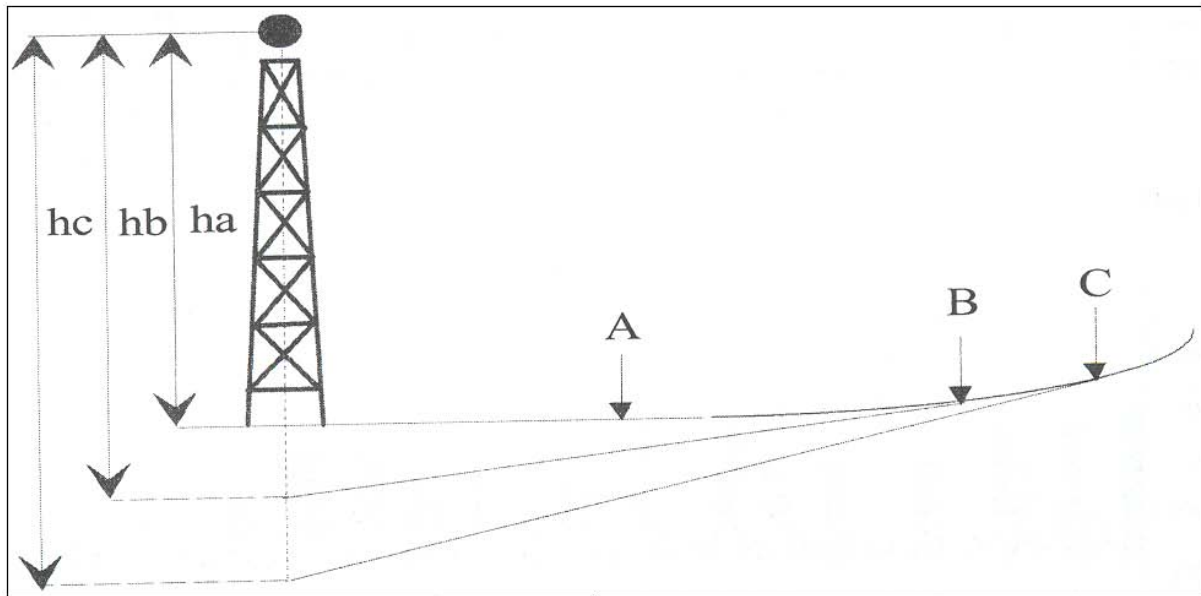
Avec :

- L : affaiblissement total
- d : longueur de la liaison (en kilomètres),
- n et P_0 : paramètres déduits à partir de mesures faites sur le terrain (figure 47) et dont la valeur est fonction du milieu géographique,
- h_m : hauteur du mobile,
- $h_b(\text{eff})$: hauteur effective (figure 92) de l'antenne d'émission.

Environnement	n	P_0
Espace libre	2	- 45
Espace ouvert	4,35	- 49
Suburbain	3,84	- 61,7
Urbain : Philadelphie	3,68	- 70
Newark	4,31	- 64
Tokyo	3,05	- 84
New York City	4,08	- 77

Sources : H. Sizun, 2003.

Figure 91 : Paramètres du modèle de Lee



Sources : H. Sizun, 2003.

Figure 92 : Détermination des différentes hauteurs équivalentes de l'antenne d'émission

La hauteur effective de l'antenne d'émission est déterminée en projetant la pente du terrain au voisinage du mobile sur l'emplacement où est localisé la station de base supportant l'émetteur. La figure 92 schématise la variation de la hauteur effective de l'antenne d'émission (h_a , h_b , h_c) pour différentes positions du mobile en fonction de la pente du terrain (avec A, B, C : pente du terrain plus 1.5 mètres, correspondant à la position du mobile).

4.4 – Les modèles micro cellulaires

4.4.1 – Introduction

Pour à la fois répondre à la forte demande en télécommunications mobiles en milieu urbain dense et améliorer les conditions de propagation dans cet environnement, les opérateurs réduisent de plus en plus la taille des cellules pour avoir des couvertures radio ne dépassant pas quelques centaines de mètres, ce qui leur permet d'augmenter le trafic. Ceci est rendu possible grâce à la multiplication du nombre de stations de base. De plus, les opérateurs placent les antennes sous les toits des bâtiments ce qui permet de bénéficier de la canalisation du signal dans les rues. C'est ce que l'on appelle une configuration micro cellulaire, qui est mise en oeuvre dans les grandes villes.

Les phénomènes de propagation à prendre en compte sont ici radicalement différents de ceux que l'on a vu précédemment puisque le signal se propage essentiellement dans les rues et il faut donc étudier les réflexions sur les façades et la diffraction sur les coins des bâtiments plutôt que la diffraction sur le haut des immeubles. On voit ainsi que dans le cas des micro cellules, on travaille en plus dans le plan horizontal alors qu'auparavant, tous les modèles travaillaient uniquement dans le plan vertical avec la coupe du terrain entre l'émetteur et le récepteur.

La modélisation micro cellulaire repose sur une double approche liée aux faibles distances considérées (quelques centaines de mètres) : un calcul en visibilité (LOS) et un calcul en non visibilité (NLOS). En effet, l'émetteur étant situé dans la rue au-dessous du niveau des toits, il

s'agit principalement d'une propagation « guidée » le long des rues : soit dans la rue où se trouve l'émetteur (LOS), soit dans les rues adjacentes après le passage d'au moins un coin (NLOS). Ces deux types de calculs sont utilisés dans la plupart des modèles micro cellulaires analytiques 2D (calcul sur le profil), notamment le modèle à double pente (XIA, 1993).

4.4.2 – Le modèle micro cellulaire - CNET

Le modèle micro cellulaire - CNET a été développé par France Télécom R&D. Il traite de la propagation des ondes radioélectriques en milieu urbain dense. Deux manières de calculer l'affaiblissement radio sont implémentées dans le modèle micro cellulaire – CNET : un calcul d'affaiblissement dans le plan horizontal pour les cas où la propagation le long des rues est le phénomène prépondérant (WIART, 1993) et un calcul sur profil dans le plan vertical contenant l'émetteur et le récepteur pour les cas de visibilité (LOS) ou de non-visibilité (NLOS) mais où la propagation par-dessus les toits devient prépondérante (longues distances, présence de zones boisées, etc.).

Le modèle micro cellulaire - CNET implémente donc ces deux méthodes de calcul : le long des rues et sur le profil vertical.

4.4.2.1 – Calcul de l'affaiblissement dans le plan horizontal : le graphe des rues

A partir du graphe des rues, des algorithmes (WIART, 1993) sont implémentés pour calculer l'affaiblissement de la liaison en tenant compte du guidage des ondes électromagnétiques par les rues : soit dans la rue de l'émetteur, on effectue dans ce cas un « calcul en visibilité » de l'émetteur (*Line Of Sight* en anglais, dit LOS), soit dans les rues adjacentes après passage d'au moins un coin, on effectue alors un « calcul en non visibilité » (*Non Line Of Sight* en anglais, dit NLOS). Le modèle calcule donc un affaiblissement de visibilité depuis l'émetteur jusqu'au premier coin de rue qui est en fait un sommet du graphe. A chaque coin, il est alors calculé un affaiblissement dû à la diffraction et un affaiblissement dû à la réflexion. L'affaiblissement total sur le graphe reçu au niveau du récepteur se calcul comme suit :

$$A_{total} = A_{vis} + \min(A_{ref} + A_{dif}) \quad (14)$$

Où :

- A_{vis} est l'affaiblissement de visibilité sur la distance D entre l'émetteur et le premier coin de rue

$$A_{vis} = 32,4 + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(D) \quad (15)$$

- A_{ref} est l'affaiblissement dû à la réflexion (WIART, 1993)

$$A_{ref} = 32,4 + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(D+X) + SX \quad (16)$$

$$\text{Avec } S = (D/W1.W2) \cdot f(\alpha) \quad (17)$$

X : la distance du récepteur au coin de la rue,

$f(\alpha)$: une fonction de l'angle α entre l'axe des rues.

- A_{dif} est l'affaiblissement dû à la diffraction (WIART, 1993)

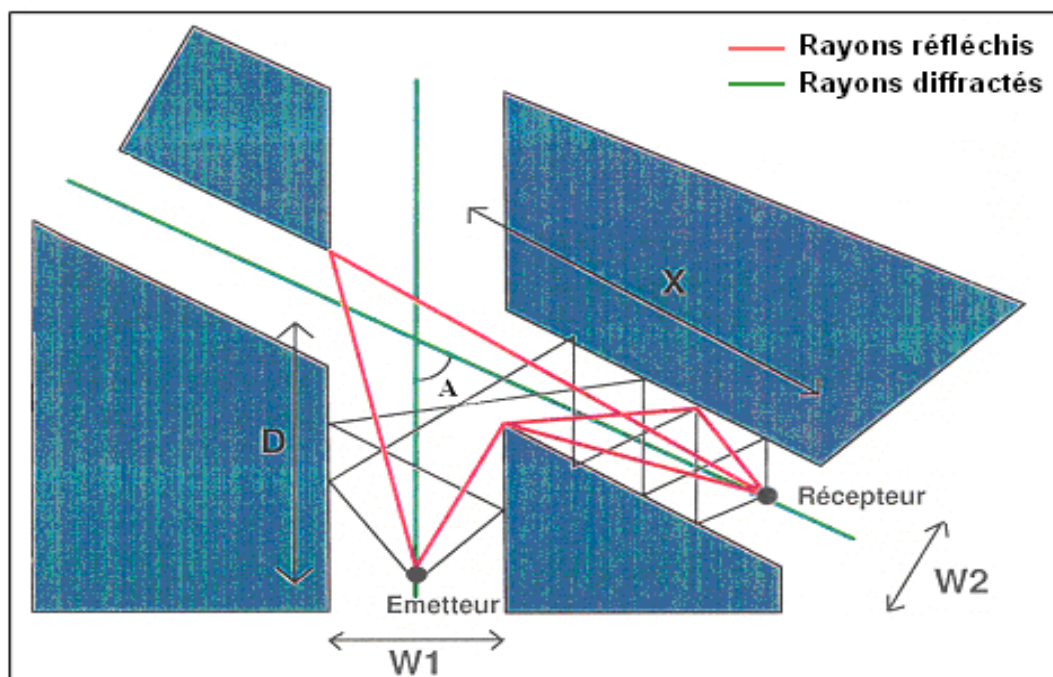
$$A_{dif} = 32,4 + 20\log_{10}(f) + 20(1/2)\log_{10}(X(X+D)D) + 2D_a \quad (18)$$

Où :

$$D_a = (45/2\pi)\alpha \tan(X/W2) - 23/\pi.(\alpha-\pi/2) \quad (19)$$

Ce procédé de calcul de l'affaiblissement peut s'étendre de manière récurrente lors du passage de plusieurs coins de rues successifs (le coin n-1 jouera dans le cas le rôle de l'émetteur et le coin n+1 celui du récepteur).

Pour déterminer l'affaiblissement total de la liaison entre l'émetteur et le récepteur, le modèle micro cellulaire - CNET recherchera tous les chemins possibles entre le point d'émission (le récepteur) et le point de réception (le récepteur mobile).



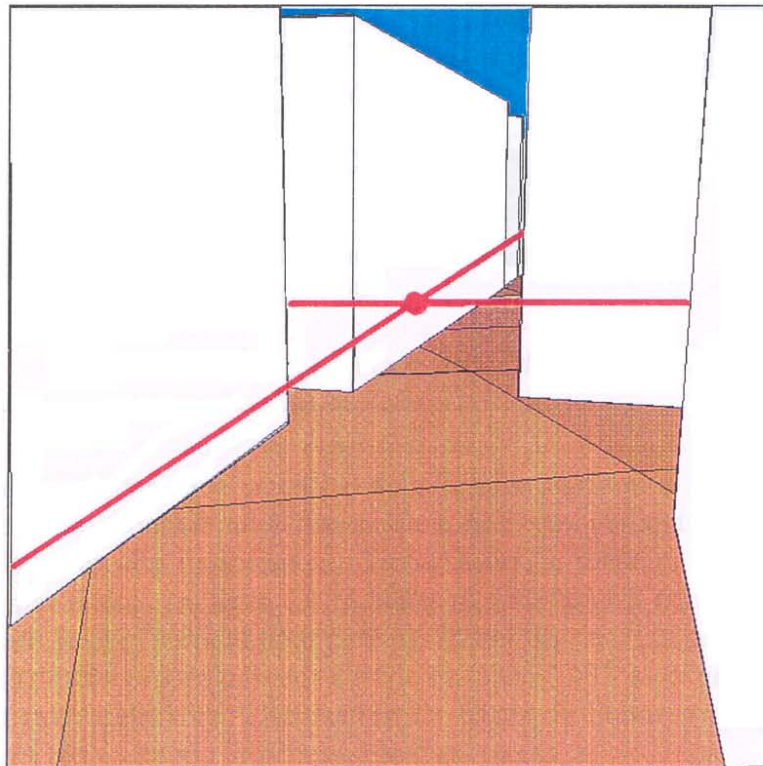
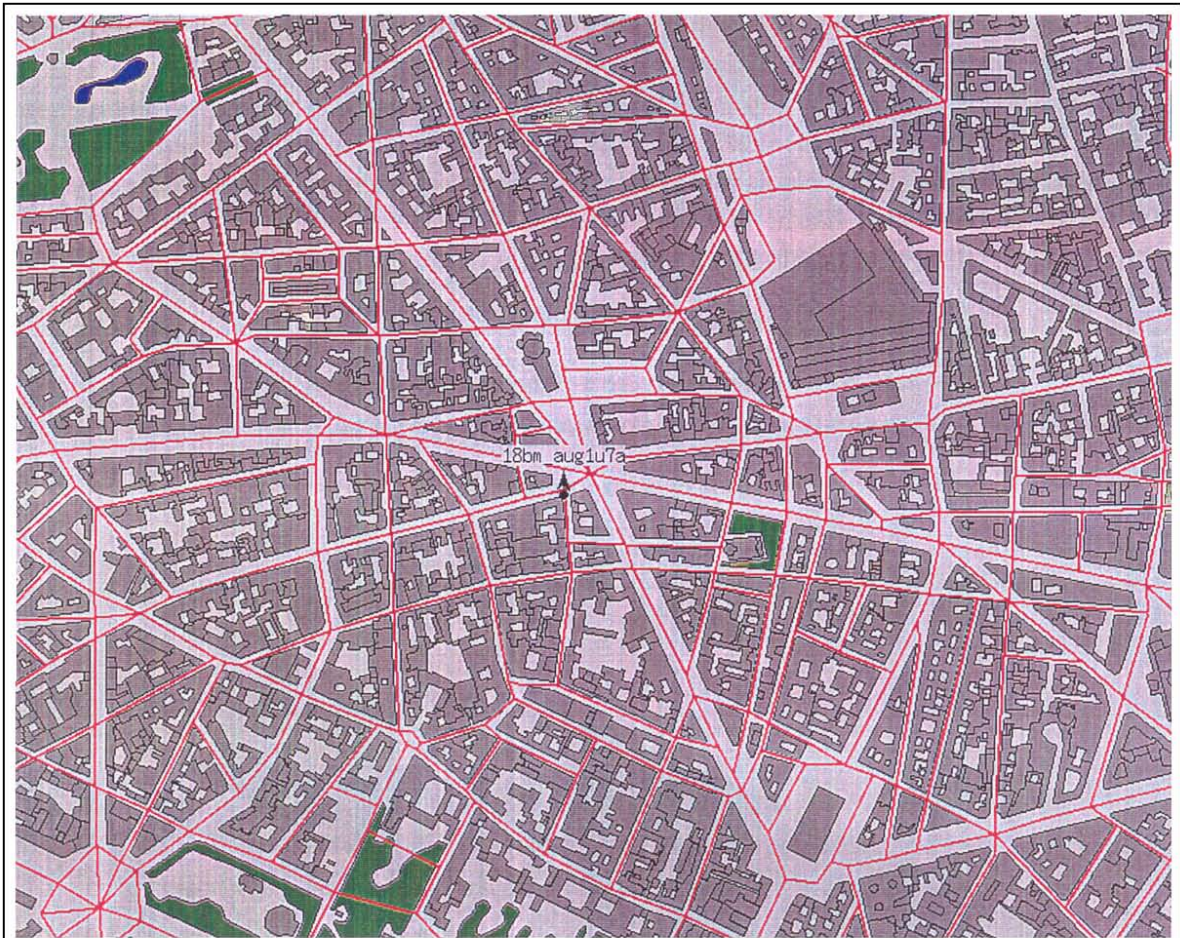
Sources : FTR&D, 2001.

Figure 93 : Schématisation du calcul de l'affaiblissement dans le plan horizontal avec le modèle micro cellulaire - CNET

Avec :

- D : distance entre l'émetteur et le premier coin de la rue,
- X : distance entre le récepteur et le premier coin de la rue,
- W1 : largeur de la rue dans laquelle est situé l'émetteur,
- W2 : largeur de la rue dans laquelle est situé le récepteur mobile,
- A : angle que font les deux rues (l'axe des rues).

Du point de vue des données géographiques nécessaires, pour le calcul le long de la rue (figure 93), seuls les contours de bâtiments seront utilisés. Les données géographiques comportant la hauteur du bâti seront utilisées pour le calcul de l'affaiblissement sur le profil vertical (figure 94). De plus, pour le calcul le long des rues, certains modèles ne travaillent qu'à partir d'un graphe qui représente en fait les directions des rues où s'effectue le trajet du signal dans cet environnement. On utilise donc un graphe des rues et des places en 2D (figure 92).



Sources : FTR&D, 2001.

Figure 94 : Visualisation en 2D et en 2,5D du graphe des rues pour un modèle micro cellulaire

4.4.2.2 – Calcul de l’affaiblissement dans le plan vertical : la coupe de profil du sol et du sursol

Il faut noter que le calcul de l’affaiblissement dans le plan horizontal peut être non applicable dans certains cas correspondant à un environnement non typique micro cellulaire (grandes places, squares, distances plus importantes...) et qu’alors, la majeure partie du signal provient de la propagation par dessus les toits. Le modèle micro cellulaire doit alors utiliser un calcul de l’affaiblissement radio sur profil dans le plan vertical pour pouvoir traiter ces cas. Les algorithmes sont du type de ceux qui ont été décrits précédemment avec le modèle COST-CNET avec adaptation des formules à l’environnement micro cellulaire. L’utilisation de bases de données géographiques de type vectorielles comportant la hauteur du sursol (bâti, végétation, etc.) est bien entendu indispensable dans ce cas.

4.4.2.2.1 – Calcul en visibilité (LOS)

Le calcul en visibilité est du type suivant :

$$\text{AffVis} = \alpha - \beta * \log_{10}(F) - \gamma * \log_{10}(D) - \delta * \sqrt{D} \quad (20)$$

Avec :

F : la fréquence d’émission,

D : la distance émetteur – récepteur.

4.4.2.2.2 – Calcul en non visibilité (NLOS)

Lorsqu’il s’agit de prédire un affaiblissement dans un environnement spécifique non typiquement micro cellulaire (grandes distances, grandes places, présence de bois...), il est nécessaire d’introduire un calcul selon un profil qui prend le relais d’un calcul le long d’un graphe devenant trop irréaliste et erroné. Il ne doit cependant pas se substituer à ce dernier en environnements typiquement micro cellulaire.

Le principe repose sur le fait que l’onde qui se propage par-dessus les toits ou à travers les arbres est ou devient prépondérante à celle qui se propage le long des rues.

Deux problèmes se présentent alors :

- l’interprétation d’un profil réel pour se ramener à un calcul de diffraction multiple au-dessus des toits et de diffraction et réflexion au niveau du mobile et de l’émetteur de type Walfisch-Bertoni-Ikegami.

- l’adaptation des formules théoriques habituellement utilisées en petites cellules dans un environnement micro cellulaire.

Afin d'adapter le modèle à des configurations réelles et pour améliorer ses performances, il est en fait construit de manière semi statistique, l'affaiblissement total (L_o) s'exprimant sous la forme :

$$L_o = L_d + \alpha L_{msd} + \beta L_{rtse} + \gamma L_{rtsm} + \delta A_{deg} + \sum \alpha_i P_i \quad (21)$$

Avec :

L_o : affaiblissement total,

L_d : affaiblissement lié à la distance,

L_{msd} : affaiblissement de diffraction analogue à celui du modèle COST-CNET,

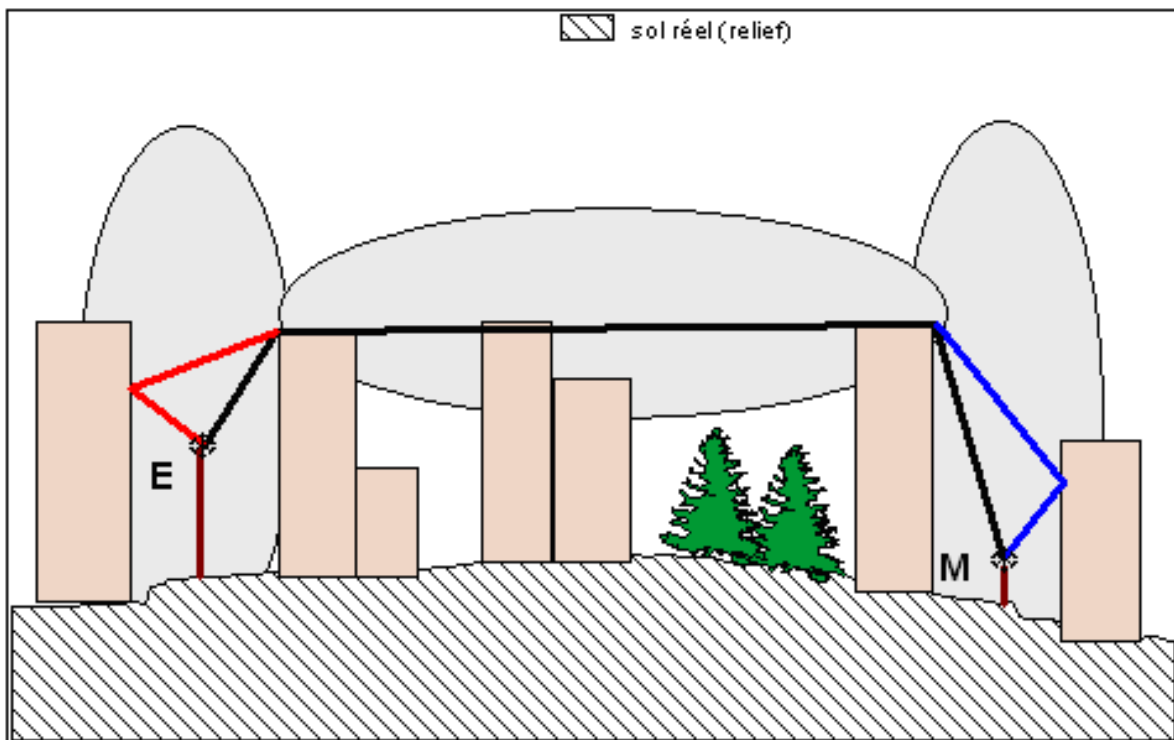
L_{rtse} : affaiblissement de diffraction et de réflexion au niveau de l'émetteur,

L_{rtsm} : affaiblissement de diffraction et de réflexion au niveau du récepteur,

A_{deg} : affaiblissement de diffraction sur le MNT de type Deygout,

P_i : un ensemble de variables géométriques, notamment celles liées à la surface de végétation traversée par les ondes radio,

Les coefficients α , β , γ , δ et α_i sont obtenus par simple régression linéaire sur un ensemble de mesures données.



Sources : M. Meyer, FTR&D, 2001.

Figure 95 : Profil pour un modèle micro cellulaire

4.5 – Les modèles urbains à lancer de rayons

4.5.1 – Introduction : modélisation par la technique du lancer de rayons

Ce type de modèle permet de calculer de façon plus déterministe l'affaiblissement de propagation en milieu urbain en lançant des rayons dans toutes les directions et en suivant leurs parcours. Pour cela, on fixe le nombre maximal de réflexions et de diffractions qui doit être considéré et on ne garde que les rayons qui atteignent le récepteur en ayant un nombre de réflexions et diffractions inférieures à ce seuil.

Le modèle utilise des données géographiques au format vectoriel, en l'occurrence la BD Topo de l'Institut Géographique National. On doit également disposer d'un certain nombre de paramètres géographiques et architecturaux pour effectuer les calculs (types de matériau, rugosité pour la diffusion des ondes...) qui sont plus laborieux à obtenir car plus coûteux et pas toujours disponibles directement (seulement sur commande) auprès des fournisseurs de Bases de Données Géographiques (IGN, ISTAR, etc.), et on utilise alors des valeurs moyennes.

Les algorithmes de calcul sont en général basés sur la Théorie Géométrique de Diffraction¹⁵⁷, ainsi que son évolution : la Théorie Uniforme de la Diffraction¹⁵⁸, qui permet de représenter le phénomène prédominant de propagation en non-visibilité, qui est en l'occurrence la diffraction, sous forme de rayons.

La technique du lancer de rayons est une technique déterministe très efficace. Elle est particulièrement bien adaptée aux calculs d'affaiblissement radio en environnement urbain dense. C'est pourquoi, depuis une quinzaine d'années, on voit apparaître de nombreux modèles de propagation d'ondes radio basés sur la méthode du lancer de rayons (ROSSI, 1991), (KURNER, 1993), (LIANG, 1998).

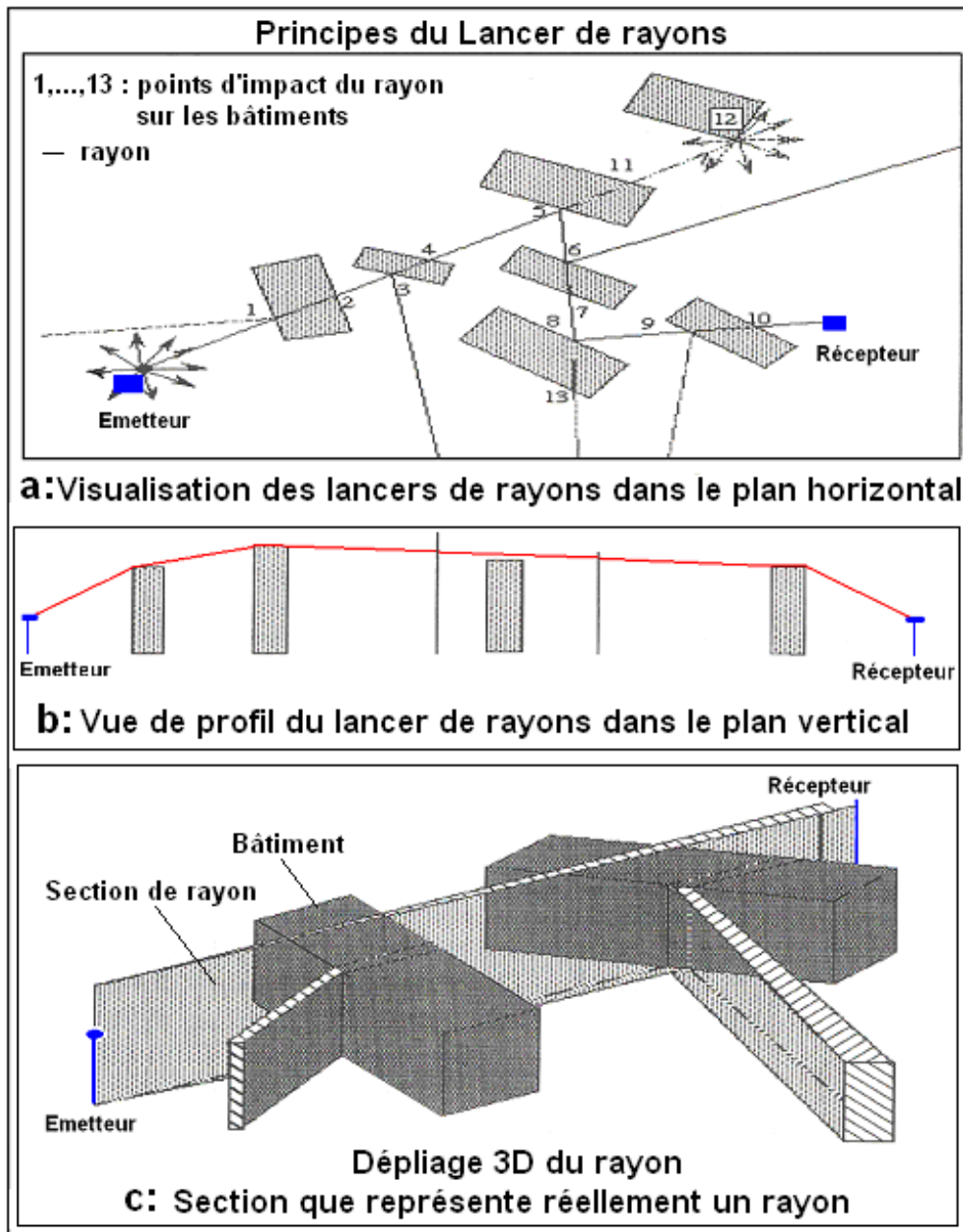
4.5.2 – Le modèle RAYON-CNET

Le modèle RAYON-CNET est un modèle basé sur une technique de lancer de rayons qui a été développé à France Télécom R&D en 1991 (ROSSI, 1991).

L'algorithme de calcul du modèle RAYON est conçu pour effectuer une recherche systématique des trajets reliant l'émetteur au récepteur, et faisant intervenir dans le calcul de l'affaiblissement une combinaison de phénomènes physiques intervenant dans la propagation des ondes tout le long du trajet émetteur-récepteur : réflexions, diffractions horizontales et verticales, pénétration et traversée de végétation. Tous ces phénomènes physiques sont déduits uniquement de leurs valeurs théoriques données par la Théorie Uniforme de la Diffraction pour les phénomènes de diffractions et par les formules de Fresnel (FRESNEL, 1818) et Beckmann (BECKMANN, 1963) pour les phénomènes de réflexions.

¹⁵⁷ La Théorie Géométrique de la Diffraction, TGD, due à J. B. Keller (KELLER, 1962) est une généralisation de la méthode de l'optique géométrique qui rend compte des phénomènes de diffraction grâce à l'introduction d'une nouvelle catégorie de rayons, les rayons diffractés, le long desquels elle permet de calculer le champ diffracté.

¹⁵⁸ La Théorie Uniforme de la Diffraction, TUD, a été développée par Kouyoumjian et Pathak (KOUYOUMJIAN, 1974), afin de palier au défaut de discontinuité du champ radio pour ses conditions aux limites (le champ radio total est alors infini, dans le cas de la TGD). Ils ont développé une théorie permettant de calculer un champ uniforme dans tout l'espace : la Théorie Uniforme de la Diffraction.



Sources : J.P. Rossi, CNET, 1991.

Figure 96 : Principes du lancer de rayons mis en œuvre dans le modèle RAYON-CNET

Le principe de la méthode du lancer de rayons est de lancer à partir de l'émetteur, dans toutes les directions (360 degrés), un ensemble de lignes directrices. Chaque rayon représente alors la partie de l'onde électromagnétique comprise dans un cône (figure 96 C) autour de cette ligne directrice. Pour des raisons de gain de temps de calcul, certaines hypothèses ont été développées afin d'optimiser les calculs (gestion du temps de calcul machine, mémoire vive allouée, machine virtuelle). Certaines hypothèses ont permis de simplifier la géométrie du problème. La figure 96 décrit la démarche effective suivie (ROSSI, 1991), (ROSSI, 1992).

4.5.2.1 - Algorithme de calcul du lancer de rayon dans le plan horizontal

Dans un premier temps, seul le plan horizontal (figure 96 a) est pris en compte dans le calcul : l'émetteur ainsi que les obstacles (bâti, végétation, etc.) sont représentés par leur projection dans le plan horizontal. Les rayons sont alors lancés, à partir de l'émetteur E, à intervalles angulaires réguliers, dans le plan horizontal (figure 96 a). Quand un rayon rencontre une limite de bâtiment (point 1 sur la figure 96 a), il a la possibilité soit de passer par-dessus, soit d'être réfléchi. Les deux cas sont explorés en créant, à partir de ce point, deux segments de rayon : l'un poursuit son chemin en ligne droite, l'autre est orienté dans la direction de réflexion spéculaire. La même division du rayon en deux segments distincts est produite à chaque rencontre du rayon avec un obstacle, et ceci jusqu'à ce que le rayon soit trop affaibli ou sorte de la zone géographique prise en compte dans le calcul.

4.5.2.2 - Algorithme de calcul du lancer de rayon dans le plan vertical

Quand le rayon rencontre le récepteur R, la troisième dimension (Z) est alors prise en compte, en dépliant le rayon suivant ses coordonnées curvilignes dans le plan vertical (figure 96 b). On obtient ainsi une coupe de profil des obstacles (bâti, bois, etc.). Les immeubles, sur lesquels les rayons se réfléchissent, sont représentés en coupe verticale par une simple barre verticale. Le trajet du rayon correspond au plus court chemin entre l'émetteur et le mobile, qui passe au-dessus des bâtiments de diffraction.

Une fois cette coupe verticale obtenue, le calcul rigoureux de l'atténuation du signal radio le long la liaison E-R est effectué. La puissance moyenne reçue au niveau du récepteur est la résultante des puissances des chacun des rayons parvenant à ce point.

Deux problèmes se posent dans une telle approche (Sizun, 2003) : d'une part, le modèle est fortement dépendant de la qualité¹⁵⁹ de la base de données géographiques (précision des données, résolution, etc.) et les calculs (lancers de rayons) sont particulièrement sensibles aux imperfections des données géographiques ; d'autre part, le temps de calcul machine peut rapidement devenir très conséquent. C'est pourquoi des paramètres additionnels sont nécessaires pour l'ajustement et l'optimisation du modèle. Ils sont de deux types : des paramètres d'optimisation du temps de calcul machine, et des paramètres physiques.

Les principaux paramètres à considérer sont de nature géographique et physique [pourcentage des faces d'immeubles non occupés par des ouvertures (fenêtres), hauteur moyenne des rugosités des murs, perte en diffraction rasante, facteur de traversée de végétation, permittivité et conductivité des matériaux de construction, etc.].

On a également des paramètres liés aux variables prises en compte dans l'algorithme de calcul du lancer de rayons (distance maximale de parcours d'un rayon, puissance minimale d'un rayon, nombre de réflexions utilisées, nombre de diffraction autorisées, etc.).

¹⁵⁹ L'influence de la qualité et du type de données géographiques pris en compte dans un modèle de propagation d'ondes radio sera traitée en détail dans la troisième partie du mémoire.



Sources : J.P. Rossi, CNET, 1991.

Figure 97 : Lancers de rayons en environnement urbain dense avec le modèle RAYON-CNET

La figure 97 présente un exemple de calcul de l'ensemble des rayons reliant un émetteur et un récepteur, avec une puissance pouvant varier dans une gamme de 20 décibels (-121 dB à -129 dB).

Avec une telle approche basée sur le lancer de rayons, on peut calculer le niveau de champ radioélectrique moyen reçu au niveau du récepteur, mais également la réponse impulsionnelle du canal entre l'émetteur et le récepteur.

Le principal inconvénient reste le temps de calcul, qui est plus long que pour les autres types de modélisation.

4.6 – Les modèles à Tracé de Rayons

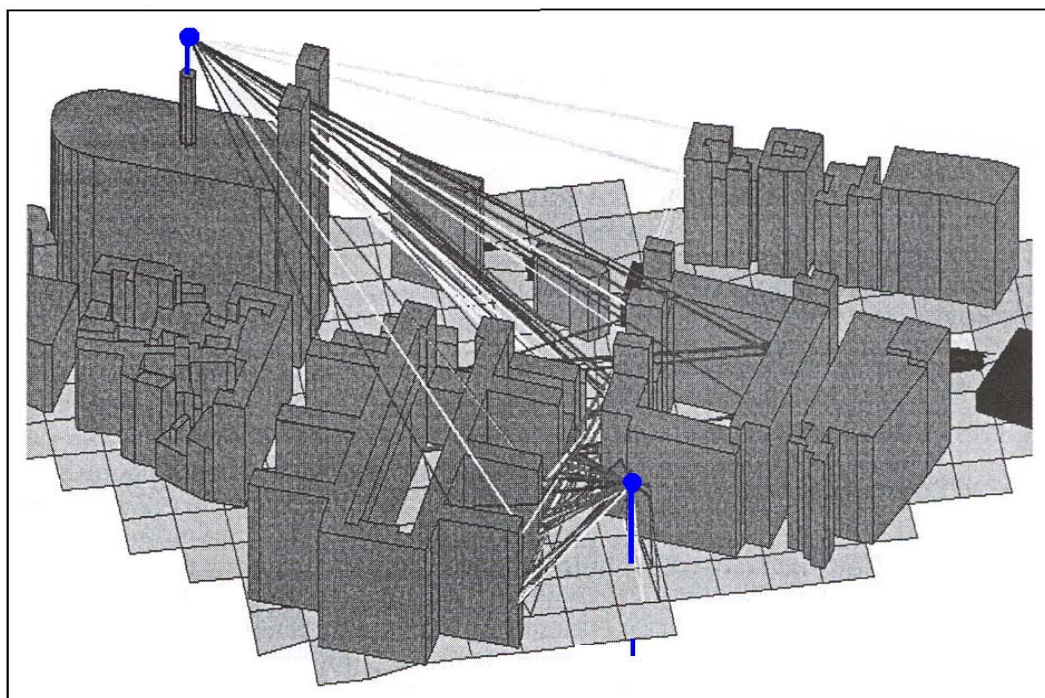
Les modèles à tracé de rayons sont des modèles déterministes. Ils correspondent à une optimisation des modèles à lancer de rayons. Ils reposent sur une connaissance précise de la réalité rencontrée sur le terrain et nécessitent de disposer de bases de données géographiques ayant une résolution élevée (métrique). Les données géographiques utilisées pour la modélisation correspondent à un Modèle Numérique de Terrain ayant une résolution élevée (25 mètres) et des données de sursol de type contours de bases des bâtiments au format vectoriel à un mètre de résolution (la BD Topo de l'IGN).

Dans une modélisation par tracé de rayon on ne va pas lancer des rayons dans toutes les directions comme c'est le cas pour les modèles à lancer de rayons. Ici seuls quelques rayons, correspondant aux directions principales de propagation des ondes, sont tracés à partir de l'émetteur. L'algorithme de calcul va prendre en compte les réflexions et les diffractions des rayons sur les façades des bâtiments situés entre l'émetteur et le récepteur. Le nombre de rayons tracés étant beaucoup moins important que dans le cas des lancers de rayons, le temps de calcul est donc beaucoup plus court.

Les modèles de propagation par tracé de rayon permettent de prédire les différents trajets de propagation des ondes pour une configuration géographique donnée. Après ajustement à la bande de fréquence considérée, ces modèles permettent également par simulation de réaliser des études paramétriques pour analyser par exemple l'influence des matériaux de construction (enduit des façades, pierre, béton, bois, métal, etc.).

Nous présentons ci-dessous les deux types d'environnements dans lesquels les modèles à tracés de rayons sont utilisés : en milieu urbain dense et en environnement intérieur des bâtiments (indoor).

Un modèle à Tracé de Rayons en environnement urbain dense, le modèle à Tracé de Rayons Outdoor - FTR&D (figure 98), a été développé en 2001 à France Télécom R&D (Chaigneaud, 2001).



Sources : L Chaigneaud, FTR&D, 2001.

Figure 98 : Modèle à Tracé de Rayons Outdoor - FTR&D en milieu urbain dense

4.7 – Modélisation pour la réception à l'intérieur des bâtiments

Une grande proportion des communications téléphoniques par l'intermédiaire du réseau radiomobile GSM ou UMTS se font lorsque les personnes sont localisées à l'intérieur de bâtiments et d'éléments construits (gare, tunnel, etc.). De ce fait, il est nécessaire d'étudier les phénomènes de pénétration des ondes radioélectriques dans les bâtiments lorsque l'émetteur se trouve à l'extérieur et le mobile dans le bâtiment, ainsi que les phénomènes de propagation dits « Indoor » (à l'intérieur des bâtiments uniquement) qui sont très particuliers et dépendent d'un grand nombre de paramètres. On doit donc développer des modèles de pénétration si on émet depuis l'extérieur, mais on rencontre aussi de plus en plus de cas où l'émetteur est à l'intérieur (grands magasins, gares, aéroports...) pour couvrir au mieux des lieux très fréquentés et il faut alors des modèles de propagation spécifiques pour l'intérieur des bâtiments.

4.7.1 – Les modèles de pénétration

L'affaiblissement de pénétration dans un bâtiment est défini comme étant la perte de puissance subie par le champ électromagnétique entre l'extérieur dans la rue et une ou plusieurs positions à l'intérieur de l'immeuble. Le champ à l'intérieur des bâtiments est influencé par différents paramètres comme la position de l'immeuble par rapport à l'émetteur et par rapport aux autres immeubles ou encore les caractéristiques architecturales de l'immeuble (matériaux de construction, agencement intérieur, taille des fenêtres, etc.). Il est clair qu'il n'est pas encore possible d'obtenir ce type de bases de données géographiques et architecturales pour tous les bâtiments d'une ville, du fait de la grande quantité d'informations à collecter sur le terrain (*Outdoor* et *Indoor*) et du coût très élevé que représenteraient de telles bases de données. Les opérateurs de télécommunication doivent donc encore se contenter actuellement d'approches assez empiriques pour l'ingénierie radiomobile. La mise au point et l'utilisation de nouvelles données géographiques (indices de forme, fractales, rugosité, etc.) utilisables en modélisation radiomobile peut donc être proposée.

Un modèle de pénétration doit tenir compte d'un certain nombre de paramètres qui peuvent être extraits des bases de données géographiques disponibles auprès des fournisseurs tels que l'IGN, ou alors fixés empiriquement par l'opérateur de télécommunication suivant le cas qu'il veut traiter. Ces paramètres sont en général les suivants :

- l'environnement géographique proche : Les images satellites et photographies aériennes en milieu urbain permettent d'extraire quelques grands ensembles morphologiques (WEBER, 2002) comme par exemple les quartiers avec de grandes tours plus ou moins dégagées les unes des autres, ou bien les quartiers résidentiels d'immeubles anciens de taille moyenne, ou bien encore des éléments marquant du paysage urbain comme la Zone Morphologique Urbaine, ZMU, qui correspond à la limite bâtie de la ville.

- la profondeur de réception dans les bâtiments : Le champ radioélectrique reçu par le mobile diminue lorsque le mobile se déplace de la façade vers le fond d'une pièce à l'intérieur du bâtiment. Donc plus le mobile est proche des murs extérieurs, meilleure sera la qualité de la transmission du signal radio. De plus, l'effet des inhomogénéités de la façade (présence de balcons, d'ornements en pierres de taille, etc.) décroît lorsque l'on se rapproche du fond de la

pièce. Au fond du bâtiment l'affaiblissement du signal est plus important mais aussi beaucoup plus homogène.

Il est important de noter que les ondes pénètrent plus facilement dans un bâtiment par les parties vitrées que par les murs en brique ou en béton (figure 99), et par conséquent certains trajets sont plus ou moins affaiblis, voir carrément occultés dans certains cas (murs très épais en pierres de taille par exemple). Les façades vitrées présentent en général un affaiblissement de pénétration de 6 décibels de moins qu'une façade non vitrée (RAPPAPORT, 1994).

- la proportion de surface vitrée.

- le type de matériau traversé (figure 99) : Ceci concerne les matériaux traversés par les ondes radio pour parvenir jusqu'au mobile, en l'occurrence les façades (murs extérieurs du bâtiment) ainsi que les murs intérieurs (cloisons fines, murs porteurs). Les traversées de matériaux provoquent un affaiblissement des ondes électromagnétiques, de l'ordre de 4 décibels pour le bois jusqu'à 10 décibels pour le béton (COST 231, 1999). De plus l'épaisseur des matériaux a également un impact important sur l'atténuation du signal : plus le matériel est épais plus l'affaiblissement radio sera important. Par exemple pour le béton, un mur composé d'une épaisseur de 25 centimètres de béton provoquera une atténuation du signal de 13 décibels, alors qu'une dalle de béton (plafond, sol) provoquera une atténuation du signal de 23 décibels, ce qui est énorme.

- l'angle d'incidence : Il agit sur les coefficients de réflexion et de transmission à travers une surface.

- la hauteur de réception plus communément appelée « effet d'étage » : Plus le mobile est localisé en hauteur, meilleure est la réception du signal radio. Donc l'affaiblissement radioélectrique de pénétration dans le bâtiment diminue quand on monte dans les étages supérieurs. L'affaiblissement de pénétration dans un bâtiment par rapport au champ radio extérieur est donc calculé pour le rez-de-chaussée. En petite cellule, le gain de puissance observé est généralement de l'ordre de 2 à 3 dB par étage à 900 et 1800 MHz. Cependant la forte diversité des situations (agencement des pièces, type de mobilier, taille des vitres, matériaux des murs intérieurs, etc.) provoque une dispersion des gains par étages ; des valeurs de l'ordre de 4 à 7 dB ont été mesurées en pratique (GAHLEITNER, 1994). Les étages situés dans la partie supérieure de l'immeuble bénéficient en outre d'un éclairage (visibilité par rapport à l'émetteur) beaucoup plus important, parfois même direct. Les étages situés dans la partie inférieure des immeubles sont éclairés par des ondes radio ayant subi de nombreuses réflexions et diffractions sur les toits et dans la rue. Les paramètres géographiques et architecturaux ainsi que les phénomènes physiques à prendre en compte dans les modèles de pénétration sont donc variés (RAPPAPORT, 1994) et (WALKER, 1983).

- la hauteur de l'antenne d'émission,

- la fréquence,

- la distance entre l'émetteur et le récepteur, dans le cas où le bâtiment, dans lequel est localisé le mobile, est en visibilité optique de l'antenne émettrice. Dans ce cas, on applique la loi de propagation des ondes radio en espace libre pour le calcul de l'affaiblissement de pénétration.

Différentes techniques de mesures ont été utilisées afin de caractériser l'affaiblissement radioélectrique de pénétration dans les bâtiments dû aux différents composants d'un bâtiment. On peut notamment citer la méthode mise au point avec deux chambres réverbérantes (FOULONNEAU, 1996).

On peut retenir que l'affaiblissement de pénétration diminue quand on monte dans les étages, diminue aussi si la façade contient beaucoup de surfaces vitrées, augmente quand l'angle d'incidence du trajet par rapport à la normale à la façade augmente. Par contre contrairement à ce qui est souvent dit, il n'y a pas de règle évidente en fonction de la fréquence : dans certains cas, il y a des pertes plus importantes de pénétration à 900 MHz, dans d'autres cas c'est à 1800 MHz. Un modèle doit donc rendre compte de l'influence de tous ces paramètres.

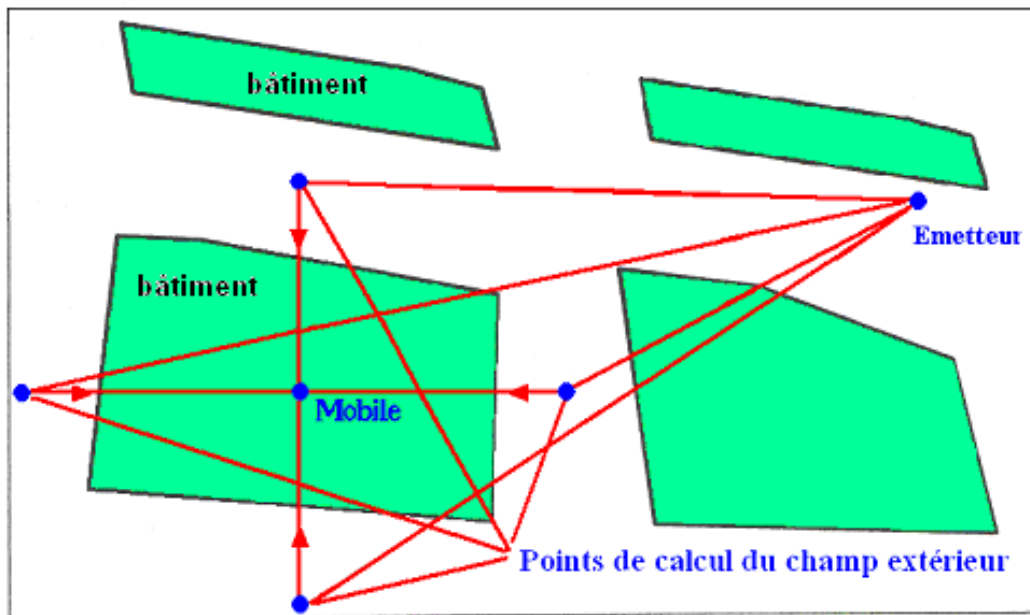
Murs intérieurs		Murs extérieurs	
Matériau	Pertes (dB)	Matériau	Pertes (dB)
plaqu-plâtre	1,5	béton poreux	6,5
bois	1,5	vitre renforcée	8,0
vitre	2,0	béton (30 cm)	9,5
mur très peu épais (brique < 14cm)	2,5	mur composé de béton épais (25 cm) avec de grandes vitres	11,0
brique	2,5	mur composé de béton épais (25 cm) sans vitres	13,0
mur de béton peu épais (béton < 10 cm)	6,0	Mur épais (> 20cm)	15,0
mur de béton double épaisseur (2 x 20 cm)	17,0		
dalle	23,0		

Sources : COST 231, 1999.

Figure 99 : Pertes moyennes mesurées au niveau du signal radioélectrique par transmission pour différents matériaux de construction dans la bande des 1-2 GHz.

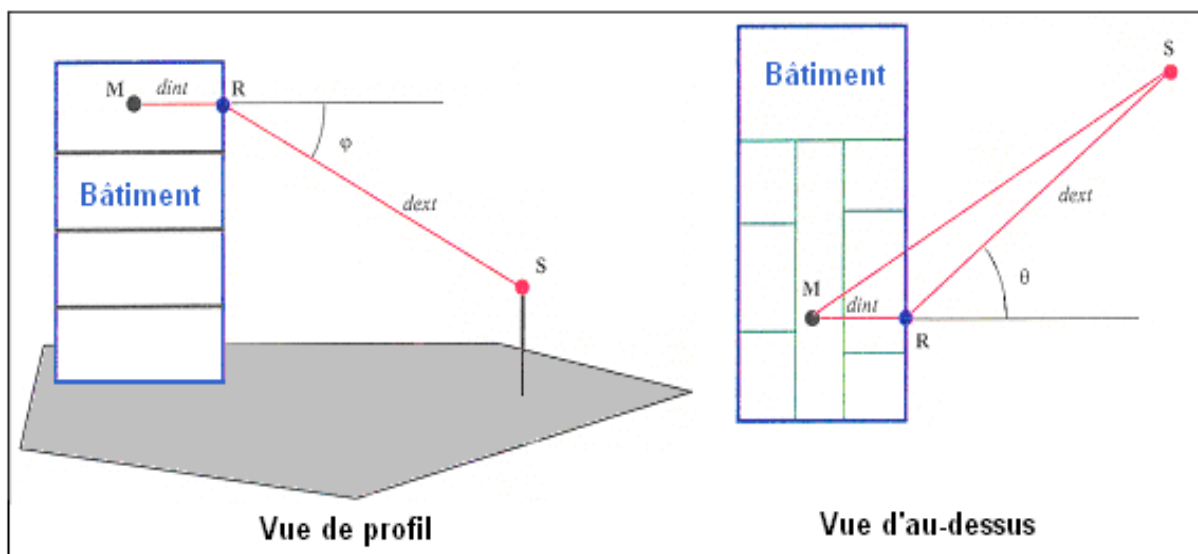
L'inconvénient majeur d'un tel modèle de pénétration des ondes radio dans les bâtiments provient de l'évaluation empirique de ces paramètres. Ces derniers peuvent présenter des fluctuations importantes d'un bâtiment à l'autre (affaiblissement des murs par exemple) et dégrader la précision de la prédiction de la couverture de champ radio. De plus, aucune base de données numérique disponible auprès des fournisseurs de données géographiques n'intègre l'architecture intérieure des bâtiments. Cela peut être envisagé pour quelques immeubles bien précis mais n'est pas possible à grande échelle.

On peut améliorer les modèles de pénétration en s'appuyant sur des coupes horizontales et des mini profils verticaux reliant le mobile à des points de référence extérieurs (figure 100). Les informations relatives à l'environnement extérieur et à l'intérieur des bâtiments extraites des coupes horizontales et des mini profils permettent de calculer un affaiblissement total composé de deux composantes (figure 101) : un affaiblissement de propagation du signal radio à l'extérieur du bâtiment entre l'émetteur et le bâtiment, et un affaiblissement radio de pénétration dans le bâtiment.



Sources : CNET, 1996.

Figure 100 : Visualisation des différents trajets de propagation pris en compte dans le calcul de l'affaiblissement radio pour un modèle de pénétration dans un bâtiment



Sources : CNET, 1996.

Figure 101 : Coupe de verticale de profil et coupe horizontale, entre l'émetteur et le récepteur : les variables influentes pour un modèle de pénétration

Le calcul de l'affaiblissement radioélectrique total se compose alors d'un terme pour la partie extérieure de la liaison et d'un terme pour la pénétration dans le bâtiment (figure 101) :

$$A_{tot} = A_{ext} + A_{int}(d_{int}, d_{ext}, \varphi, \theta) \quad (22)$$

Avec:

A_{tot} : affaiblissement total,

A_{ext} : affaiblissement à l'extérieur du bâtiment,

A_{int} : affaiblissement à l'intérieur du bâtiment,

d_{ext} : distance parcourue par l'onde à l'extérieur du bâtiment,

d_{int} : distance parcourue par l'onde à l'intérieur du bâtiment,

φ : angle formé entre le mobile et l'émetteur dans le plan horizontal,

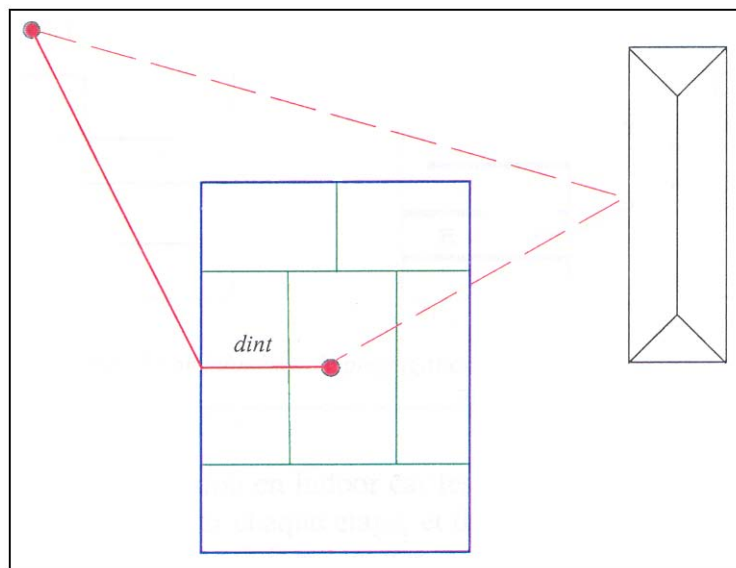
θ : angle formé entre le mobile et l'émetteur dans le plan vertical (le profil),

S : la source d'émission des ondes radioélectrique, c'est-à-dire l'émetteur,

R : le point de réflexion des ondes radio sur la façade du bâtiment,

M : le mobile.

Il s'agit ici d'une modélisation très simplifiée, d'autres contributions peuvent être prises en considération (figure 102). Par exemple, les réflexions sur les bâtiments proches de celui où se trouve le récepteur (trajet en pointillés) peuvent avoir un effet non négligeable surtout si les paramètres de cette façade (voire ceux de l'intérieur du bâtiment) sont plus favorables pour la pénétration que ceux de la façade face à l'émetteur.



Sources : CNET, 1996.

Figure 102 : Exemple d'autres contributions radioélectriques reçues par le mobile

Vu la grande variabilité des situations rencontrées au niveau des espaces urbanisés et du nombre de paramètres influents à prendre en compte, pour l'ingénierie des réseaux mobiles on se contente de modèles simplifiés tel que celui décrit dans ce paragraphe. En effet lorsqu'on désire prendre en compte plus de paramètres et de données on doit prendre en considération des contraintes de temps de calcul informatique ainsi que le coût élevé des bases de données géographiques contenant les caractéristiques des bâtiments.

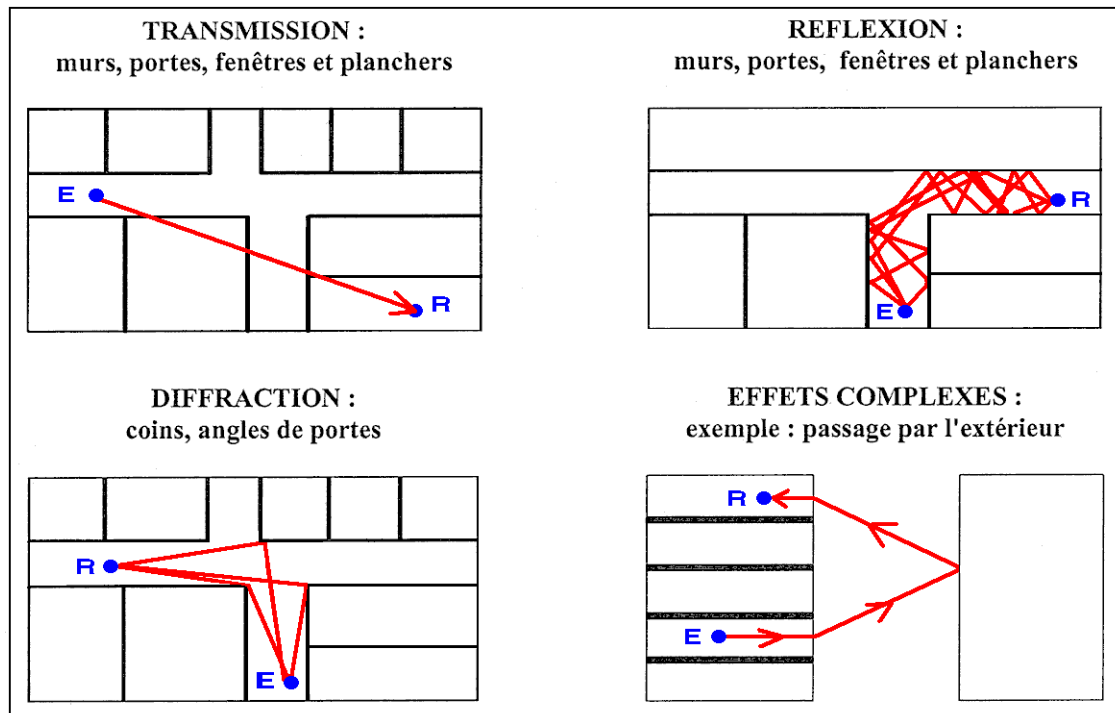
4.7.2 – Les modèles de propagation pour l'intérieur des bâtiments

Ils utilisent des algorithmes qui permettent de modéliser la propagation à l'intérieur des bâtiments (dit aussi « Indoor »), c'est-à-dire dans le cas où l'émetteur et le récepteur sont tous les deux situés à l'intérieur d'un même bâtiment. Les phénomènes de propagation sont essentiellement dus à la disposition et aux caractéristiques des éléments se situant dans le bâtiment, mais dans certains cas, le trajet le plus favorable passe par l'extérieur [sortie par un ouvrant (une fenêtre, etc.), réflexion sur un bâtiment en face puis retour par pénétration dans un ouvrant de la façade, plus favorable que pénétration multiple à travers les planchers].

On voit donc la complexité de la modélisation en Indoor car les phénomènes sont en trois dimensions avec dans le plan horizontal les phénomènes pour chaque étage, et dans le plan vertical les phénomènes inter-étages. Cependant, les modèles doivent rester assez simple du point de vue de l'algorithme de calcul et surtout du point de vue des données sur les bâtiments nécessaires pour que cela reste compatible avec les contraintes des opérateurs de télécommunication. Nous allons décrire, dans les pages qui suivent, deux modèles empiriques qui sont utilisés pour l'ingénierie radiomobile à l'intérieur des bâtiments.

La propagation des ondes radio à l'intérieur des bâtiments dépend du type d'environnement géographique intra bâtiment (indoor) et architectural, dans lequel on se trouve : environnement dense [bâtiments de type bureaux, composés de pièces de petites surfaces (15 m^2)], ouvert [bâtiments de type bureaux (50 m^2) pouvant accueillir plusieurs personnes], large [bâtiments comportant de très grands espaces, tels que des entrepôts, gares, aéroports, etc.], et corridor [l'émetteur et le récepteur étant situés dans le même couloir, comme dans les couloirs du métro, les tunnels ferroviaires et routiers, etc.].

La propagation est également multi trajets (figure 103) : les mécanismes prédominants sont la transmission, la réflexion, la diffraction et la diffusion des ondes radioélectriques en indoor (HASHEMI, 1993), (VALENZUELA, 1997).



Sources : C. Turck, FTR&D, 2003.

Figure 103 : Phénomènes de propagation des ondes radio en Indoor

4.7.2.1 – Modèle de propagation pour l'intérieur des bâtiments en distance E-R

C'est le modèle le plus simple que l'on puisse imaginer puisqu'il ne dépend que de deux paramètres : la distance émetteur-récepteur et la fréquence. Ce type de modèle est utilisable plutôt en situation de non visibilité entre l'émetteur et le récepteur, et la dépendance en distance E-R (d) peut-être linéaire ou logarithmique (COST 231, 1999).

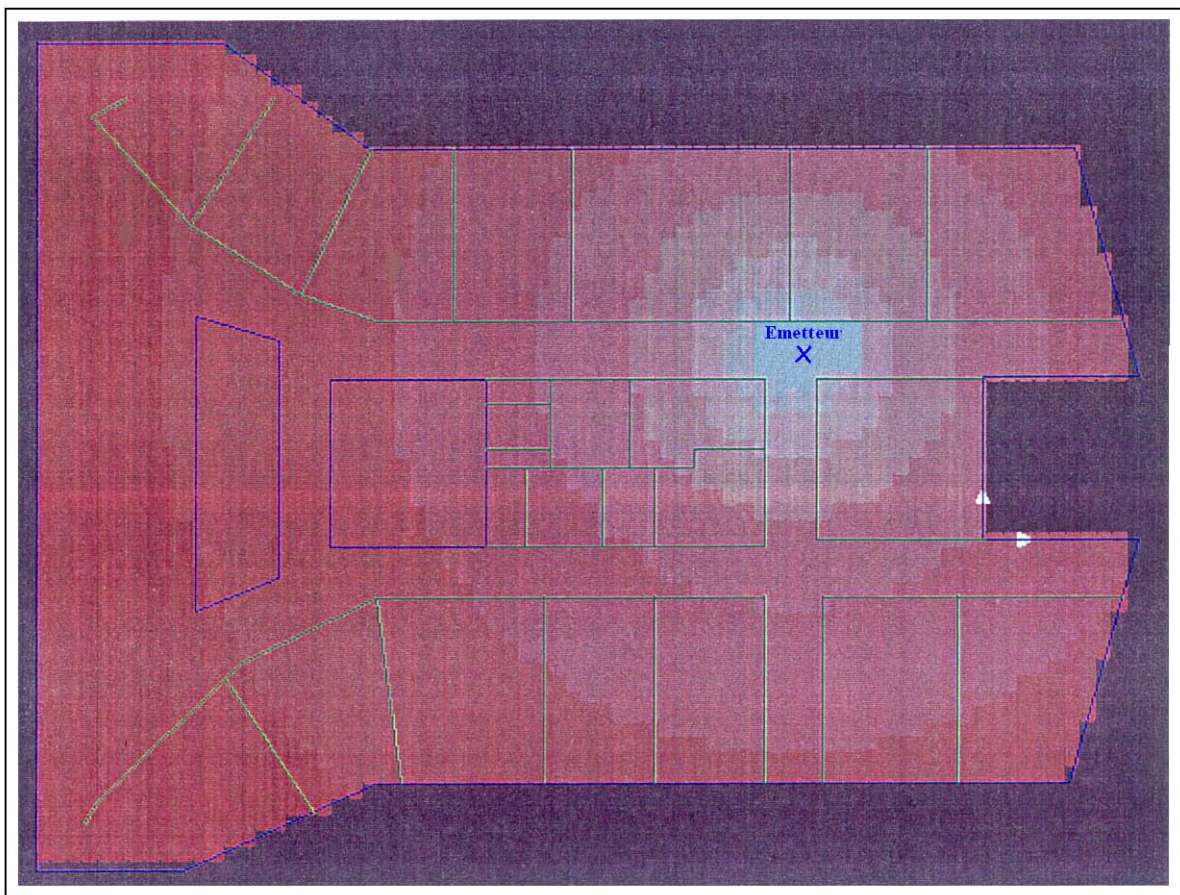
L'affaiblissement de propagation des ondes radioélectriques en milieu indoor, noté L , peut être calculé grâce à la formule suivante :

$$L = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) + 10 \cdot n \cdot \log_{10}(d) \quad (23)$$

λ correspond à la longueur d'onde, et d à la distance entre l'émetteur et le récepteur mobile.

La valeur de n est déduite par régression linéaire sur les mesures et est comprise entre 2,4 (environnement « ouvert ») et 4 (environnement « fermé »).

On voit l'avantage d'un tel modèle du fait de sa simplicité ne nécessitant pas de base de données géographiques complexes, mais l'inconvénient principal est bien entendu son manque de précision dans la prédiction (l'erreur de prédiction peut être assez importante) car il ne tient pas compte des effets de couloirs et ne prend pas en considération la notion d'étage.



Sources : CNET, 1996.

Figure 104 : Exemple de couverture de champ radioélectrique calculée avec un modèle en distance

4.7.2.2 – Modèle pour l'intérieur des bâtiments de type « Motley-Keenan »

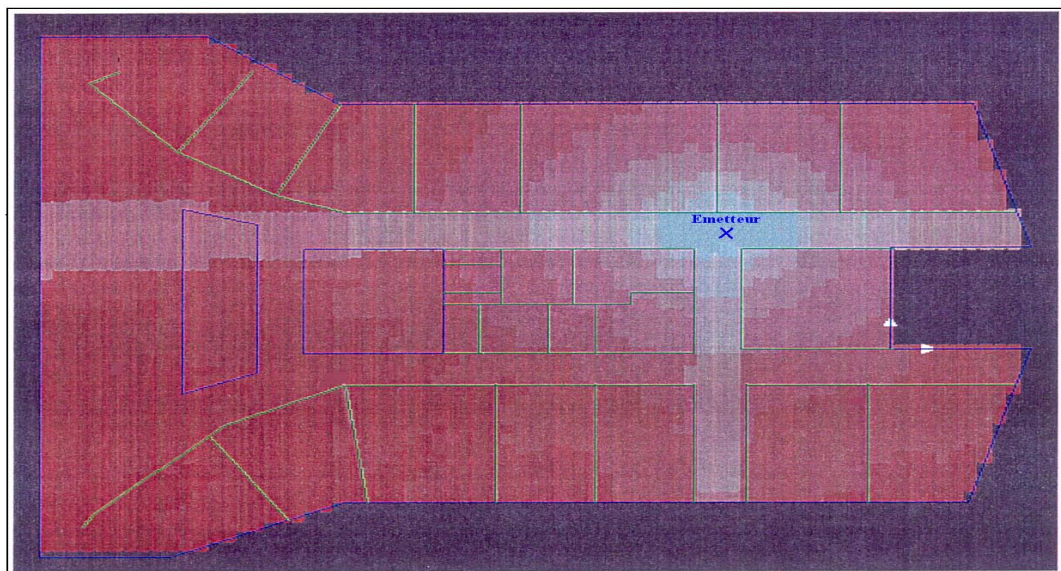
Le modèle de type Motley-Keenan s'applique aux cas de non-visibilité en environnement intra bâtiment dense (bureau). Ce modèle par rapport au précédent prend en compte les pertes dues à la traversée d'obstacles (planchers, murs, fenêtres...) en plus de l'affaiblissement d'espace libre. Ceux-ci peuvent être décrits par une base de données de l'ensemble du bâtiment mais un certain nombre de paramètres peuvent être fixés par l'utilisateur (nombre d'étages traversés, pertes par étage et par cloison...). Il n'est donc pas nécessaire pour ce type de modèle d'avoir une base de données importante. L'affaiblissement de propagation L s'exprime par :

$$L = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) + \sum_{i=1}^N K_i L_i + K_E L_E \quad (24)$$

Où l'on a N types d'obstacles (murs) avec pour les obstacles de type i , les pertes L_i induites et le nombre total d'obstacles de ce type K_i . K_E et L_E représentent respectivement le nombre d'étages traversés et les pertes par étage.

La difficulté principale revient à déduire des valeurs de pertes en fonction des matériaux qui présentent une grande dispersion (typiquement entre 2 dB pour du placo-plâtre et jusqu'à 15 dB pour des murs en béton et même plus pour les dalles). Il faut essayer d'estimer une valeur moyenne (cela dépend de la fréquence, de la rugosité mais aussi de l'angle d'incidence) en se limitant à quelques obstacles de types différents afin de limiter la base de données nécessaire pour le calcul d'affaiblissement par le modèle de propagation. Des corrections devront être effectuées à partir des campagnes de mesures réalisées dans un certain nombre de bâtiments.

Ce modèle, un peu plus élaboré que le précédent, donne alors des performances acceptables, il prend en compte les phénomènes de propagation Indoor comme les effets de couloirs, ce qui n'était pas le cas avec un modèle en distance. Cependant, il ne prend pas en compte tous les phénomènes (il ne considère que ce qui se trouve sur l'axe émetteur-récepteur) et nécessite des données concernant l'intérieur des bâtiments.



Sources : CNET, 1996.

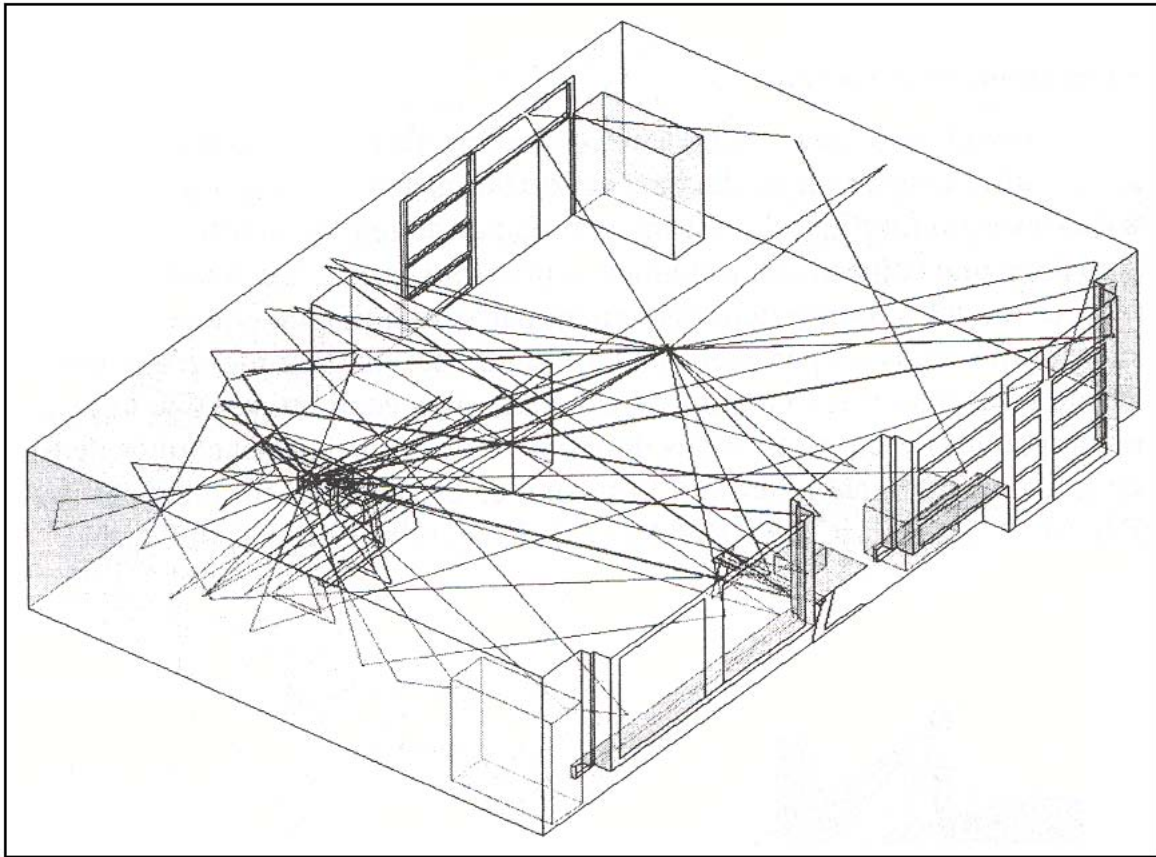
Figure 105 : Couverture de champ radioélectrique calculée avec le modèle de Motley-Keenan

Les évolutions des modèles Indoor sont les modèles 3D à lancer ou tracé de rayons que nous avons présentées précédemment.

4.7.2.3 – Modèle à tracé de rayons pour l'intérieur des bâtiments

Un modèle à Tracé de Rayons pour l'intérieur des bâtiments, le modèle à Tracé de Rayons Indoor -FTR&D (figure 106), a été développé en 2002 à France Télécom R&D (Chaigneaud, 2002). La modélisation est la même que celle pour la modélisation par Tracé de Rayons à l'extérieur des bâtiments (4.6).

L'émetteur et le récepteur mobile sont localisés à l'intérieur d'un seul et même bâtiment. La figure 106 illustre la propagation des ondes radioélectriques entre un émetteur et un mobile situés dans la même pièce. On voit bien que les ondes vont se réfléchir et se diffracter sur les murs, le mobilier, le sol, etc.



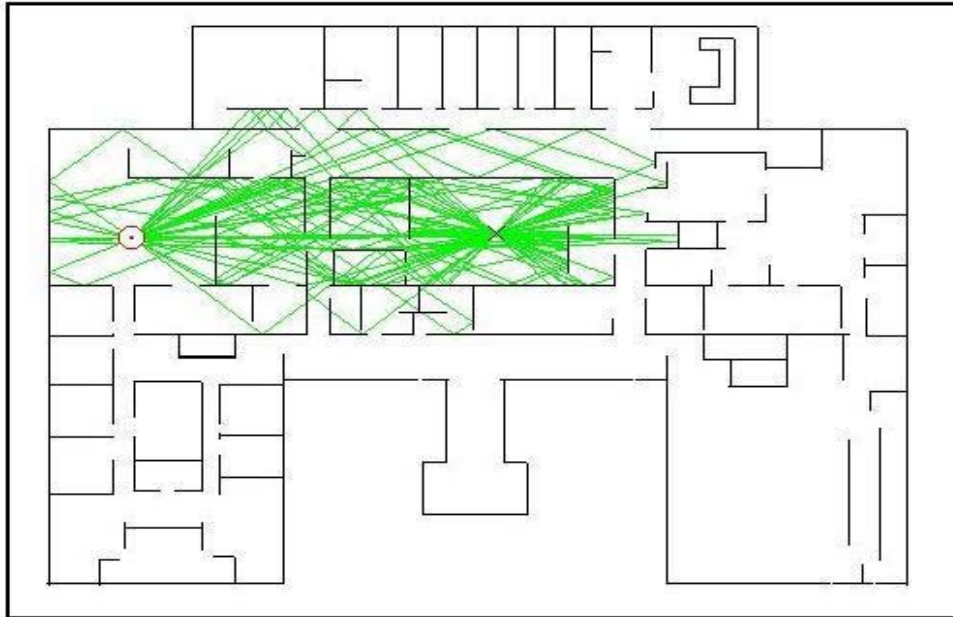
Sources : L. Chaigneaud, FTR&D, 2002.

Figure 106 : Visualisation en 2,5D du Tracé de Rayons en indoor avec le modèle à Tracé de Rayons Indoor - FTR&D

Un autre exemple de modèle à Tracé de Rayons pour l'intérieur des bâtiments correspond au modèle CWINS (figure 107), qui a été développé en 2000 par le centre de recherche américain CWINS¹⁶⁰.

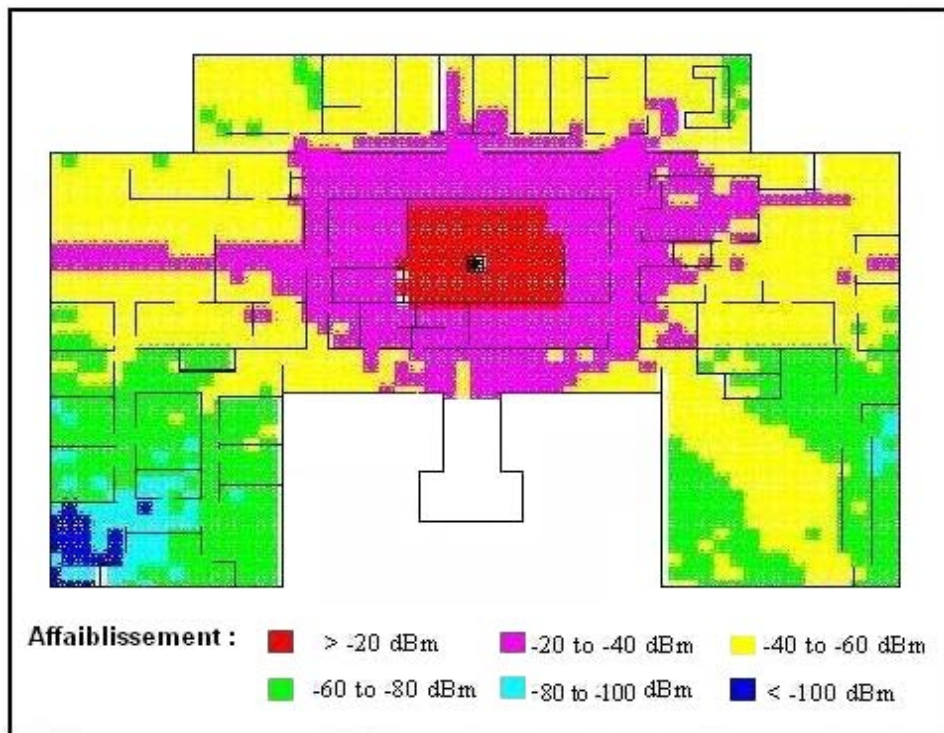
La figure 108 illustre la couverture de champ radio calculée par le modèle CWINS.

¹⁶⁰ CWINS : Center of Wireless Information Network Studies, MA, Worcester, USA.



Sources : K. Pahlavan, CWINS, 2001.

Figure 107: Visualisation en 2D des calculs de tracé de rayons pour l'intérieur des bâtiments à partir du Modèle à Tracé de Rayons CWINS



Sources : K. Pahlavan, CWINS, 2001.

Figure 108 : Visualisation de la couverture de champ radioélectrique en indoor obtenue avec le modèle à Tracé de Rayons CWINS

4.8 - Les modèles géométriques

Les modèles géométriques font partie des modèles large bande, qui ne s'appliquent pas à un type de cellule particulier (macro, méso, micro ou pico cellules) comme c'est le cas pour tous les modèles de propagation vus jusqu'à présent. Un modèle large bande est un modèle qui représente ou modélise le comportement du canal de propagation sur une largeur de bande donnée dans une configuration donnée [fréquence, largeur de bande, mobilité (fixe, piéton, voiture, etc.)], type d'environnement (*indoor*, *outdoor*, rural, urbain, etc.), mono ou multi capteur, diversité, etc. Il prend en compte la dispersion temporelle de la réponse impulsionnelle (trajets multiples) provoquée par les nombreux phénomènes entrant dans le processus de propagation du signal radio (réflexions, diffractions, diffusions, etc.).

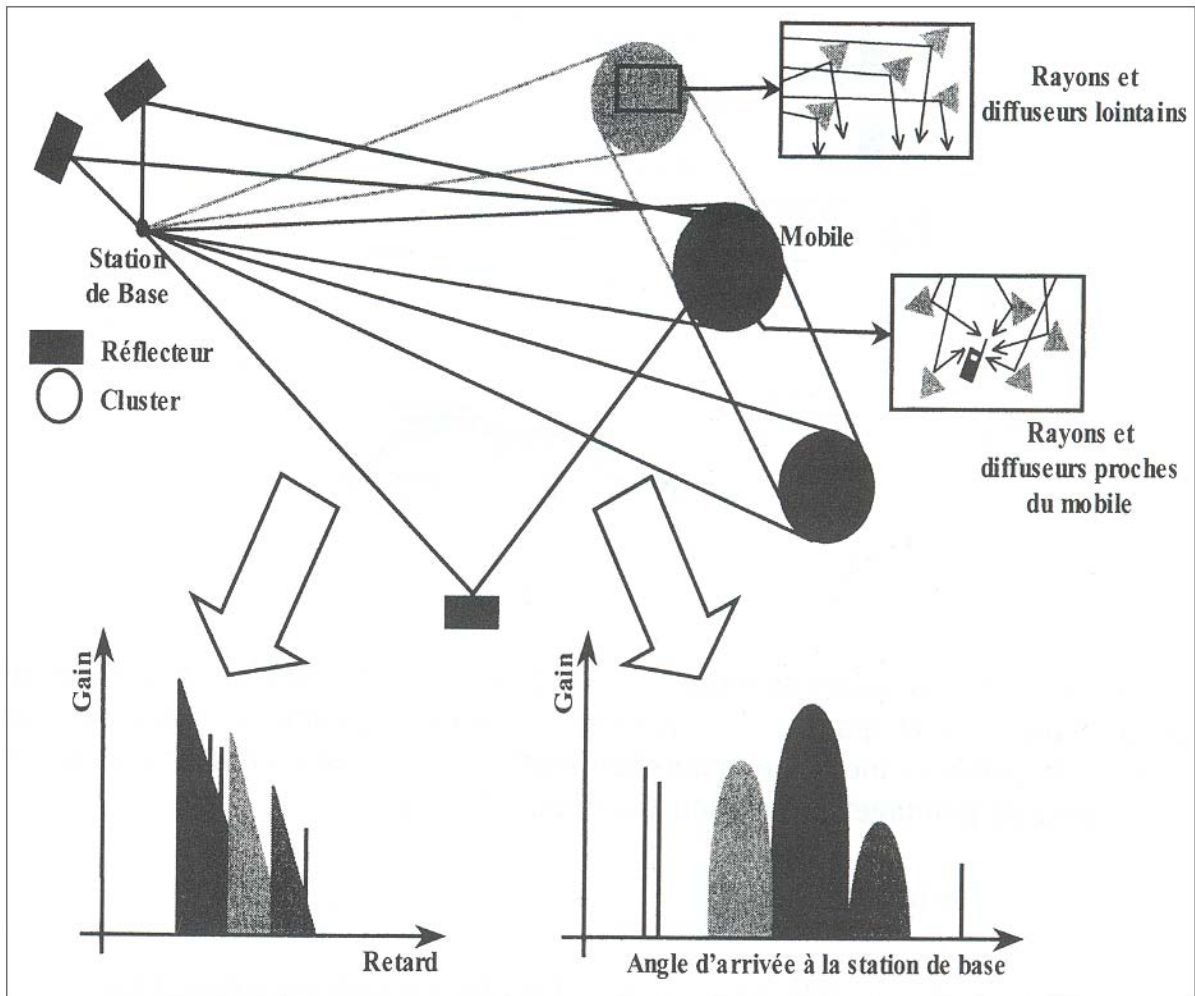
Les modèles géométriques ont été développés dans le cadre du consortium européenne METAMORP¹⁶¹ qui appartient au projet européen COST 259¹⁶² (COST 259, 2000).

Le concept de modélisation géométrique est basé sur la relation qu'il peut y avoir entre les profils de puissances angulaires et temporels, et l'emplacement (localisation en X, Y) des réflecteurs et des diffuseurs (clusters) dans l'environnement de propagation des ondes radio. En effet, comme illustrée sur la figure 109, la forme de la réponse impulsionnelle est directement liée à la position des diffuseurs prépondérants par rapport à la station de base et au mobile (SIZUN, 2003). Un trajet d'une onde radio est composé de plusieurs rayons, afin de tenir compte des notions d'étalements spatiaux et temporels de celui-ci. Ces rayons sont définis par un parcours de propagation d'ondes radio contenant deux rebonds successifs : l'un sur un réflecteur ou un diffuseur éloigné, l'autre sur un diffuseur proche du mobile. Le trajet direct entre l'émetteur et le récepteur est composé de rayons diffusés par des réflecteurs proches du mobile, comme illustré sur la figure 109.

La phase de modélisation (LASPOUGEAS, 2000) consiste alors en l'identification de la position des diffuseurs prépondérant dans l'environnement de propagation, à partir des profils de puissance temporels et angulaires mesurés (représentations spatio-temporelle de la réponse impulsionnelle du canal). A partir des informations de retard, d'angle d'arrivée à la station de base et de gain, relatives à chaque cluster, la localisation du mobile par rapport à la station de base et au mobile ainsi que la loi d'affaiblissement, peuvent être calculées. Nous obtenons alors une photographie de l'environnement de propagation considéré pour le cas mesuré pris en compte dans le calcul.

¹⁶¹ Le consortium METAMORP correspond à un groupe de recherche européen regroupant FTR&D, Deutsch Telekom, Ericsson, TU Vienne et Telenor R&D. Ce groupe s'est formé dans le cadre du projet COST 259. Les travaux du METAMORP ont été résumés dans un rapport final du COST 259, publié en l'an 2000, qui portait sur la simulation du canal de propagation.

¹⁶² COST 259, Web informations : <http://.lx.it.pt/cost259>



Sources : H. Sizun, FTR&D, 2003.

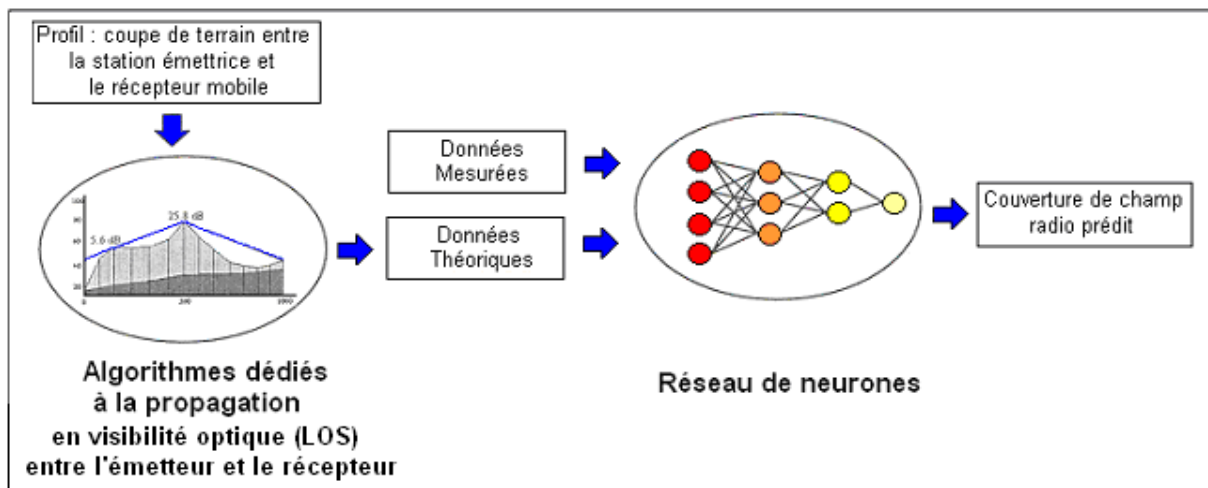
Figure 109 : Relations entre la position des réflecteurs et diffuseurs dans l'environnement de propagation radioélectrique, et la forme du profil de puissance temporel

4.9 – Une évolution des modèles de propagation : les modèles à base de réseaux de neurones

Dans ce paragraphe, nous allons donner quelques idées sur les évolutions des modèles de propagation (REININGER, 2000, 2001, et CAMINADA). Nous nous appuyerons sur un exemple qui utilise les réseaux de neurones pour améliorer les optimisations statistiques.

Les réseaux de neurones ont connu ces dernières années un essor important car ils apportent une solution puissante à des problèmes difficiles à résoudre par des algorithmes classiques. C'est pourquoi ils sont utilisés de plus en plus pour optimiser la prédiction du champ radioélectrique qui est, on l'a vu, un problème assez délicat.

Cette utilisation d'un réseau de neurones se fait dans la phase d'optimisation statistique où celui-ci permet de déduire des coefficients de pondération (ou de correction) d'un certain nombre de variables calculées par le modèle de propagation à partir des données expérimentales. Pour cela, il y a une phase d'apprentissage du réseau qui lui permet d'avoir, dans un premier temps, la solution optimale sur un certain nombre de cas représentatifs, puis de calculer le champ en tout point à partir des coefficients qui auront été déduits lors de cette phase.



Sources : C.Turck, FTR&D, 2003.

Figure 110 : Utilisation d'un réseau de neurones dans les modèles de propagation

Les résultats donnés par ce type d'approche non linéaire sont assez intéressants par rapport à l'approche classique des modèles semi empiriques (régression statistique linéaire). En effet, en plus des avantages de facilité de mise en oeuvre, on a constaté une amélioration non négligeable de la précision de la prédiction du champ reçu par le mobile.

Nom du Modèle	Type de Modèle	Environnement	BD géographique	Distance
UHF-CNET (LD)	Macro (grande) cellulaire rural	Milieu rural, maritime et urbain	MNT 100 mètres	50 km à 200 m
Montagneux-CNET	Macro (grande) cellulaire montagneux	Milieu montagneux	MNT 100 mètres MNS 400 m	50 km à 200 m
COST-CNET	Méso (petite) cellulaire urbain	Milieu périurbain et urbain	MNT 100 m MNS 100 m	10 Km à 1 Km
LEE	Méso (petite) cellulaire	Milieu rural, périurbain et urbain	MNT 100 m MNS 100 m	10 Km à 1 Km
Micro cellulaire-CNET	Micro cellulaire	Milieu urbain dense	MNT 25m BD Topo de l'IGN	1 Km à 100 m
RAYON-CNET	Micro cellulaire Lancer de rayon	Milieu urbain dense	MNT 25m BD Topo	1 Km à 100 m
Tracé de Rayons Outdoor-FTR&D	Micro cellulaire urbain Tracé de rayon	Milieu urbain dense	MNT 25m BD Topo	1 Km à 100 m
Tracé de Rayons Indoor - FTR&D	Pico cellulaire urbain Tracé de rayon	<i>Indoor</i>	Plans d'architectes	100 mètres maxi 10 mètres mini
Modèle de pénétration	Pico cellulaire urbain	<i>Outdoor</i> : urbain dense <i>Indoor</i>	BD Topo Plans d'architectes	1 Km à 10 mètres 100 mètres maxi 10 mètres mini
Modèle en distance	Pico cellulaire urbain	<i>Indoor</i>	Plans d'architectes	100 mètres maxi 10 mètres mini
Modèle de type Motley-Keenan	Pico cellulaire urbain	<i>Indoor</i>	Plans d'architectes	100 mètres maxi 10 mètres mini

Sources : C.Turck, FTR&D, 2003.

Figure 111 : Synthèse : Tableau récapitulatif des différents modèles de propagation d'ondes radioélectriques pour les réseaux radiomobiles du type GSM

5 - Conclusion de la deuxième partie

Afin d'offrir un service de téléphonie radiomobile de bonne qualité à leur abonnés, les opérateurs de téléphonie mobile effectuent des études techniques, pour optimiser le système (les relais de base, les antennes, etc.) et le réseau (la couverture du territoire, l'implantation des antennes sur le terrain). Pour ce faire, les opérateurs disposent de services techniques qui effectuent des mesures du signal radio sur le terrain et mettent au point les outils d'ingénierie informatique permettant de visualiser et de prévoir la couverture radioélectrique pour une zone géographique donnée. Pour cela ils utilisent et mettent au point des modèles de propagation des ondes radioélectriques utilisées par le réseau de télécommunication radiomobile, afin de les aider à améliorer la qualité (couverture, transmission) du réseau de télécommunication.

La deuxième partie du mémoire présente l'étude des différents modèles de propagation qui sont utilisés en ingénierie des systèmes radiomobiles. Ceux-ci se différencient essentiellement par leur environnement d'application et nous les avons classé suivant ce critère en partant des modèles pour les grandes cellules en rural (modèles macro cellulaires) pour aller jusqu'aux modèles pour l'intérieur des bâtiments (modèles pico cellulaires) en passant par les modèles pour les milieux urbanisés (modèles micro cellulaires).

Un modèle de propagation d'ondes radioélectriques comporte à la base un (des) algorithme (s) qui permet de simuler le canal de propagation entre un émetteur et un récepteur. Il permet ainsi de prédire le niveau moyen du signal que l'on reçoit en n'importe quel point à partir d'un certain nombre de paramètres (caractéristiques radio, environnement géographique de la liaison, etc.). Il modélise donc les variations du signal reçu dues aux obstacles du canal radiomobile (effets de masques) auxquelles il faudra rajouter ensuite un algorithme pour tenir compte des variations rapides du signal reçu (fading).

Le modèle est à la base de tous les calculs qui peuvent être fait par un logiciel d'ingénierie radio (niveau de champ radio reçu, calcul des interférences, analyse du hand-over, etc.). Cet outil apporte au logiciel d'ingénierie une aide précieuse pour le dimensionnement du réseau. Il doit aussi permettre de minimiser le temps de calcul des couvertures de champ. Il faut donc être très attentif aux différents paramètres d'entrée du modèle, notamment aux données géographiques utilisées en entrée du modèle de propagation. C'est sur ce point précis que nous avons orienté nos recherches, c'est-à-dire l'optimisation de la modélisation radio par l'amélioration de la prise en compte de l'Information Spatiale dans les modèles radio. C'est pour cette raison que nous avons au préalable effectué une étude en détail de la modélisation de la propagation des ondes radioélectriques du type UHF 900 Mhz, afin de connaître parfaitement les processus physiques et les équations mathématiques à l'œuvre dans la modélisation radio.

Nous avons constaté qu'il existe des limites, des entraves à une modélisation radio optimale due à une mauvaise prise en compte de l'Information Géographique dans les modèles radio préexistant, ainsi qu'à une mauvaise utilisation (en terme de modélisation géographique au sein du modèle radio) de ces données géographiques dans la modélisation radio.

Troisième Partie

Propositions d'optimisation des outils d'ingénierie radiomobile par une approche géographique

Sommaire de la Troisième partie

1 – Introduction de la troisième partie	237
2 – La qualité des données géographiques utilisées en ingénierie radiomobile.....	239
2.1 – Introduction	239
2.2 – La nature des fichiers.....	241
2.2.1 – Les fichiers d'altitude (MNT).....	241
2.2.2 – Les fichiers maillés Altitude / Sursol à 5 couches	242
2.2.3 – Les fichiers de contours de base du sursol.....	243
2.2.4 – Les fichiers d'axes de routes.....	245
2.2.5 – Les fichiers de facettes de montagnes	246
2.2.6 – Les clutters 17 thèmes	248
2.2.8 – Les fichiers de données maillées de sursol 100 mètres localisées	250
2.2.9 – Les fichiers de données maillées de sursol 400 mètres délocalisées.....	252
2.2.10 – Les fichiers de données maillées finement, au pas de 1 à 10 mètres	254
2.3 – Les formats connus et propriétaires des données géographiques.....	256
2.3.1 – Le format Graphe.....	256
2.3.2 – Les formats propriétaires FT.....	257
2.3.3 – Types de structures des données géographiques.....	259
2.3.3.1 – Les données bitmap.....	259
2.3.3.2 – Les données maillées.....	260
2.3.3.3 – Les données vectorielles	261
2.3.3.4 – Les données attributaires.....	262
2.3.4 – Intérêt de la compression des données géographiques maillées	263
2.4 – Améliorations des données géographiques à l'aide du SIG : Vérifications et corrections des données. Créations de nouvelles données géographiques.....	266
2.4.1 – Vérifications et corrections des données géographiques vectorielles	267
2.4.1.1 – Corrections à effectuer sur les contours	267
2.4.1.2 – Corrections à effectuer sur les axes des rues.....	270
2.4.2 – Vérifications et corrections des données géographiques maillées	271
2.4.2.1 – Corrections à effectuer sur les altitudes	271
2.4.2.2 – Corrections à effectuer sur les clutters.....	272
2.4.3 – Vérifications et corrections des données techniques.....	272
2.4.4 – Création de nouvelles données géographiques	273
2.4.4.1 – Fusion de données.....	273
2.4.4.1.1 – Regroupement de bâtiments.....	273
2.4.4.1.2 – Regroupement de zones de même pente : création de facettes de montagnes.....	276
2.4.4.1.3 – Création d'un MNT 3D par un Réseau Triangulaire Irrégulier : le TIN.....	278
2.4.4.2 – Ajout de nouvelles données géographiques.....	280
2.4.4.2.1 – Images à Haute ou Très Haute Résolution Spatiale, Photographies aériennes	280
2.4.4.2.2 – Données topographiques à grande échelle.....	282
2.4.4.2.3 – Données socio-économiques géolocalisées	284
2.4.5 – Transformations géométrique de données	286
2.4.5.1 – Rastérisation de données vectorielles : transformation de la BD Topo IGN en données mailles fines (1 à 10 mètres de résolution).....	286
2.4.5.2 – Vectorisation de données maillées : conversion d'un Modèle Numérique de Sursol en données vectorielles	289
3 – De nouvelles variables géographiques pour la modélisation de la propagation des ondes radio : les indicateurs morphologiques	293
3.1 – Introduction	293
3.2 – Présentation de la démarche scientifique adoptée.....	296
3.2.1 – Présentation de la méthode de calcul des surfaces de visibilité optique : Le lancer de rayon	297
3.3 – Les mesures morphométriques de base	299
3.3.1 – La longueur	299
3.3.2 – La hauteur	299
3.3.3 – La surface.....	299
3.3.4 – Le volume	299
3.3.5 – La densité.....	300
3.3.6 – Les indices de relief.....	300
3.3.6.1 – La courbe hypsométrique.....	300
3.3.6.2 – Les altitudes caractéristiques	301
3.3.6.2.1 – Les altitudes maximale et minimale	301
3.3.6.2.2 – L'altitude moyenne.....	301
3.3.6.2.3 – L'altitude médiane.....	301
3.3.6.3 – La pente.....	302

3.3.6.3.1 - La pente moyenne	302
3.3.6.3.2 - L'indice de pente i_p	302
3.4 – Les indicateurs morphologiques globaux : la rugosité.....	304
3.5 - Les indices de forme arithmétiques.....	305
3.5.1 – Présentation des indices de forme	305
3.5.2 - L'indice d'aplatissement	307
3.5.3 - L'indice de compacité	308
3.5.4 – Le coefficient de compacité de Gravélius.....	309
3.5.5 - L'indice de circularité de Miller.....	310
3.5.6 – L'indice de forme de Morton	312
3.5.7 – L'indice d'élongation de Schumm.....	313
3.5.8 – L'indice elliptique de Stoddart.....	313
3.5.9 - L'indice B.K.....	314
3.5.10 - Le coefficient de forme K_f	315
3.5.11 – Etude algorithmique et implémentation du calcul des indices de forme.....	316
3.5.11.1 - Etude algorithmique : implémentation du calcul des indices de forme géographiques.....	316
3.5.11.2 - Algorithme de calcul de la largeur Maximale pour un polygone quelconque.....	320
3.5.12 - Synthèse : Formule calculatoire des indices de forme.....	322
3.5.13 – Application du calcul des indices de forme pour l'agglomération de Strasbourg.....	323
3.5.13.1 - Visualisation des résultats.....	323
3.5.13.1.1 - Test : Visualisation des résultats pour 9 points de calcul.....	323
3.5.13.1.2 - Visualisation des résultats pour la campagne de mesure « STRASBOURG » sous ArcView.....	328
3.5.13.1.3 - Visualisation des résultats pour la campagne de mesure COST-CNET2, trajet IMPG sous ArcView.....	331
3.5.13.2 – Présentation des résultats numériques obtenus.....	333
3.5.13.2.1 – Valeurs numériques obtenues pour les 9 indices de forme	333
3.5.13.2.1.1 – Essai 1 : Valeurs des indices de Miller et Gravélius pour 9 points de calcul.....	333
3.5.13.2.1.2 - Valeurs des indices de Forme pour la campagne de mesure STRASBOURG, trajet VOODLY.....	334
3.5.13.2.1.3 - Valeurs des 9 indices de Forme pour la campagne de mesure COST-CNET2, trajet IMPG.....	335
3.5.13.3 - Validation géographique et radioélectrique des résultats	336
3.5.13.4 - Intérêts et utilisation des indicateurs morphologiques en modélisation radioélectrique.....	348
3.5.13.5 – Conclusion du troisième chapitre.....	350
4 – Le modèle <i>OpenMorph</i>	351
4.1 – Optimisation des modèles de propagation d'ondes radio.....	352
4.1.1 – Optimisation du modèle de propagation d'ondes radio de Okumura-Hata.....	352
4.1.1.1 – Introduction.....	352
4.1.1.2 - Présentation du modèle de propagation de Okumura-Hata.....	353
4.1.1.3 – Typologie du milieu géographique pris en compte par Okumura et Hata pour mettre au point leur modèle de propagation d'ondes radio	357
4.1.1.4 – Implémentation du modèle de propagation à l'aide du Système d'Information Géographique.....	359
4.1.1.5 – La démarche méthodologique mise en œuvre	360
4.1.1.5.1 - Présentation de la démarche méthodologique	360
4.1.1.5.2 - Principe d'affectation d'une classe d'occupation du sol radio dépendante	363
4.1.1.6 - Présentation des résultats obtenus pour chaque classe d'occupation du sol radio dépendante.....	366
4.1.1.6.1 - Modélisation en milieu Urbain Très Dense (Centre-ville).....	368
4.1.1.6.2 - Modélisation en milieu Urbain Dense	372
4.1.1.6.3 - Modélisation en milieu périurbain.....	376
4.1.1.6.4 - Modélisation en milieu rural.....	380
4.1.1.7 – Synthèse des résultats : coefficients de correction à ajouter au modèle de Hata selon le milieu géographique et gain en performances.....	384
4.1.1.8 – Conclusions pour le modèle de Hata	386
4.1.2 – Optimisation et validation d'un autre modèle de propagation d'ondes radio : le modèle COST-LD	387
4.1.2.1 – Introduction.....	387
4.1.2.2 – Présentation du modèle de propagation COST-LD	388
4.1.2.2.1 - Le modèle macro cellulaire CNET-UHF (également appelé modèle LD)	388
4.1.2.2.2 - Le modèle micro cellulaire COST-CNET.....	389
4.1.2.3 - Synthèse des résultats : coefficients de correction à ajouter au modèle COST-LD selon le milieu géographique et gain en performances.....	391
4.1.3 – Résultats numériques obtenus : Comparaison des résultats de calcul de l'affaiblissement radio pour les deux modèles de propagation d'ondes radio par rapport aux mesures d'affaiblissement sur le terrain.....	393
4.1.3.1 - En Milieu Urbain Dense	393
4.1.3.2 - En Milieu Urbain	394
4.1.3.3 - En Milieu Périurbain.....	395
4.1.3.4 - En Milieu Rural	396
4.2 – Le modèle <i>OpenMorph</i>	397
4.2.1 – La plateforme d'ingénierie radiomobile <i>OpenMorph</i>	399
4.2.1.1 - Introduction	399
4.2.1.2 – Les modules dédiés à l'ingénierie et à la visualisation.....	399
4.2.1.3 - L'importation/l'exportation de données, de mesures radio.....	406
4.2.1.4 – Conclusion	408

4.2.2 - Le module d'Analyse Spatiale : modélisation géographique du milieu de propagation des ondes radio	409
4.2.2.1 – De l'importance des données géographiques pour la modélisation radiomobile	409
4.2.2.1.1 – Introduction	409
4.2.2.1.2 – L'intérêt de l'Analyse Spatiale pour l'ingénierie radio :	410
4.2.2.1.3 – Les apports de l'Analyse Spatiale sous SIG pour les radiocommunications	410
4.2.2.2 – Applications en cours de développement et recherches futures	412
4.2.2.2.1 – Le profil horizontal	413
4.2.2.2.1.1 - La modélisation des espaces vides	413
4.2.2.2.1.2 - La modélisation des places en milieu urbain	414
4.2.2.2.1.3 - La généralisation du calcul des surfaces de visibilité	415
4.2.2.2.2 – Le profil vertical	416
4.2.2.2.2.1 - La modélisation du bâti et des espaces vides	416
4.2.2.2.2.2 – Cas particulier : Modélisation des arbres	417
4.2.2.2.3 – La troisième dimension, le volume	418
4.2.2.2.3.1 - La modélisation des espaces vides en 2,5D	418
4.2.2.2.3.2 - La modélisation des objets urbains : le bâti	420
5 - Conclusion de la troisième partie	423

1 – Introduction de la troisième partie

Dans la troisième partie du mémoire nous exposons nos propositions d'optimisation des outils d'ingénierie radiomobile par une approche géographique. Pour aborder ce point, il nous faut aborder l'Information Géographique à proprement parler et surtout sa qualité dans le chapitre 2. Suite au constat réalisé, nous avons proposé des solutions novatrices (chapitre 3) et un outil d'optimisation (chapitre 4).

Le chapitre 2 est consacré à l'évaluation des données couramment utilisées dans les modèles de propagation radiomobiles. Nous avons ainsi analysés l'Information Géographique en entrée des outils d'ingénierie : typologie, formats, qualité, résolution, améliorations à apporter, corrections des données, etc.

Dans le chapitre 3, nous proposons l'utilisation de nouvelles données géographiques indirectes, « les indicateurs morphologiques », qui selon nous, permettent d'améliorer la caractérisation du milieu géographique, et par conséquent d'améliorer la qualité de la modélisation de la propagation des ondes radio.

Enfin, le quatrième chapitre présente le modèle OpenMorph, qui correspond à la mise en application des résultats de recherche au sein d'un Système d'Information Géographique. Le modèle OpenMorph comporte deux modules, un module de calcul radio qui est basé sur des modèles de propagation d'ondes radio (Okumura-Hata et COST-LD), et un module d'Analyse Spatiale, qui effectue le calcul des variables géographiques directes et indirectes (indices de formes, surfaces de visibilité, etc.). Les résultats obtenus répondent à des objectifs d'amélioration de la prédiction de la couverture de champ radioélectrique prédite par les modèles de propagation radio en fonction de paramètres géographiques.

Depuis une vingtaine d'années, on assiste au développement des nouvelles technologies de l'information et de la communication, notamment le téléphone portable.

Le développement exponentiel des réseaux de téléphonie radiomobile depuis une quinzaine d'années a entraîné la nécessité de mise en place d'études et de recherches en télécommunications radiomobiles, portant sur les besoins des utilisateurs (zones géographiques couvertes, qualité des communications), ainsi que sur les besoins des opérateurs de téléphonie radiomobile [savoir où implanter les antennes relais, pouvoir prédire la couverture de champ radio sur une zone géographique bien précise, pouvoir visualiser la carte du réseau radiomobile en temps réel, pouvoir faire des scénarios de prédiction de la propagation des ondes radio selon les contraintes rencontrées : radio (fréquence, types d'antennes, etc.), géographique (altitude, type d'occupation du sol, etc.)]. Ceci entraîne la nécessité pour les opérateurs d'avoir une bonne connaissance du terrain en terme d'information géographique.

C'est dans ce contexte, qu'une étude de l'apport d'une information géographique de qualité, ainsi que de ses outils informatiques associés (les Systèmes d'Information Géographique) a été menée. Le but final était d'améliorer la prédiction des couvertures de champ radioélectrique pour le réseau de téléphonie radiomobile GSM 900 MHz, et par là même, la performance du système de télécommunication radiomobile.

Deux types de questions (figure 112) se posent alors :

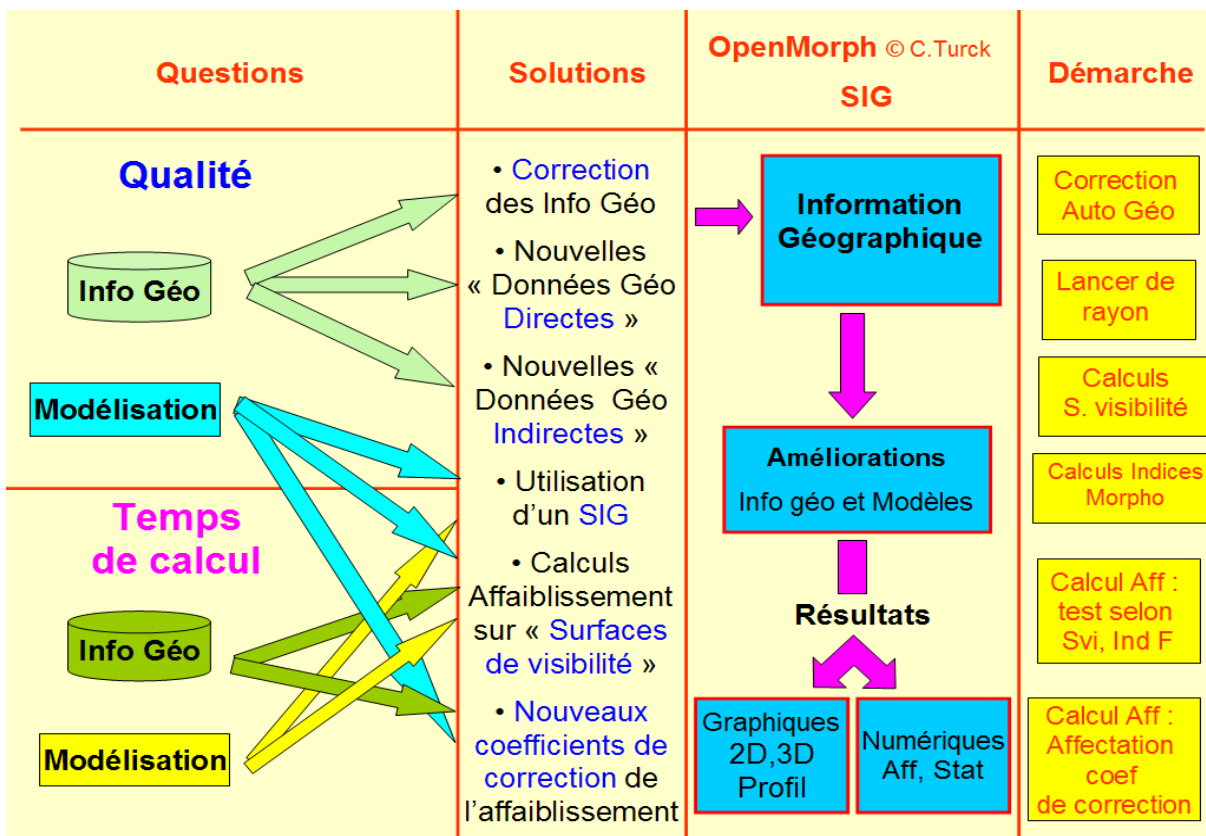
1. des questions en terme de qualité :

- qualité de l'information géographique,
 - qualité de la modélisation : géographique et radioélectrique.
2. des questions en terme de temps de calcul informatique :
- temps de calcul de l'information géographique (création de nouvelles données géographiques, correction des données géographiques, gestions des données, mise à jour des données, etc.),
 - temps de calcul de la modélisation : géographique et radioélectrique.

Les solutions que nous proposons correspondent d'une part à l'amélioration de l'information géographique prise en compte dans les modèles de propagation d'ondes radio, et plus largement, dans les outils d'ingénierie radiomobile.

Pour ce faire, nous proposons quatre solutions : la correction des informations géographiques existantes (BD Topo IGN en milieu urbain, etc.), la création de nouvelles données géographiques « directes » (par ajout, fusion ou transformation géométrique de données géographiques existantes), la création de nouvelles données géographiques « indirectes » (les indicateurs morphologiques, les surfaces de visibilité, etc.), enfin l'utilisation d'un Système d'Information Géographique couplé avec les modèles radiomobiles.

Remarque : Par données géographiques « indirectes », nous entendons des données géographiques qui dérivent d'autres données géographiques existantes ; qui sont calculées à partir de données géographiques « classiques ». Prenons un exemple, pour le calcul des espaces vides en ville. On dispose de la BD Topo de l'IGN, qui contient les bâtiments sous forme vectorielle. A partir de ces données directes, le module de calcul des espaces vides implémenté sous le SIG ArcView est utilisé (modèle OpenMorph, module de calcul géographique). On obtient alors, après calculs, de nouvelles données géographiques indirectes, les surfaces correspondant aux espaces vides.



Sources : C. Turck, LIV, 2005.

Figure 112 : Visualisation de la démarche scientifique adoptée dans la thèse.

2 – La qualité des données géographiques utilisées en ingénierie radiomobile

2.1 – Introduction

La norme ISO8402 définit la qualité comme « l'ensemble des propriétés et des caractéristiques d'un produit qui lui confère l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés ou implicites ». C'est une définition générale de la qualité, mais qui joue sur la définition de la qualité des données et la détermination de ses composantes, étant donné que les données en soi représentent une des composantes d'un produit livré à un utilisateur.

La diversité des types de données géographiques (MNT, MNS, Clutter, Indicateurs morphologiques, etc.) qui ont été importées dans le Système d'Information de l'opérateur de télécommunication radiomobile, ainsi que la multiplicité des sources de données (mesures de terrain collectées par les techniciens, achats auprès de l'IGN, échanges de données géographiques dans le cadre de projets européens, etc.) et des fournisseurs (IGN, GéoImage, ISTAR, Siradel, etc.) rendent l'information sur la qualité des données nécessaire, voire incontournable lors de tout achat/échange de données, car les informations supplémentaires, les métadonnées (fournisseur, coût, date d'acquisition, date de mise à jour, etc.), permettront à l'utilisateur final (dans notre cas, les ingénieurs en télécommunication radiomobile de FTR&D) d'exploiter les données géographiques de façon optimale.

La qualité des données géographiques est définie de trois manières : géométrique, sémantique et fonctionnelle. Anne Puissant¹⁶³ évalue la qualité intrinsèque des données géographiques selon sept paramètres : l'échelle, la précision, l'exactitude, la fiabilité, la mise à jour, la couverture et le mode de création des données.

L'évaluation de la qualité des données géographiques par l'opérateur de télécommunication s'effectue par l'intermédiaire de plusieurs tests (temps de calculs, erreurs géométriques, comparaisons aux BD Géographiques déjà en exploitation au sein du Système d'Information, amélioration de la qualité de la prédiction radio, etc.). Les tests s'effectuent sur deux types de logiciels : un Système d'Information Géographique, ainsi que la plateforme d'ingénierie radiomobile.

La prise en compte des données :

Au sein de la branche recherche et développement du groupe France Télécom, les données géographiques sont stockées et gérées par un Système de Gestion de Bases de Données Relationnel (Oracle), dans une librairie spécifique dédiée aux données géographiques.

Les utilisateurs finaux des données géographiques sont connectés au SGBDR via un réseau très haut débit, ce qui leur permet d'accéder en temps réel aux fichiers géographiques dont ils ont besoin sur leur poste de travail.

¹⁶³ Anne Puissant, 2003, *Information géographique et images à très haute résolution. Utilité et applications en milieu urbain*, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 445 pages.

L'acquisition des données :

L'acquisition des données géographiques par l'opérateur s'effectue le plus souvent par achat auprès des fournisseurs de base de données tels que l'IGN, la société GéoImage, Cartosphère, Siradel, etc. Il existe quelques rares cas où les données proviennent de coopération dans le cadre de grands projets industriels ou/et de recherche européens ou internationaux ; mais dans ce cas, les données sont limitées à l'utilisation dans le cadre de ces projets. Il existe également quelques bases de données géographiques correspondant à des mesures effectuées par les techniciens de FTR&D, comme par exemple des mesures Indoor, des mesures de terrains lors de campagnes de mesures radio, etc.

Les dimensions des données :

France Télécom a pendant longtemps été l'opérateur de télécommunication national. De ce fait, l'opérateur possède des BD Géographiques couvrant l'ensemble de la France, mais aussi des données géographiques à des résolutions plus hautes, là où la complexité du milieu géographique rend nécessaire un niveau de détail plus important, c'est-à-dire en milieu urbain.

Le taux de renouvellement des données :

La date de mise à jour et d'achat de nouvelles bases de données géographiques n'est pas fixée à l'avance par l'opérateur, elle dépend de ses besoins à un moment précis, ainsi que des nouveaux produits disponibles sur le marché. Néanmoins, l'opérateur dispose d'un service de veille chargé de l'étude et de l'évaluation des nouvelles données géographiques disponibles sur le marché.

Dans les pages suivantes, une présentation générale des données utilisées par FTR&D est faite afin de mieux cerner la diversité des sources, des types de fichiers et des caractéristiques de l'Information Géographique utilisée. Ensuite l'analyse de la qualité de l'Information Géographique proprement dite sera faite (ce point sera abordé en détail dans la partie 2.4 « vérification et correction des données »).

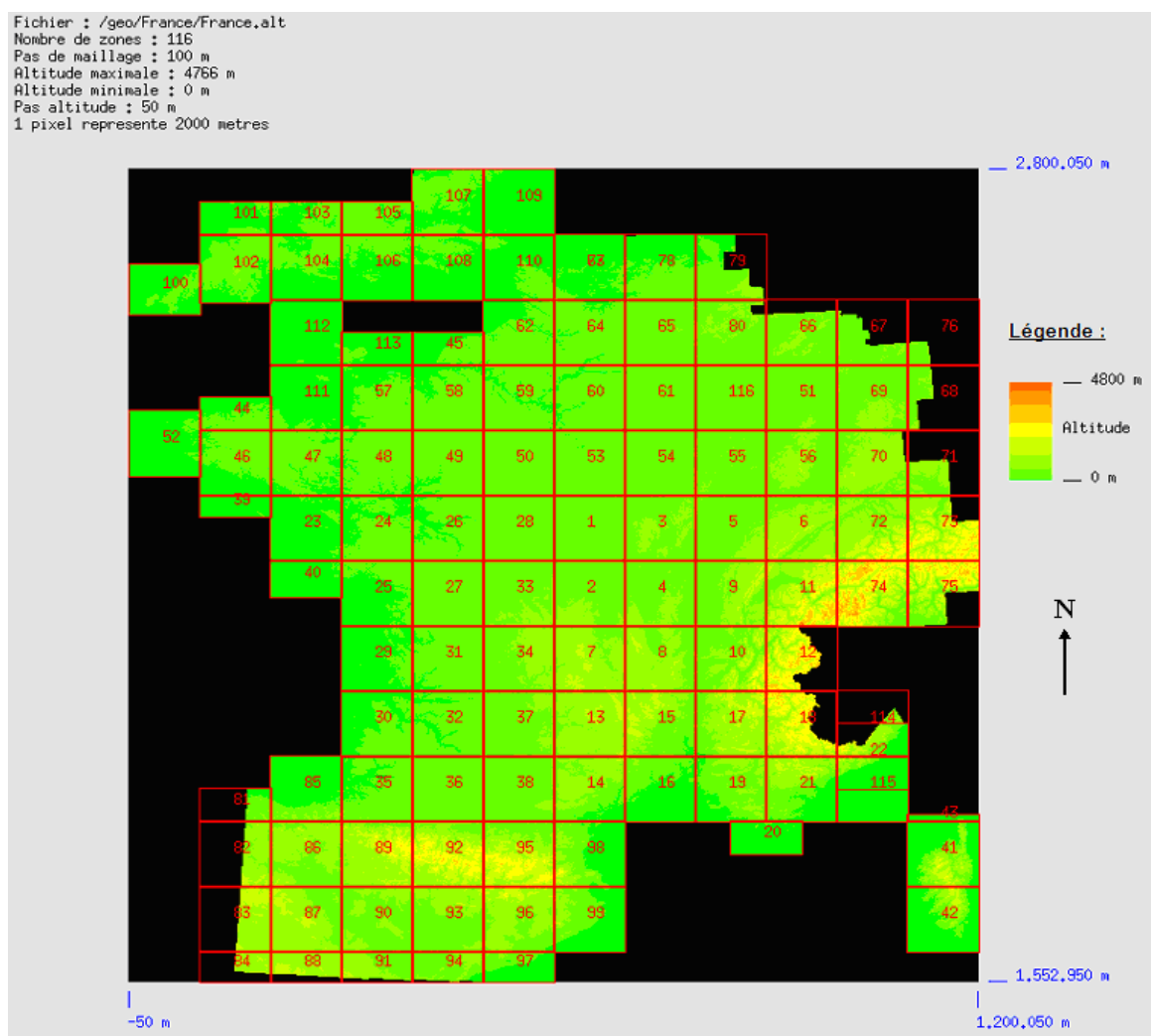
2.2 – La nature des fichiers

2.2.1 – Les fichiers d'altitude (MNT)

Ce sont des données géographiques qui décrivent l'altitude du sol dans chaque maille. On parle de Modèle Numérique de Terrain, MNT. Le format des données est du type raster. Les données contenues dans la Base de Données géographiques de FTR&D utilisent le suffixe « *.alt ». Elles sont stockées dans une seule couche d'informations contenant l'altitude du sol dans chaque maille.

Remarque : Dans le format propriétaire FTV1, les valeurs d'altitude étant conservées dans des nombres entiers, la précision n'est que d'un mètre, alors qu'elle est de 0,1 mètre dans les fichiers fournis par l'IGN.

La figure 113 représente un Modèle Numérique de Terrain « France.alt », qui couvre l'ensemble de la France, avec un pas de maillage de 100 mètres. Ce fichier a une taille de 215 Mo. Le fichier étant très volumineux, il a été subdivisé en 116 zones géographiques (tuiles). Lors des calculs d'ingénierie, on ne charge en mémoire que la zone géographique dont on a besoin pour les calculs.



Sources : C.Turck & T. Klein, FTR&D, 2002.

Figure 113 : Visualisation du Modèle Numérique de Terrain pour la France

2.2.2 – Les fichiers maillés Altitude / Sursol à 5 couches

FTR&D dispose de fichiers géographiques particuliers regroupant à la fois des données concernant l'altitude du sol et du sursol¹⁶⁴ dans chaque maille. Le tableau ci-dessous décrit les cinq couches d'informations présentes dans le fichier. Le format du fichier est « *.sol ».

Données contenues : **5 couches**

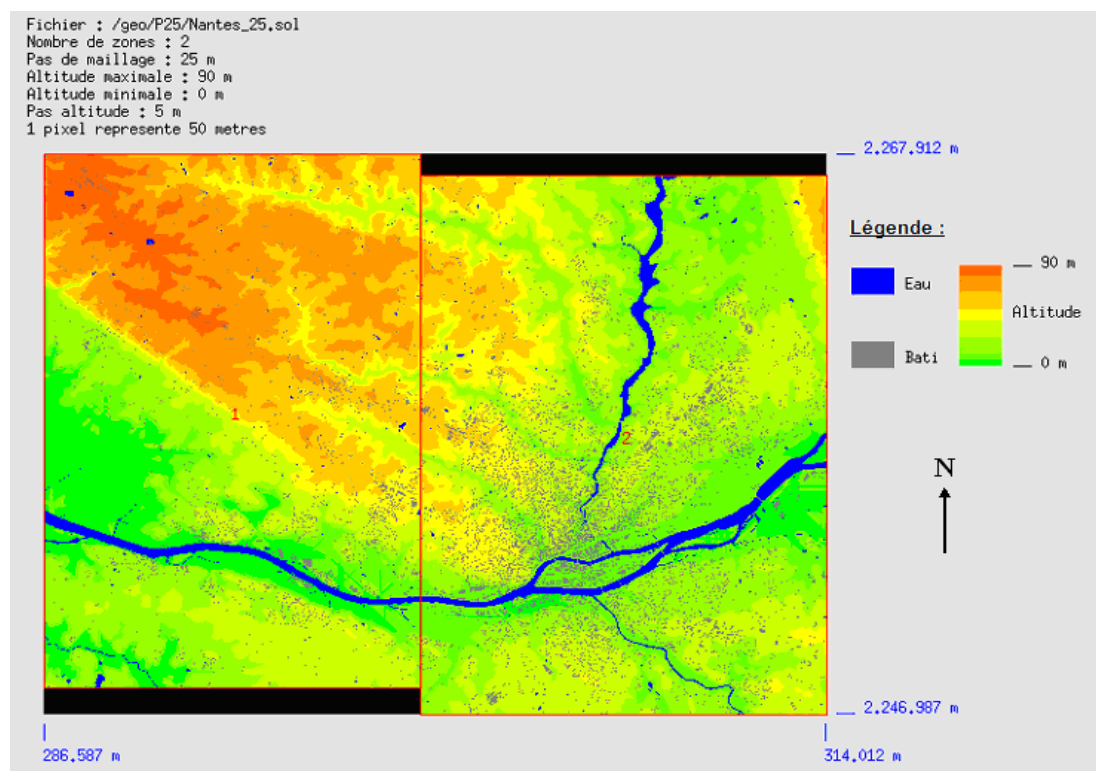
<u>couche</u>	<u>contenu</u>
C1	altitude Z
C2	hauteur de bâti
C3	hauteur de bois
C4	pourcentage d'eau
C5	pourcentage de sol nu

Remarque : Dans les fichiers FTV1 maillés ayant un pas de maille assez fin (jusqu'à 25 mètres), les couches C4 et C5 ne peuvent prendre que 2 valeurs :

0 (absence)

100 (présence) (→ ou **1** dans les fichiers FTV1 maillés nouveau format)

La figure 114 représente le fichier « Nantes_25.sol » contenant l'altitude et le type de sursol pour la ville de Nantes. Le pas de maillage est de 25 mètres. Le fichier a une taille de 9 Mo.



Sources : C.T & T.K, FTR&D, 2002.

Figure 114 : Visualisation du fichier altitude et sursol pour la ville de Nantes

¹⁶⁴ Le sursol contient les objets géographiques situés « au dessus du sol », ce qui correspond aux éléments construits (bâtiments, ponts, mobilier urbain, etc.), à la végétation (bois, rangée d'arbres, etc.) et aux surfaces en eau.

2.2.3 – Les fichiers de contours de base du sursol

Ce sont des données géographiques qui décrivent le sursol (la végétation, les surfaces en eau, les éléments construits (bâtiments, ponts, routes, etc.). Le format des données est du type vectoriel : les bâtiments sont codés sous la forme de polygone (points reliés par des segments de droite reliés les uns aux autres), les pavillons (habitat résidentiel) sont codés sous la forme de points.

FTR&D fait une distinction entre les pavillons, de surface inférieure ou égale à 150 mètres carrés, et les bâtiments de plus grande taille. Ainsi donc les pavillons sont représentés sous la forme de cercle et non de polygone. Pourquoi adopter une telle classification du bâti ? Du point de vue de la propagation des ondes radioélectriques, les pavillons, qui sont de petite taille, n'ont qu'un impact limité sur la transmission du signal radio : les ondes contournent l'obstacle sans être trop affaiblies. De ce fait FTR&D préfère les représenter sous la forme de points.

Les données « contours de base du sursol » contenues dans les Bases de Données géographiques de FTR&D adoptent le suffixe « *.ssl », elles sont codées de la manière suivante :

- Les bâtiments, l'eau et la végétation sont codés sous la forme de contours de base, de polygones. Chaque polygone est codé comme un objet composé d'un ensemble de points de coordonnées X,Y reliés par des segments de droite. Chaque objet possède un numéro d'identifiant. On dispose également d'une information concernant la hauteur moyenne du bâtiment ou du bois.
- Les pavillons sont représentés sous forme de points, de coordonnées X, Y. Chaque point possède un numéro, un identifiant. On dispose également d'une information concernant la hauteur moyenne du pavillon.

La figure 115 correspond à un extrait du fichier contours de base du sursol¹⁶⁵ pour la ville de Belfort. On distingue bien les différents éléments de sursol : les bâtiments sont représentés en gris foncé, la végétation en vert, l'eau en bleu et les ponts en noir. Les pavillons sont représentés sous la forme de cercles, et enfin les espaces vides sont représentés en gris clair. Pour la ville de Belfort (ville de taille moyenne, 75 000 habitants), le fichier contours de base a une taille de 3,7 Mo.

¹⁶⁵ Le fichier « Belfort.ssl » correspond au fichier décrivant le sursol pour la ville de Belfort, dans un format vectoriel. Les fichiers contours de base ont été créés en interne par le CNET dans les années 90, à partir des données d'occupation du sol (format maillé) achetées auprès de l'IGN.

Codification des contours de bases :

- 5 : Bâtiment
- 6 : Eau
- 7 : Bois
- 8 : Dalle piétonne
- 9 : Pont
- 10 : Pavillon 40/65 m²
- 11 : Pavillon 65/100 m²
- 12 : Pavillon 100/150 m²



Sources : C.T & T.K, FTR&D, 2002.

Figure 115 : Visualisation du fichier Belfort.sxl

2.2.4 – Les fichiers d'axes de routes

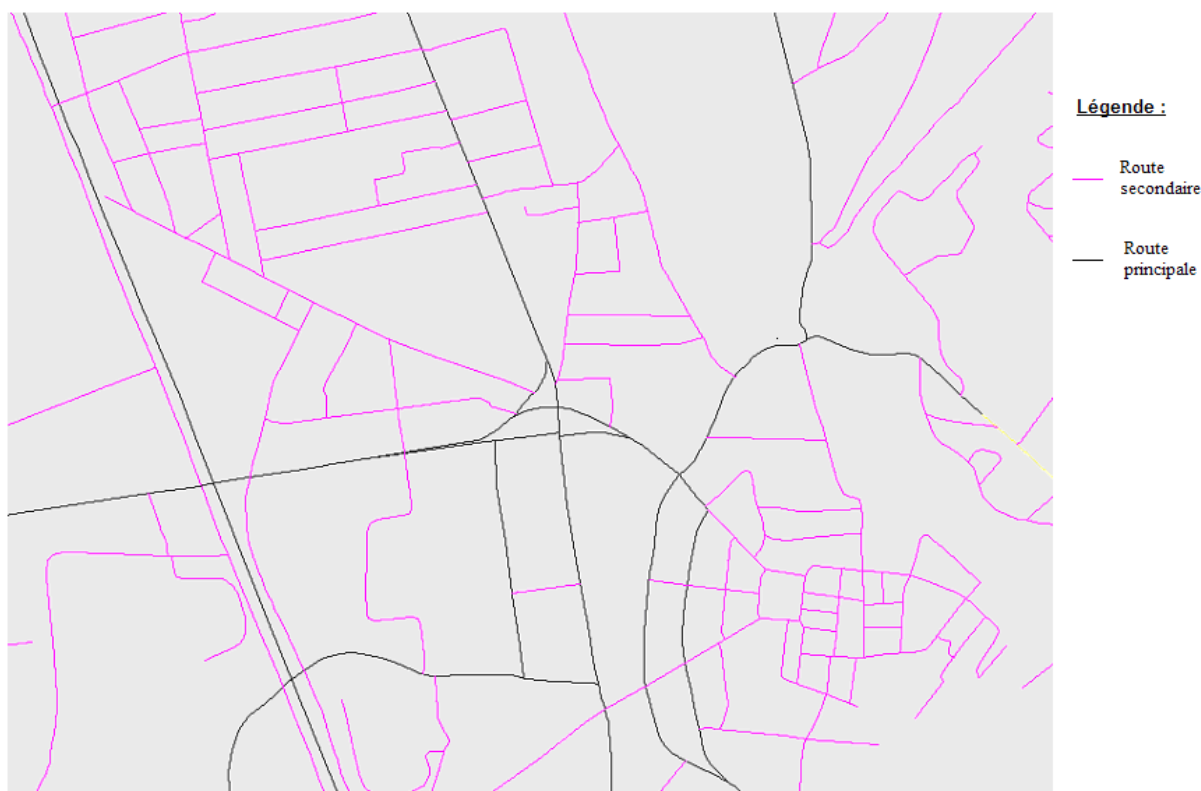
Ils correspondent à des fichiers de données géographiques vectorielles qui permettent de représenter les routes sous formes de lignes brisées. Les routes sont codées sous la forme de segments de droite (chaque segment correspond à deux points reliés par une droite). Chaque tronçon de route correspond à un objet géographique (polyligne), qui est décrit par ses coordonnées en X,Y, et qui comporte un identifiant (un numéro).

Les fichiers « axes de routes » sont stockés dans un format propriétaire de FT, le format FTV1 vectoriel. Ils utilisent le suffixe « *.axe ».

Codification des axes de routes :

13	:	Nationale
14	:	Départementale
15	:	Voie urbaine
16	:	Autoroute
17	:	Voie importante
18	:	Voie ferrée

La figure 116 représente un extrait du fichier « axes des routes » pour la ville de Belfort. Les routes principales sont représentées en noir et les routes secondaires en rose. Le format des données est le FTV1 vectoriel. Le fichier a une taille de 0,27 Mo.



Sources : C.T & T.K, FTR&D, 2002.

Figure 116 : Visualisation du fichier axes des routes pour la ville de Belfort

2.2.5 – Les fichiers de facettes de montagnes

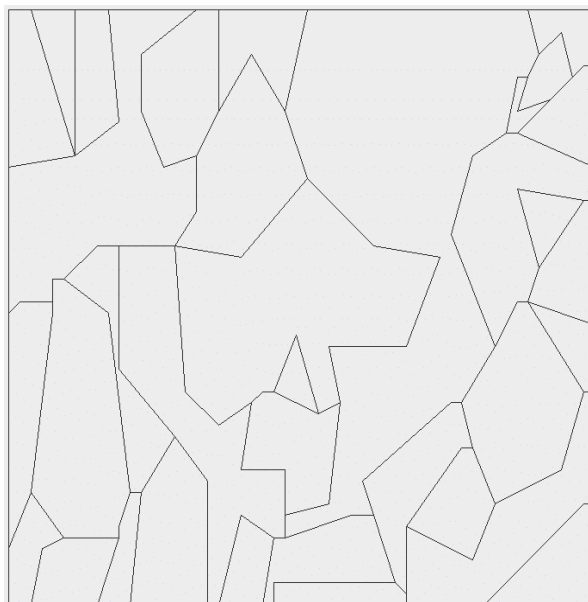
Les facettes de montagnes correspondent à des zones géographiques pour lesquelles la pente du sol est identique (le vecteur normal par rapport au sol est similaire). Ce sont des fichiers de données vectorielles particuliers, qui ont été mis au point par FTR&D afin de pouvoir représenter les facettes de montagnes. FTR&D a créé ce type de représentation des données géographiques sous la forme de surfaces de même pente, afin d'optimiser les calculs d'ingénierie : les calculs de réflexion du signal radio sur les facettes des montagnes améliorent la précision de la prédiction, et permettent un gain de temps important (en terme de temps de calcul de l'affaiblissement radio).

Les fichiers de facettes de montagnes sont générés à partir des fichiers maillés de relief (MNT achetés auprès de l'IGN), grâce à un petit utilitaire, qui permet de convertir les Modèles Numériques de Terrain, en milieu montagneux, en données géographiques du type « facettes de montagnes ».

Les fichiers « facettes de montagnes » sont codés dans un format propriétaire de FTR&D, le format FTV1 vectoriel. Ils emploient le suffixe « *.ssl ».

Les données contenues dans le fichier facettes de montagnes sont semblables à celles des contours de base vue précédemment. Ce sont des polygones, composés d'un ensemble de points reliés par des segments de droite. Chaque facette est donc codée sous la forme d'un objet géographique du type polygone : un ensemble de points de coordonnées X,Y, reliés par des segments de droite. Chaque facette possède un numéro d'identifiant.

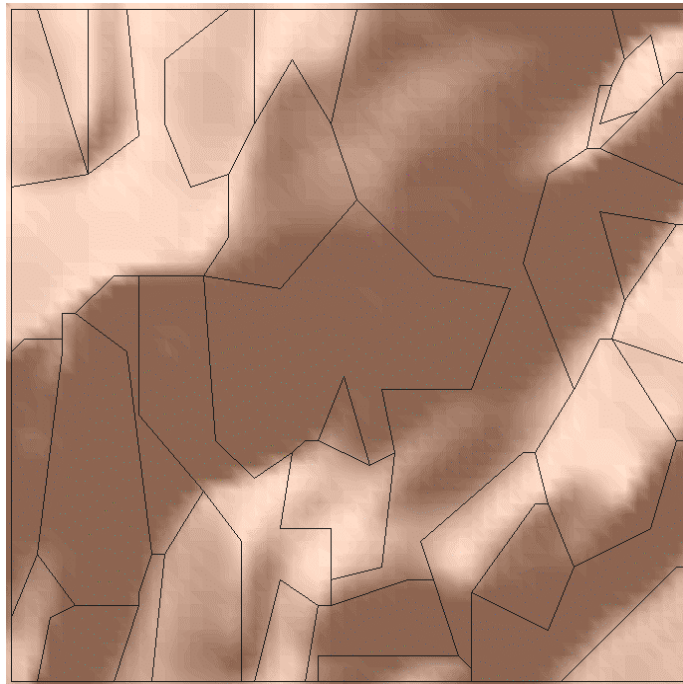
La figure 117 correspond à une représentation d'un fichier de facettes de montagne pour les Alpes, désigné sous le nom « Alpes5.ssl ». Il couvre une zone de 5 kilomètres carrés. La taille du fichier est de 5 Ko. Les données sont au format FTV1 vectoriel.



Sources : C.T & T.K, FTR&D, 2002.

Figure 117 : Visualisation d'un fichier de facettes de montagne dans les Alpes

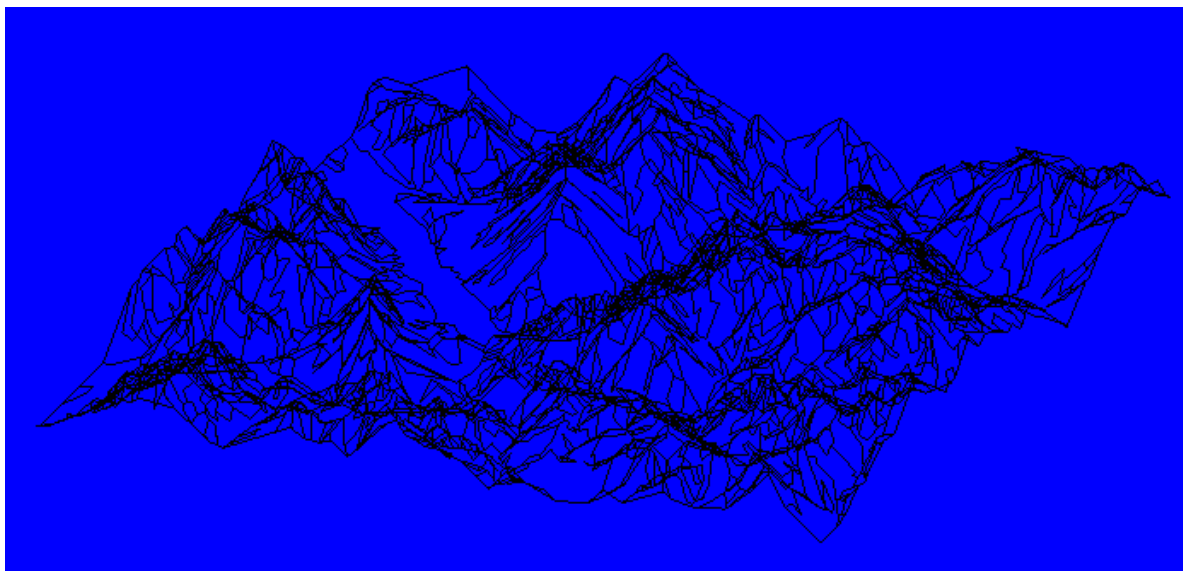
La figure 118 représente le fichier de facettes pour la même zone dans les Alpes. On a superposé le fichier d'altitude, le MNT au pas de 100 mètres (France.alt) ayant servi à générer ce fichier de facettes de montagnes.



Sources : C.T & T.K, FTR&D, 2002.

Figure 118 : Visualisation du fichier de facettes de montagnes et du MNT

La figure 119 représente un fichier de facettes de montagnes pour une surface de 20 kilomètres carrés. Les données sont visualisées en trois dimensions à l'aide de la librairie graphique open source *OpenGL*.



Sources : O.G & T.K, FTR&D, 2002.

Figure 119 : Visualisation en 3D d'un fichier de facettes de montagnes

2.2.6 – Les clutters 17 thèmes

Ce type de données géographiques a été fourni à FTR&D en 2002. Le fournisseur de ces bases de données géographiques est la société GEOIMAGE.

Les données géographiques contenues dans ces fichiers correspondent au « clutter », c'est-à-dire à la carte d'occupation du sol. Les données contenues dans le clutter décrivent la nature du sursol dans chaque maille (type d'habitat, type d'espaces ouverts, etc.). Le format des données est donc un format raster. Le suffixe utilisé est « *.sol ».

Les données géographiques sont stockées de deux manières différentes dans le Système de Gestion de Bases de Données Relationnelles de FTR&D dédié aux BD Géographiques :

- Des données géographiques rangées sur autant de couches (17) que de classes d'occupation du sol :

Chaque valeur contient le pourcentage du thème dans la maille (0 à 100).

En cas d'absence de données pour cette maille, toutes les valeurs de thèmes sont à 0.

- Des données géographiques rangées sur une seule couche :

Chaque valeur contient le numéro du thème dominant dans la maille (1 à 17).

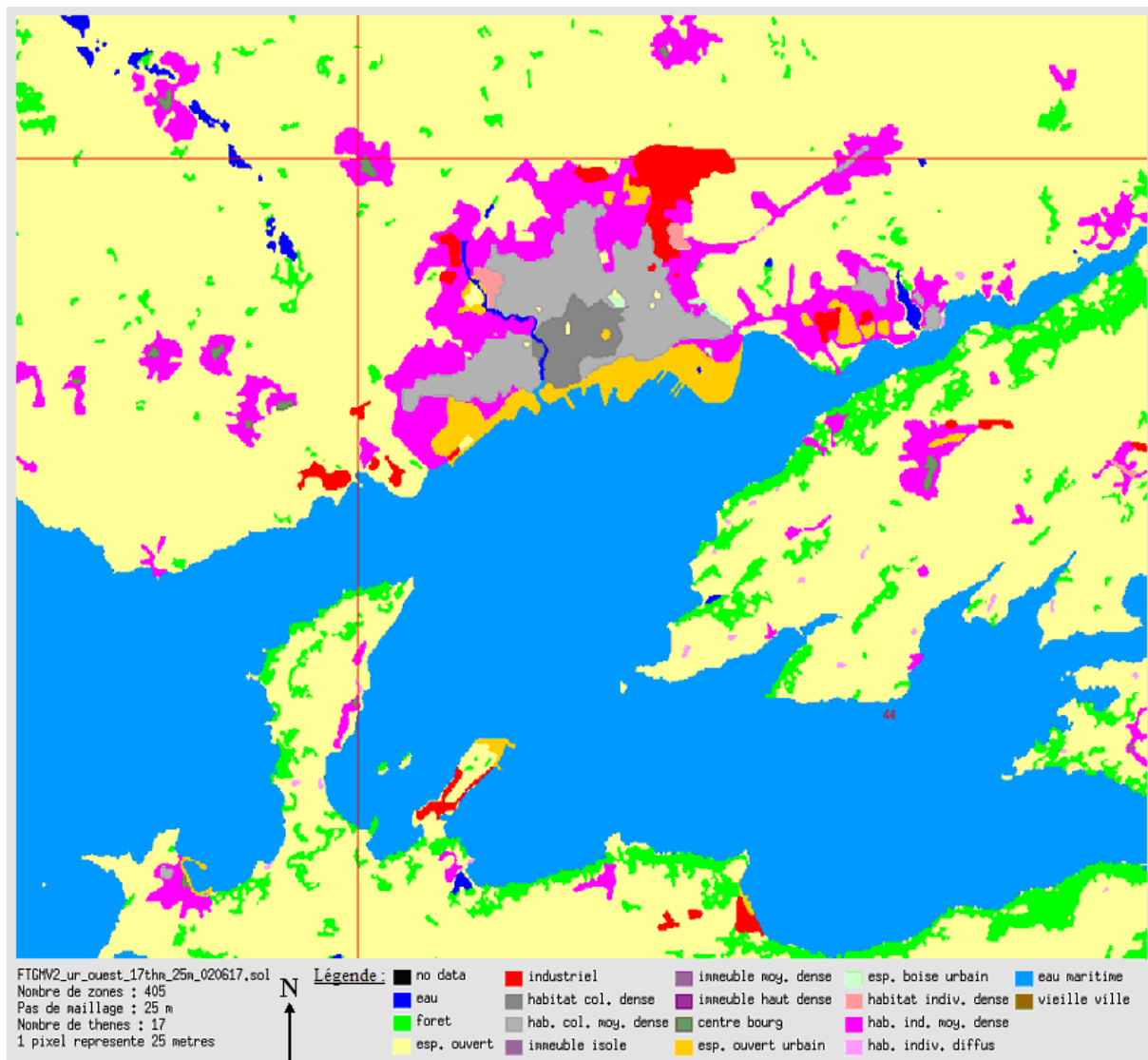
Le n° 0 correspond à une absence de données.

Les 17 classes d'occupation du sol :

n° du thème	Désignation
0	pas de données
1	eau
2	Forêt
3	Espace ouvert, open
4	industrie
5	habitat collectif dense
6	habitat collectif moyennement dense
7	immeuble haut isolé
8	groupe d'immeubles hauts moyennement dense

n° du thème	Désignation
9	groupe d'immeubles hauts dense
10	centre bourg
11	espace ouvert intra urbain
12	espace boisé intra-urbain
13	habitat individuel dense
14	habitat individuel moyennement dense
15	habitat individuel diffus
16	eau maritime
17	vieille ville

La figure 120 présente la visualisation du clutter 17 thèmes pour la zone côtière de la rade de Brest.



Sources : C.T & T.K, FTR&D, 2002.

Figure 120 : Visualisation du clutter 17 thèmes pour la rade de Brest

2.2.8 – Les fichiers de données maillées de sursol 100 mètres localisées

Ce sont des fichiers de données géographiques qui fournissent des informations sur la nature et la hauteur du sursol dans chaque maille.

Les fichiers de données sursol localisé au pas de 100 mètres sont désignés sous le terme « LOC » dans le SGBD géographique de FTR&D. Le terme « LOC » signifie « données géographiques localisées », c'est-à-dire des données géographiques dont on connaît la localisation (X,Y) de manière assez précise.

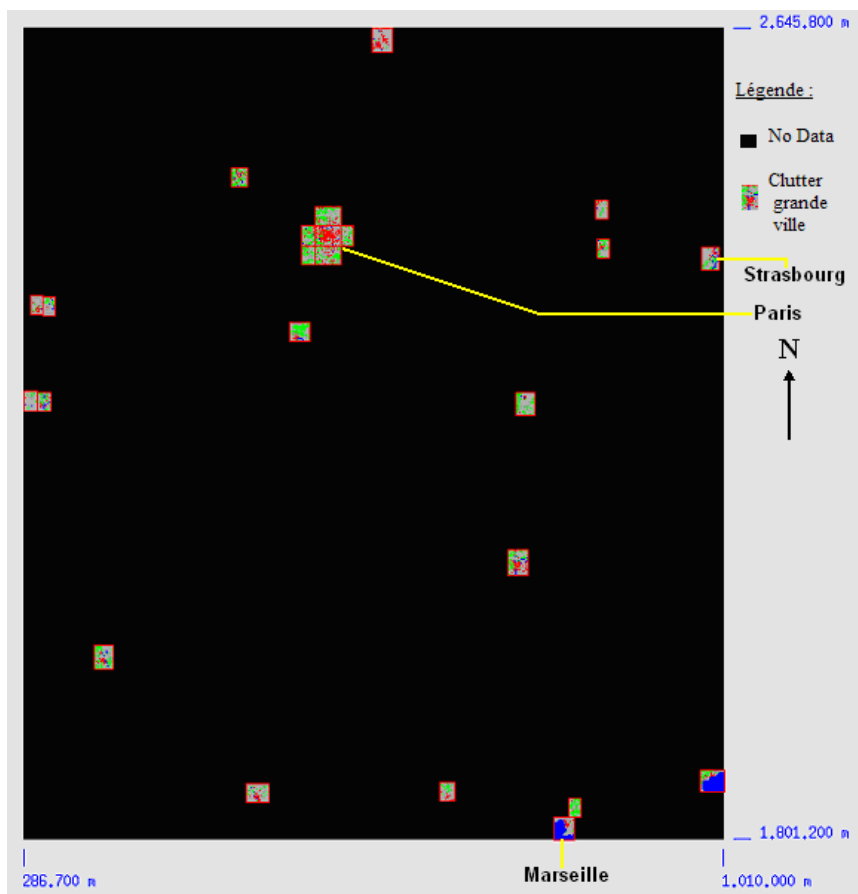
Ces données géographiques ne couvrent pas l'ensemble de la France, seules les grandes agglomérations sont couvertes. La résolution des données est de 100 mètres. Le format de stockage des données est le FTV1 maillé.

FTR&D ne possède que la description géographique LOC pour les grandes agglomérations françaises (figure 121). Ceci est dû au fait que lors de l'acquisition de ces données géographiques auprès de l'IGN, au début des années 90, le coût des données géographiques raster avec une résolution de 100 mètres, était assez élevé. L'opérateur national doit disposer de données géographiques maillées couvrant l'ensemble du territoire français, ce qui implique un coût d'achat important. Pour la description de la France entière, le choix de données raster à une résolution plus faible (400 mètres) s'est donc logiquement imposé. Ceci correspond aux bases de données DELOC 400 mètres que nous présenterons au paragraphe suivant.

Les données géographiques contenues dans le fichier : 7 couches d'informations sont stockées dans ce type de fichier :

<u>couche</u>	<u>contenu</u>
C1	% de bâti
C2	% de bois
C3	% d'eau
C4	% des hauteurs de sursol ≥ 10 mètres
C5	% des hauteurs de sursol ≥ 20 mètres
C6	% des hauteurs de sursol ≥ 40 mètres
C7	hauteur maximale de sursol dans la maille

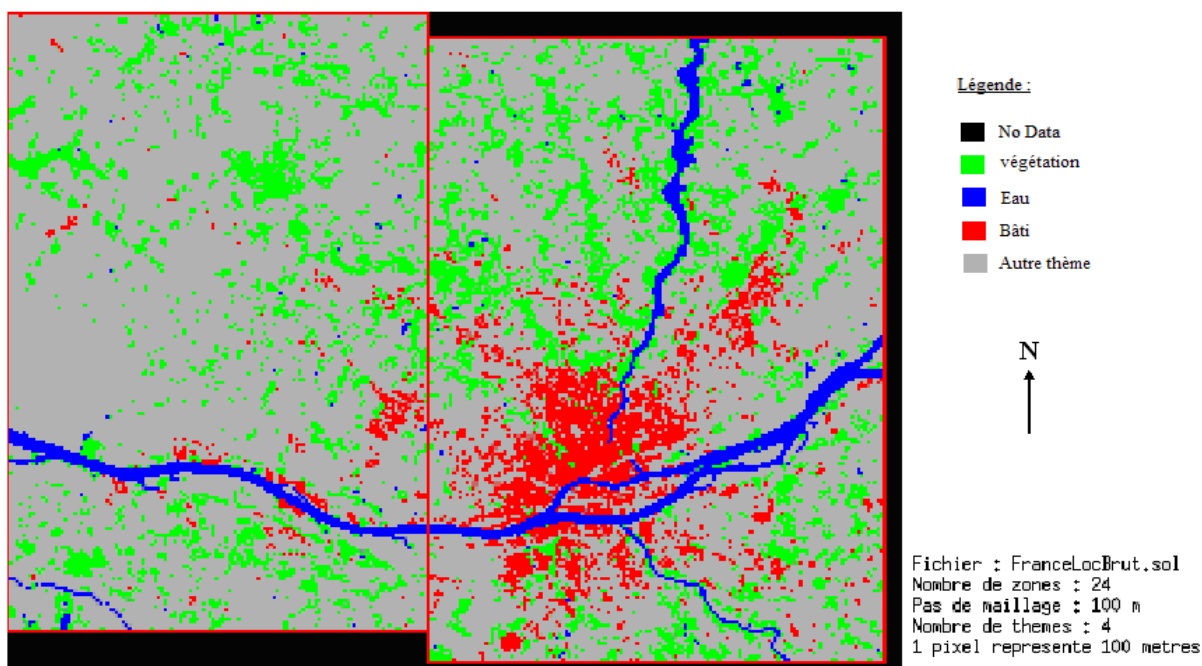
La figure 121 représente une vue générale du fichier de sursol localisé pour toute la France. On voit bien que seules les grandes agglomérations sont couvertes. Ce fichier est stocké dans la BD géographique sous le nom « FranceLocBrut.sol ». La taille du fichier est de 13 Mo. Pour chaque maille, seul le thème dominant est représenté parmi les 3 premiers (% de bâti, % de bois, % d'eau).



Sources : C.T & T.K, FTR&D, 2002.

Figure 121 : Visualisation du fichier de sursol localisé pour toute la France :
Données de sursol des 16 plus grandes agglomérations françaises

La figure 122 représente le fichier de données de sursol au pas de 100 mètres pour l'agglomération de Nantes.



Sources : C.T & T.K, FTR&D, 2002.

Figure 122 : Visualisation des données de sursol au pas de 100 mètres pour la ville de Nantes

2.2.9 – Les fichiers de données maillées de sursol 400 mètres délocalisées

Ce sont des fichiers de données géographiques qui fournissent des informations sur la nature et la hauteur du sursol dans chaque maille.

Les fichiers de données sursol délocalisé au pas de 400 mètres sont désignés sous le terme « DELOC » dans le SGBD géographique de FTR&D. Le terme « DELOC » signifie « données géographiques délocalisées », c'est-à-dire des données géographiques dont on ne connaît la localisation (X,Y) de manière précise.

Ces données géographiques couvrent l'ensemble de la France (figure 123).

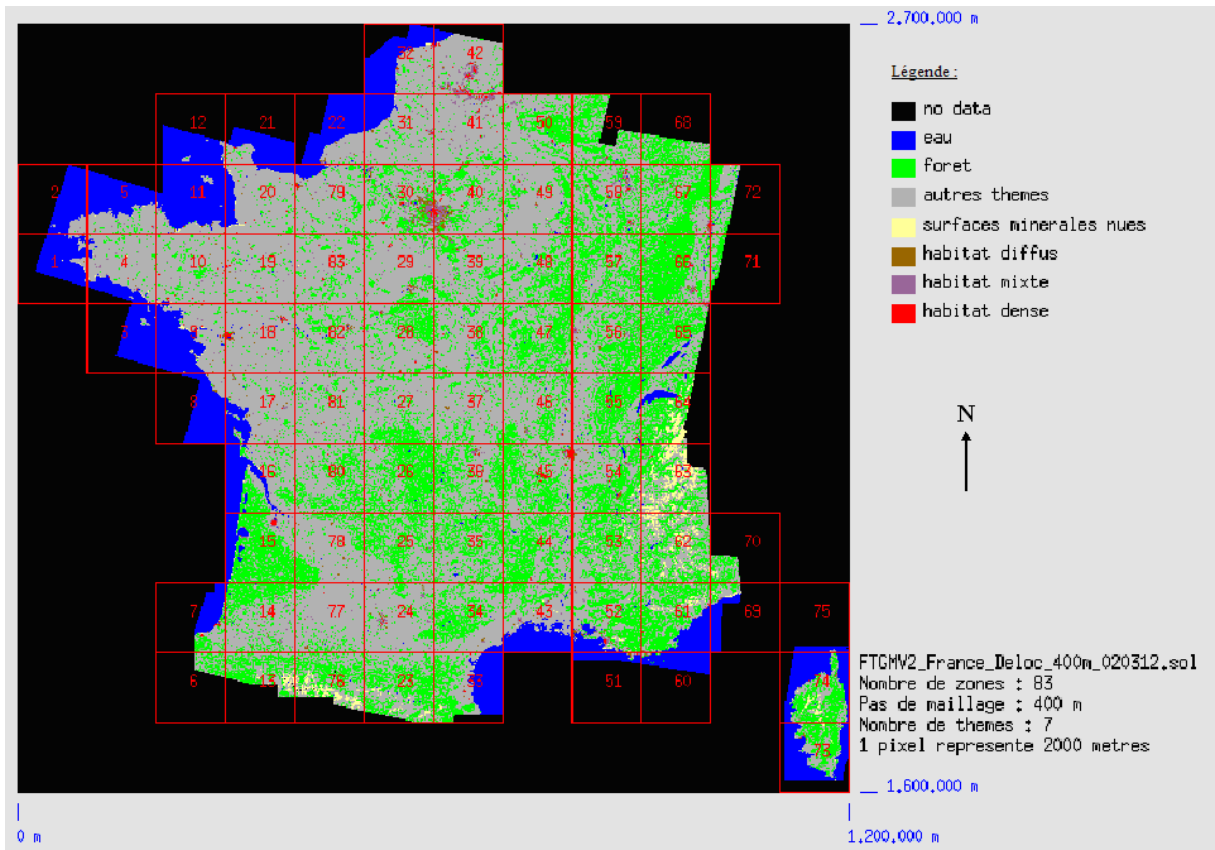
La résolution des données est de 400 mètres pour la France. Elle peut être différente pour d'autres pays : en Belgique, par exemple, le pas de maille utilisé est de 100 mètres.

Le format de stockage des données est le FTGMV2.

Les données géographiques contenues dans le fichier : 7 couches d'informations sont stockées dans ce type de fichier :

<u>couche</u>	<u>contenu</u>
C1	% d'eau
C2	% de forêt
C3	% d'autres thèmes
C4	% surfaces minérales à nu
C5	% d'habitat diffus
C6	% d'habitat mixte
C7	% d'habitat dense

La figure 123 représente la visualisation du fichier de données géographiques de sursol délocalisé, au pas de 400 mètres, pour l'ensemble de la France. Le fichier est désigné sous le nom « France_Deloc_400m_020312.sol » dans le SGBD géographique de FTR&D. Pour chaque maille, seul le thème dominant est représenté. Le format de stockage des données est le FTGMV2. La taille du fichier est de 36 Mo.



Sources : C.T & T.K, FTR&D, 2002.

Figure 123 : Visualisation du fichier de données géographiques de sursol délocalisé au pas de 400 mètres sur l'ensemble du territoire français

2.2.10 – Les fichiers de données maillées finement, au pas de 1 à 10 mètres

Ces données servent à remplacer les données contours de base vectoriels en entrée des modèles de propagation. Leur utilisation permet de réduire fortement les temps de calcul.

Le pas de maillage est compris entre 1 et 10 m, suivant la préférence entre la précision ou la rapidité. Les fichiers sont stockés au format FTGMV2. Le suffixe utilisé pour ces données est « *.tah ».

Les données maillées finement sont utilisées dans les modèles de propagation du type micro et pico cellulaires, pour des zones géographiques urbaines (urbain dense, très dense et indoor). Les modèles de propagation utilisant les données maillées finement correspondent au modèle à lancers de rayons, au modèle à tracés de rayons, au modèle micro cellulaire – CNET et au modèle de pénétration.

Les données géographiques contenues dans le fichier : 3 couches d'informations sont stockées dans ce type de fichier :

couche	contenu
C1	altitude Z du sol
C2	altitude Z_H du sursol
C3	nature du sursol (thème dominant)

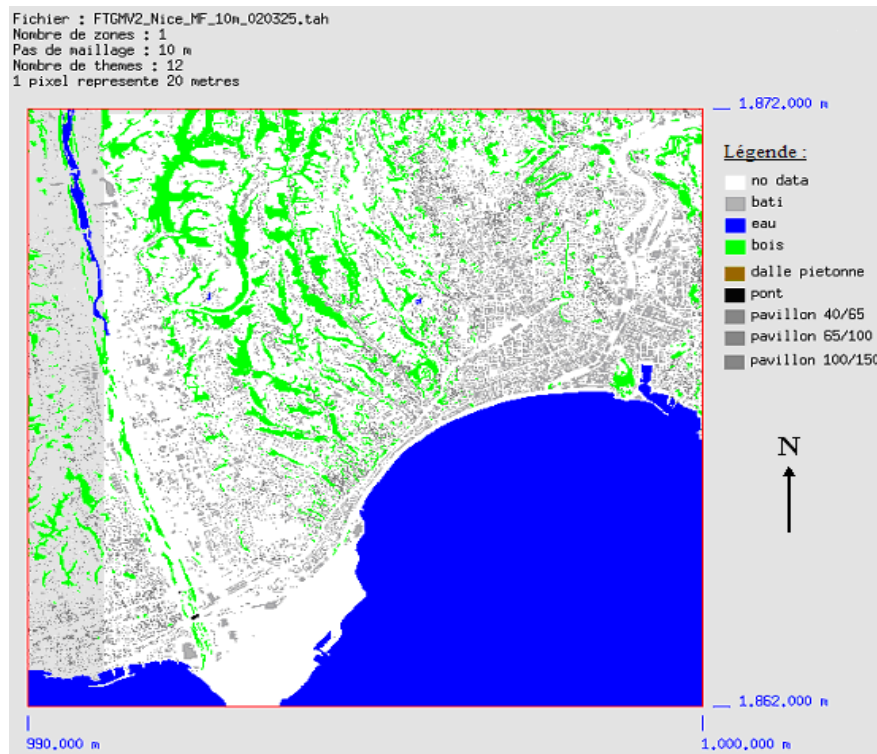
Les 9 classes d'occupation du sol :

n° du thème	désignation
0	NO_DATA
5	BATI
6	EAU
7	BOIS
8	DALLE_PIETONNE

n° du thème	désignation
9	PONT
10	PAVILLON_40_65
11	PAVILLON_65_100
12	PAVILLON_100_150

Cette classification correspond à la codification déjà utilisée pour les contours de bases vectoriels du sursol.

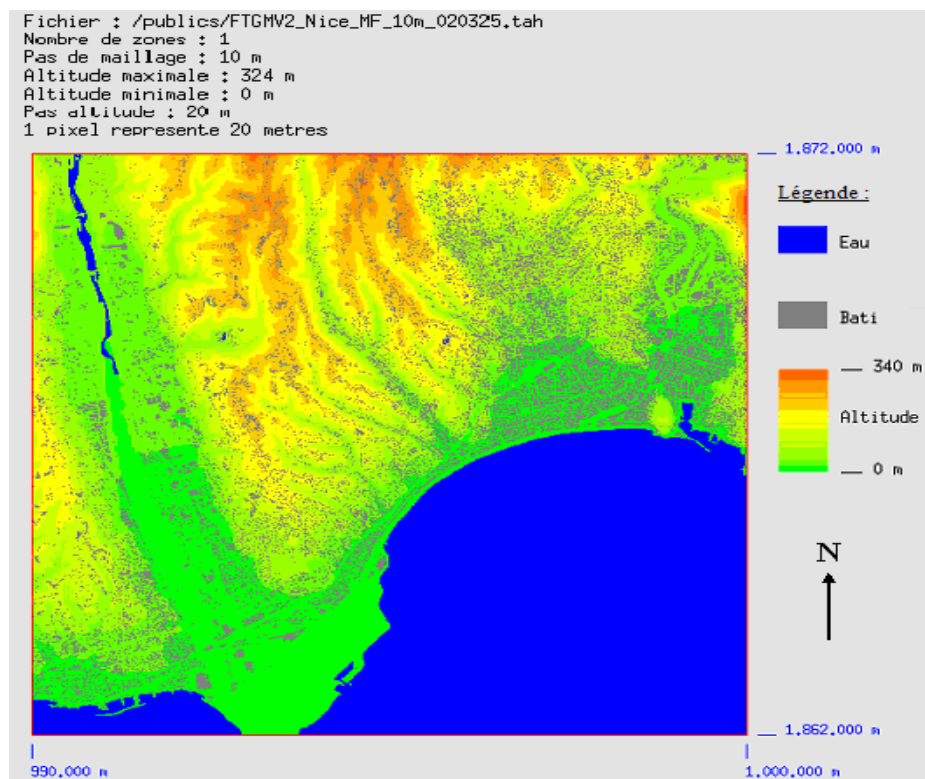
La figure 124 représente le fichier prénommé « FTGMV2_Nice_MF_10m_020325.tah ». Il couvre l'agglomération de Nice. Ce fichier contient la couche d'information C3 (nature du sursol).



Sources : C.T & T.K, FTR&D, 2002.

Figure 124 : Visualisation du fichier d'occupation du sol (couche C3) au pas de 10 mètres pour la ville de Nice

La figure 125 représente les couches d'informations C1 (altitude) et C3 (nature du sursol, avec un regroupement de thèmes).



Sources : C.T & T.K, FTR&D, 2002.

Figure 125 : Visualisation du fichier d'occupation du sol (reclassification de la couche C3) et de l'altitude (couche C1) au pas de 10 mètres pour la ville de Nice

2.3 - Les formats connus et propriétaires des données géographiques

Parmi les formats standard actuels on trouve notamment des fichiers au format ASCII, ou bien encore des fichiers dans des formats standard dédiés aux SIG du marché (le format vectoriel shapefile dédié au SIG ArcView, le format Mif/Mid dédié au SIG MapInfo). Ces formats sont expliqués plus en détail en annexe.

2.3.1 - Le format Graphe

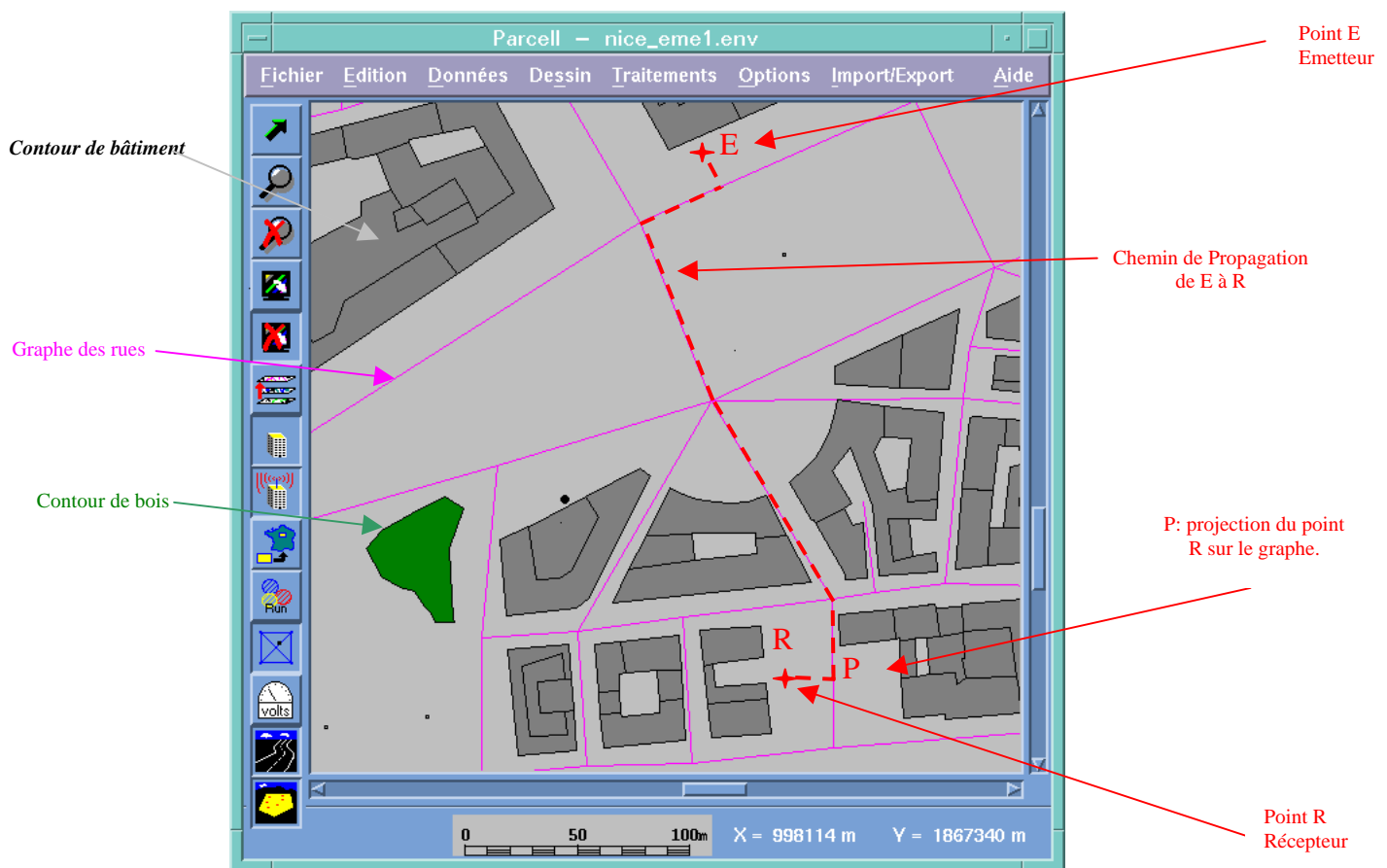
Ce type de format existe depuis une trentaine d'années, et est utilisé dans de nombreux domaines comme la Géomatique (sous SIG), en Architecture (sous Autocad), ainsi qu'en Mathématique (Topologie).

Les fichiers au format GRAPHE contiennent la description géographique du graphe des rues en milieu urbain.

Ces graphes sont constitués d'un ensemble de sommets (carrefours, ou points particuliers des rues) et d'arcs qui les relient (représentant les rues en milieu urbain).

Les graphes sont non orientés : l'arc reliant le sommet s1 au sommet s2 est le même que celui reliant s2 à s1.

Les graphes de rues sont principalement utilisés pour les études de propagation radio pour la téléphonie mobile en milieu micro cellulaire urbain.



Sources : T. K, FTR&D, 2002.

Figure 126 : Visualisation du graphe des rues

2.3.2 - Les formats propriétaires FT

Nous présentons très brièvement les formats propriétaires¹⁶⁶ de France Télécom, car ils varient fortement des formats standard du public.

Remarque : L'utilisation de formats propriétaires rend nécessaire la création de convertisseurs de données géographiques (conversion de formats), afin de pouvoir utiliser les données géographiques dans d'autres applications et logiciels standard tels que les Systèmes d'Information Géographique (ArcGIS, Géoconcept), ou les plateformes d'ingénierie radiomobiles standard (NetActPlaner, Planet). Les conversions se sont faites vers des formats informatiques standards (ASCII, BIL, DXF, etc.) ainsi que dans des formats géographiques classiques pour les SIG (SHP, etc.). L'ensemble des conversions a été synthétisée au sein d'un logiciel de conversion de données géographiques : le logiciel GDGM¹⁶⁷.

Le format FTV1 maillé

Les fichiers maillés au format FTV1 sont des fichiers binaires qui contiennent des données géographiques divisées en zones.

Une zone (ou tuile) est un ensemble de valeurs contenues dans un rectangle, ayant une certaine étendue, couvrant une certaine zone géographique. Un fichier FTV1 maillé peut contenir une ou plusieurs tuiles (zones géographiques). Ces zones ont été définies par tuilage (zonage) des données géographiques. Il est possible que deux zones se recoupent : certaines données sont alors dupliquées. Les zones peuvent avoir des tailles différentes.

Types de données contenues : Les fichiers FTV1 maillés contiennent un certain nombre de couches d'informations géographiques : Clutter, MNS, l'altitude dans la maille, type de sursol, hauteur du sursol.

Le format FTV1 vectoriel

Les fichiers au format FTV1 vectoriels contiennent les contours de base (grands bâtiments, bois, eau, dalle piétonne, pont), ou des pavillons, ou les axes de routes.

Un fichier FTV1 vectoriel contient une ou plusieurs zones. Une zone est un ensemble de contours de bases contenus dans un rectangle.

Description d'un objet géographique vectoriel :

Prenons l'exemple d'un objet géographique du type contours de base bâti. Le bâtiment est composé de plusieurs ailes de hauteur différentes, et peut contenir une cour intérieure au centre du bâtiment. On aura une représentation géométrique du bâtiment sous la forme de plusieurs polygones. L'objet bâtiment comportera différents types d'attributs : coordonnées des points du contour, hauteur du bâti, etc.

Le nombre de points d'un polygone, d'un contour de base vectoriel correspond au nombre de quadruplets (Xi, Yi, Zi, Hi). Xi et Yi sont les abscisses et ordonnées du sommet, Zi l'altitude au sol et Hi la hauteur du sommet à cet endroit.

¹⁶⁶ Le détail des formats de données propriétaires FT ne peut être divulgué en dehors du Groupe France Télécom (clause de confidentialité).

¹⁶⁷GDGM : logiciel de conversion de données géographiques dans différents formats. Logiciel propriétaire FTR&D développé en 2002 par Thierry Klein, avec la participation de C. Turck (formats dédiés aux SIG).

Le format FTGMV2

FTGMV2 est l'abréviation de « France Télécom Géographie Maillé Version 2 ». Le format FTGMV2 ne s'applique qu'aux données maillées.

Ce sont des fichiers binaires qui contiennent :

- un en-tête en ASCII (description du fichier, des couches et des zones),
- des données sous forme binaire, regroupées par couche.

Une zone est un ensemble de mailles contenues dans un rectangle.

Le format FTGMV2 est une version améliorée du FTV1 maillé.

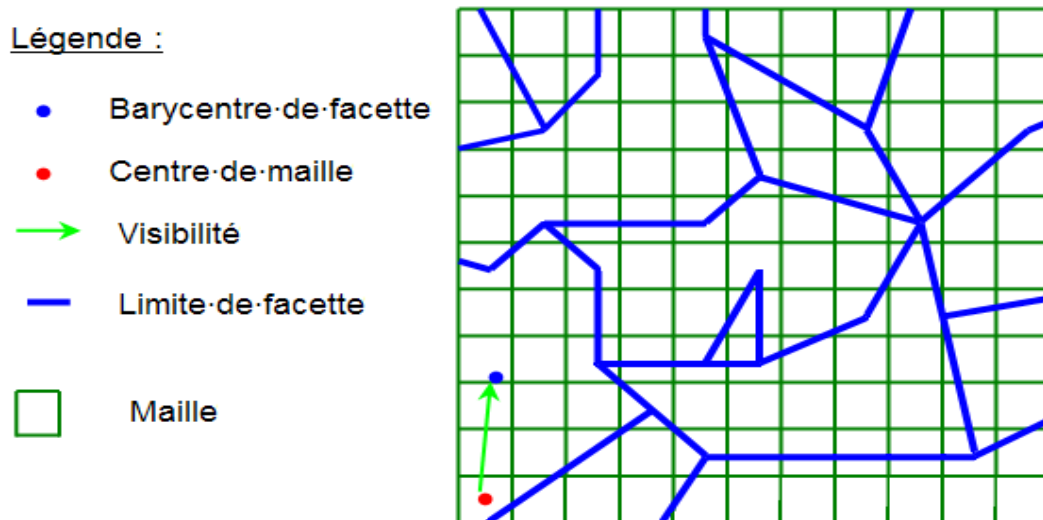
Le format facettes de montagnes (FCT)

Les fichiers au format FCT contiennent les facettes en visibilité de chaque maille.

Ils sont générés par un logiciel FT à partir de :

- un fichier de facettes montagneuses au format FTV1 vectoriel,
- un fichier de données maillées de relief (MNT).

Le format FCT contient pour chaque maille de la zone couverte les caractéristiques des facettes dont le barycentre est en visibilité optique directe avec le centre de la maille.



Sources : C.T & T.K, FTR&D, 2002.

Figure 127 : Visualisation des facettes de montagnes

2.3.3 – Types de structures des données géographiques

Nous allons faire un rapide rappel à propos de la structure des données géographiques utilisées.

La branche Recherche et Développement du groupe France Télécom, FTR&D, est chargée de l'étude des besoins de l'opérateur en terme de bases de données géographiques.

Les données géographiques sont achetées par l'opérateur auprès des fournisseurs de Bases de Données Géographiques tels que l'Institut Géographique National (IGN), la société GEOIMAGE ou bien encore la société ISTAR et la société SIRADEL, qui sont deux sociétés spécialisées dans la prestation de données géographiques auprès des opérateurs de télécommunications. Ces données leurs sont fournies dans des formats standard.

Les données géographiques classiquement utilisées par l'opérateur dans ses outils d'ingénierie radiomobile peuvent être classées en deux grandes catégories : les données géographiques dans les formats standards du marché et les données géographiques dans les formats propriétaires conçus par France Télécom pour ses besoins propres.

2.3.3.1 – Les données bitmap

Les données géographiques du type bitmap correspondent à des images. Les données sont décrites pixel par pixel, et importées dans un fichier binaire sous un format standard. Il y a une seule image par fichier. Les images peuvent être en couleurs, en niveaux de gris ou monochromes.

Elles correspondent à : des photographies aériennes, des images satellites, des images scannées de plans papiers, etc.

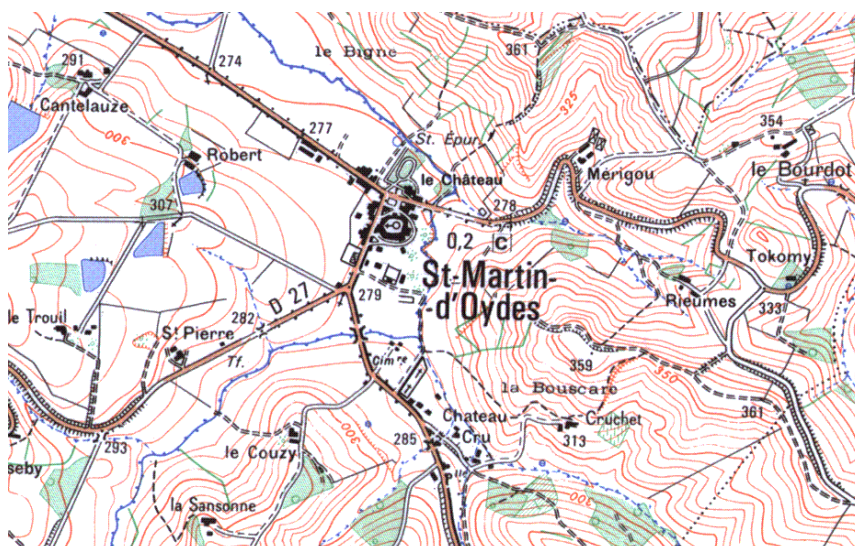
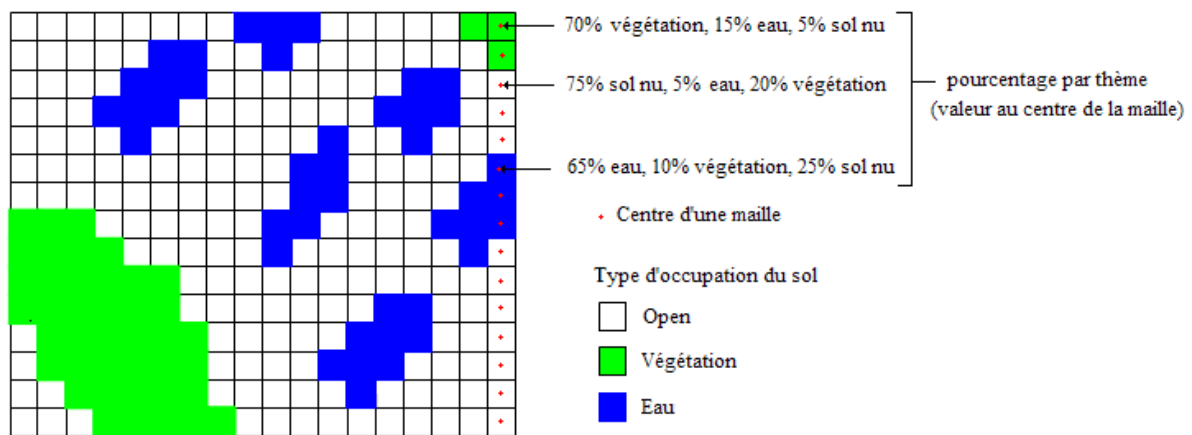


Figure 128 : Visualisation de données géographiques bitmap : image scannée de la carte topographique de la commune de Saint-Martin d'Oydes dans le département de l'Ariège.

2.3.3.2 – Les données maillées

Ce sont des données géographiques échantillonnées sous la forme d'une grille composée de mailles. La zone couverte est donc subdivisée en un ensemble d'unités élémentaires qui ont toujours la même taille : des mailles. La position des centres ou coins des mailles est définie dans des fichiers, accompagnée de certains attributs correspondant à chaque point, ou à une moyenne statistique sur la maille entourant chaque point.

Les attributs peuvent être : l'altitude du terrain, la hauteur moyenne du sursol dans la maille, le type d'occupation du sol dans la maille (en pourcentage maximal), l'affaiblissement radioélectrique calculé dans la maille, etc.



Sources : C. Turck, LIV, 2003.

Figure 129 : Exemple de données géographiques maillées

Il existe également des données géographiques échantillonnées sous la forme d'un maillage triangulaire, comme c'est par exemple le cas pour les Modèles Numériques de Terrain. Pour le maillage triangulaire on dispose également d'un fichier de mailles indiquant les numéros des trois coins composants chaque maille, ainsi que les numéros des trois mailles voisines.

2.3.3.3 – Les données vectorielles

Ce sont des données géographiques composées d'objets géographiques vectoriels décrits par la position exacte de leurs points caractéristiques dans l'espace (point, ligne, polygone, rectangle, contour de facettes, etc.).

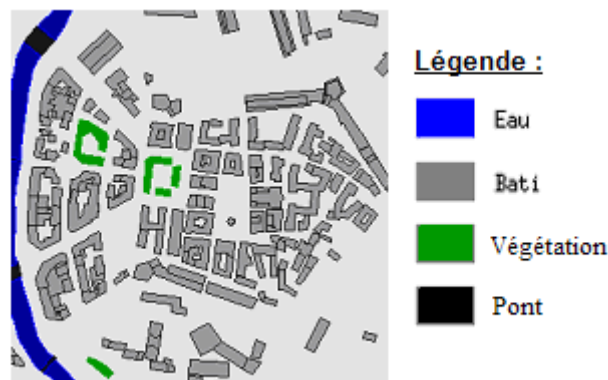
Chaque objet est représenté par un ou plusieurs points, segments de droite, ou polygones. Les valeurs renseignées sont celles des extrémités des lignes, c'est-à-dire les valeurs pour les points, de coordonnées X, Y.

La zone couverte est divisée en un ensemble d'objets vectoriels (bâtiments, bois, plans d'eau, etc.).

Chaque objet possède en plus des coordonnées des points, des attributs ou des informations complémentaires. Ces données géographiques vectorielles sont souvent décrites en 3 D (un bâtiment par exemple), sauf si leur type ne correspond pas à un objet volumique (une route, une étendue d'eau), on a alors une description en 2 D.

Les attributs peuvent être :

- le type, le sous-type, correspondant aux classes d'occupation du sol ou d'utilisation du sol, comme par exemple : les pavillons, bâtiments, dalles, végétation, arbres, allées d'arbres, zones boisées, espaces verts, plans d'eau, lacs, cours d'eau, ponts, axes routiers, axes ferroviaires, limites administratives, frontières, côtes, régions, départements, villes, communes, arrondissements, quartiers, îlots, points de mesures, trajets de mesures, zones de trafic radio, zone de couverture de champ radio, zone de même visibilité optique, zone de même pente, zone de même altitude, etc.,
- un toponyme (le nom des villes par exemple),
- un logo (pour les enseignes de magasins en ville),
- des ordres de grandeur (taille de bâtiments),
- le type de matériau (les matériaux de constructions des bâtiments),
- une valeur de champ (la puissance en décibels au point de mesure),
- etc.

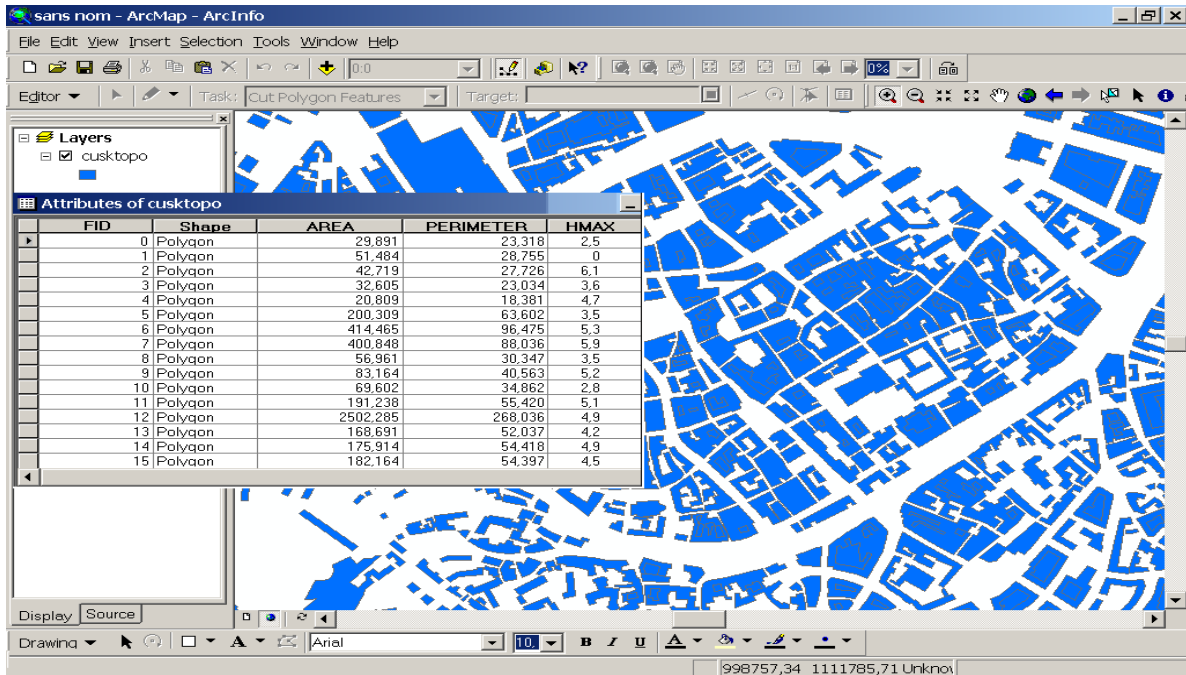


Sources : C. Turck, FTR&D, 2003.

Figure 130 : Visualisation de données géographiques vectorielles

2.3.3.4 – Les données attributaires

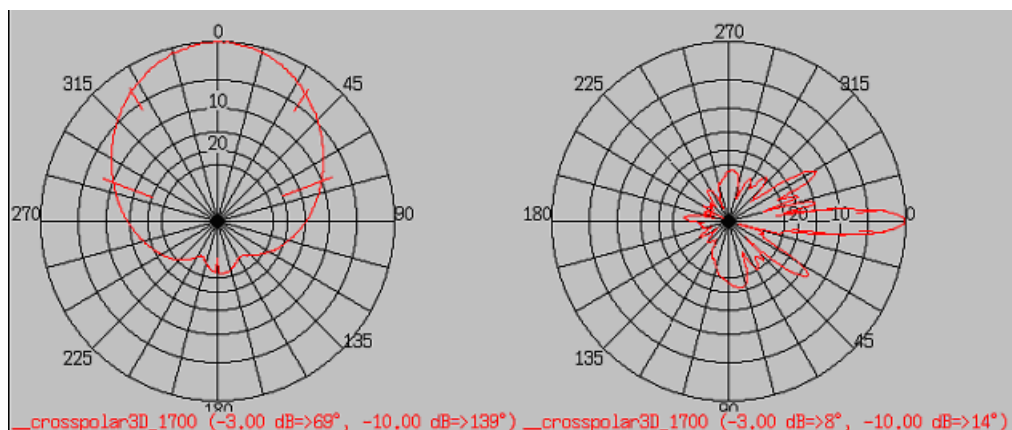
On range dans cette classe les données qui ne sont pas des données géographiques, ne sont pas géolocalisées (en X, Y, voir Z), mais sont des attributs d'autres données qui elles sont des données géographiques. Elles sont identifiées par leur nom, comme par exemple la colonne « Area » (la surface bâtie) dans le tableau attributaire de la couche d'information géographique provenant de la BD Topo de l'IGN (figure 131).



Sources : C. Turck, LIV, 2005.

Figure 131 : Visualisation de données attributaires : tableau de chiffres (attributs des bâtiments)

La visualisation graphique des lobes de propagation des ondes radio à partir d'un point précis où est localisé une antenne, sous la forme de diagramme en deux dimensions (figure 132) est un autre exemple de données appartenant aux données attributaires.



Sources : FTR&D, 2003.

Figure 132 : Visualisation de données attributaires : graphique (diagramme d'antenne)

2.3.4 – Intérêt de la compression des données géographiques maillées

La compression des données géographiques vectorielles n'est pas utilisée par FTR&D, car les fichiers vectoriels occupent une taille peu importante sur les disques durs. Elle ne sera donc pas abordée. Par contre, la compression des données géographiques maillées présente un grand intérêt pour l'opérateur. En effet, France Télécom, qui fut l'opérateur national, doit disposer de données géographiques couvrant l'ensemble du territoire français, ce qui représente énormément de zones géographiques à stocker dans une Base de Données géographiques.

L'accès au SGBDR (Oracle) gérant les différentes BD géographiques ne doit pas être perturbé (lenteur d'accès) par la présence de fichiers trop volumineux. De ce fait, le stockage des données géographiques maillées dans la Base de données dans des formats compressés, est intéressant. De tels outils de compression des données géographiques maillées existent dans les SIG (modèle de compression pyramidal, quadtree, ECW, MrSID, JPEG, etc.) ainsi que dans les logiciels de traitement d'images utilisés en télédétection tels que ErMapper, etc.

Le paragraphe ci-dessous présente les différentes techniques de compression de données géographiques maillées :

On distingue deux types de compression des données géographiques maillées, à savoir la compression sans perte ou avec perte d'information.

- La compression « sans perte » a pour objectif de générer un clone exact de l'image originale. Pour cela, les algorithmes se basent sur les répétitions et la redondance d'information rencontrées au sein du jeu de données pour procéder à la compression. Parmi les techniques de compression sans perte, on peut citer le *Run Length Encoding* (RLE), le codage Lempel-Ziv-Welch (LZW) utilisé dans le format GIF ou bien encore le codage selon Huffman. Les taux de compression sont limités à des facteurs de 2-3:1 et leur efficacité est supérieure pour des images ayant peu de couleurs.

- La compression dite « avec perte » a pour objectif de compresser l'image tout en acceptant une légère perte d'information. Pour cela, les algorithmes se basent sur la redondance psycho visuelle inhérente à l'image afin de comprimer l'information contenue dans l'image. Ce genre de compression est idéal pour toutes les applications dans lesquelles on utilise l'information visuelle de l'image. Le format JPEG, rendu populaire par son utilisation dans les logiciels de traitement d'image photographique tels que Photoshop, utilise une méthode de compression avec perte. La compression utilisée avec JPEG est basée sur le principe suivant : l'oeil humain étant plus sensible aux variations de luminosité qu'aux variations de couleurs, on transforme l'image selon la luminance et la chrominance. On peut ainsi perdre de l'information concernant la chrominance sans que cela soit visible. Le format JPEG qui est un standard largement répandu a cependant vieilli et présente un certain nombre de lacunes importantes pour le domaine de la Télédétection et des SIG : la vitesse de compression/décompression n'est pas bonne et les taux de compression sont insuffisants. Le format JPEG a donc été remplacé par le format JP2 proposé dans la norme JPEG 2000¹⁶⁸. La norme JPEG 2000 est basée sur les techniques de compression par ondelettes qui résout les problèmes évoqués : les performances sont excellentes même sur des supports lents. La norme JPEG 2000 a également intégré d'autres principes intéressants pour les SIG et la Télédétection. Elle permet une

¹⁶⁸ <http://www.jpeg2000info.com>.

compression par régions d'intérêts, une transmission progressive pour une reconstitution à résolution croissante, idéal pour la consultation d'images volumineuses sur un support physique lent ou sur Internet. Les taux de compression conseillés pour une compression par ondelettes varient en fonction du type d'application et du type d'images. Pour une photographie aérienne en 24 bits, on utilise généralement un taux de compression de 25:1 pour une impression de très haute qualité, et un taux pouvant aller jusqu'à 100:1 pour de la visualisation dans un logiciel de SIG ou avec un navigateur. Avec ces taux de compression, la perte de qualité visuelle est imperceptible et le gain de volume et de performance extrêmement intéressants.

En attendant que la norme JPEG 2000 soit largement adoptée et intégrée dans les logiciels, la méthode de compression est actuellement sujette à de nombreux développements dans les domaines du multimédia, de l'imagerie médicale et de l'imagerie aérienne et satellitaire. Plusieurs algorithmes et formats basés sur cette technologie sont disponibles. Dans le domaine de l'imagerie aérienne et satellitaire, deux sociétés Lizardtech (format MrSID : *Multiresolution Seamless Image Database*) et ErMapper (format ECW: *Enhanced Compression Wavelets*) proposent actuellement des outils de compression basés sur cette technologie ainsi qu'un ensemble de plug-ins gratuits pour des logiciels de SIG et de Télédétection courants (ArcView, ArcInfo, GéoConcept, MapInfo, Imagine, ErMapper, , etc.), pour des outils de CAO (Autocad, etc.), des logiciels de traitement d'image (Photoshop, etc.) et pour les navigateurs internet permettant la visualisation de données comprimées avec cette technique. Les compressions obtenues sont très intéressantes.

Les Systèmes d'Information Géographique et la Télédétection sont des domaines qui doivent gérer, analyser et visualiser des images de très grande taille, en complément des autres types de données (données en mode vecteur ou objet, données thématiques, etc.). Il s'agit d'un véritable défi scientifique et technologique pour intégrer ces images dans une variété croissante de thématiques intégrant la composante spatiale et pour les transformer en information pertinente pour la prise de décision. Ces deux domaines ont un avenir certain dans un contexte d'utilisation croissante, par l'intermédiaire d'Internet, de SIG collaboratifs (interopérabilité, mobilité, télétravail, etc.), et il faudra trouver des solutions intelligentes pour pouvoir faire passer ces gros volumes de données sur des lignes téléphoniques et sur toute sorte d'appareils électroniques portables à capacité réduite (ordinateur portable, PDA, téléphones mobiles). Un des objectifs sera d'apporter au grand public des services exploitant la composante spatiale. Pour cela, toutes les découvertes scientifiques dans le domaine de la compression de données sont extrêmement intéressantes. On peut parler de révolution pour la compression d'images par ondelettes parce qu'elle permet d'envisager des choses jusque là totalement irréalistes. Dans ce paragraphe, plusieurs formats ont été comparés en ne prenant en compte que le seul critère de la qualité visuelle des images comprimées. Cette comparaison montre une supériorité du format proposé dans la norme JPEG 2000 par rapport aux autres formats, que ce soit le format JPEG standard basé sur une ancienne technologie ou les formats ECW et MrSID basés sur une compression par ondelettes. Une comparaison plus poussée faisant intervenir d'autres critères comme le temps de codage, la quantité de mémoire nécessaire, le prix des outils de compression pourrait s'avérer intéressante. En plus des problèmes liés aux volumes croissants des images, il y a la notion de géoréférence qui est importante et le fait que certaines images sont multibandes (plus que les traditionnelles images couleurs). Les modèles numériques de terrain, en mode image, ont la particularité d'être monobande mais avec des valeurs réelles v (valeur du pixel=altitude). A l'heure actuelle, les formats proposés pour la compression par ondelettes ne permettent pas de gérer ces images qui sont généralement codées en monobande 16 bits.

Image	Dimensions en pixels (nbre de bandes X pixels)	Taille non comprimée	Taille comprimée	Facteur de compression
Image satellite	7 x 9000 x 9000	567	22	25 : 1
Orthophoto couleur (23 cm²)	3 x 17000 x 17000	867	17	50 : 1
Carte topo scannée (24 bits)	3 x 260 x 14000 x 96000	100	2	50 : 1
Couverture orthophoto 50 cm	3 x 600000 x 300000	540	11	50 : 1

Source : EPFL, 1999.

Figure 133 : gains de volumes obtenus grâce à une compression appliquée à des données géographiques maillées

2.4 – Améliorations des données géographiques à l'aide du SIG : Vérifications et corrections des données. Créations de nouvelles données géographiques

Les termes exprimant la qualité des données géographiques sont qualitatifs et quantitatifs (Anne Puissant, 2003) :

- La qualité géométrique :

« La précision géométrique estime la fluctuation des écarts entre les positions nominales (positions dans le terrain nominal) et les positions contenues dans le jeu de données. Elle se décompose en deux types de précision : la précision composée des précisions de position ponctuelle et linéaire et la précision de forme. »

- La qualité sémantique :

« La précision sémantique représente la conformité des valeurs des éléments du jeu de données avec les valeurs de leurs homologues dans le terrain nominal. Elle porte sur la classification des objets, la codification des attributs et les relations entre les objets. Elle est très liée à l'exhaustivité. »

Les fichiers de données géographiques et radioélectriques (données techniques : type d'antenne, fréquence, mesures de champ radio sur le terrain, etc.), qui sont stockés dans une Base de Données, ont été analysés afin d'évaluer la qualité des données (qualité géométrique, résolution, sémiologie, coût, etc.) et de détecter les éventuelles erreurs et anomalies dans les données. Le logiciel SIG ArcInfo 8 nous a permis de détecter et corriger ces erreurs, soit automatiquement quand cela était possible techniquement, soit manuellement grâce aux outils d'édition des données (dans le SIG : module ArcMap, outil Edition).

Des améliorations ont ensuite été proposées : améliorations par corrections des erreurs des données elles-mêmes, soit améliorations par créations de nouvelles données géographiques (clusters bâtis, facettes de montagnes, MNT 25 m, reclassification de clutter, etc.) à l'aide du SIG [utilisation des opérations spatiales du type fusion de données, ajout de données (attributaires ou géographiques), etc.].

Lorsqu'on effectue des vérifications et des corrections des données géographiques à l'aide du SIG, des fichiers de comptes-rendus des anomalies détectées et des corrections apportées, sont créés et intégrés aux projets SIG en tant que données complémentaires, attributaires. Nous avons créé des tableaux récapitulatifs des différents traitements effectués sur les données : Les objets géographiques traités sont marqués d'un attribut : « correct », « corrigé », « modifié », « supprimé », « saisi ». Les objets géographiques sont alors visualisables avec des couleurs différentes, selon qu'ils aient été modifiés ou pas, corrigés ou pas. On peut effectuer un contrôle visuel de ces corrections, ou extraire un fichier contenant les caractéristiques des objets géographiques (corrigés ou pas, type de correction, mise à jour, date de traitement).

Dans le SIG, des paramètres sont disponibles afin de pouvoir configurer toutes ces vérifications et corrections et de les rendre plus ou moins sévères : seuil de distance pour la fusion de points voisins, tolérance de surface d'intersection de deux contours, etc.

2.4.1 – Vérifications et corrections des données géographiques vectorielles

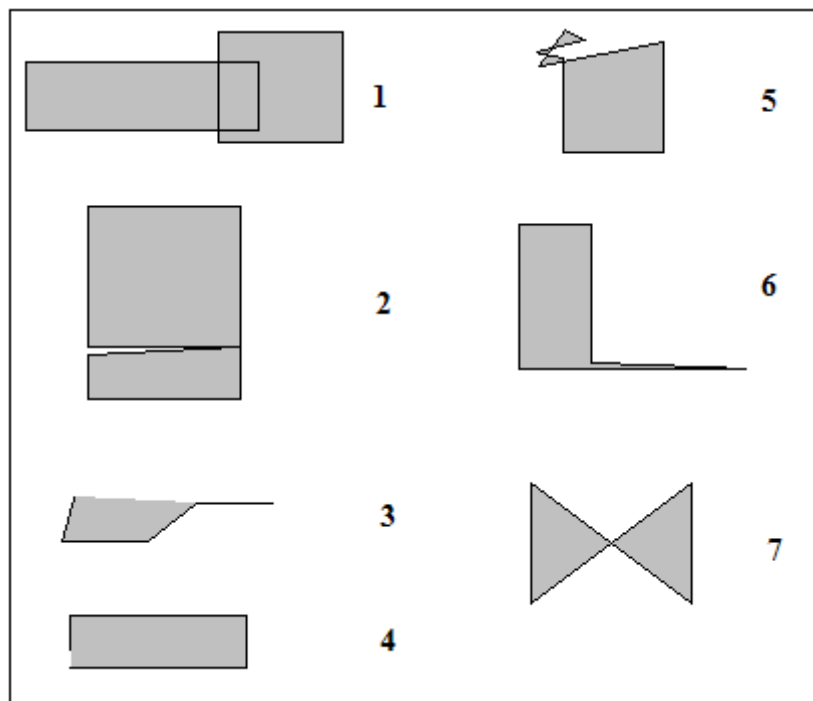
La détection automatique des erreurs a été faite à l'aide du SIG. En effectuant une requête spatiale [par « requête spatiale » on entend requête sur les données géographiques ; donc une requête se référant à leurs coordonnées cartésiennes (en X, Y)] ou parfois une requête par attribut, on détecte les contours anormaux : on effectue une requête sur la géométrie des objets géographiques de type polygone : on recherche les polygones qui ne sont pas fermés, ou qui ont une forme « en papillon » (inversion des coordonnées Y), qui se superposent, etc.

2.4.1.1 – Corrections à effectuer sur les contours

Les contours vectoriels correspondent à des contours de bâtiments, aux limites de zones boisées, aux limites de surfaces en eau, etc.

Nous avons effectués différents types de vérifications et de corrections sur les contours vectoriels (figure 134) :

- 3, 4, 6 : défaut de fermeture des contours (pas fermés, fermés plusieurs fois),
- 2 : fusion des points et segments de droites très proches (distance < précision de saisie des données),
- 7 : erreur dans le sens de description du contour (interne/externe),
- 5 : contours anormaux ou entrelacés (erreurs de saisie),
- 1 : contours fortement intersectés,
- contours intérieurs dupliqués en contours extérieurs,
- points et objets aberrants (altitude ou hauteur de l'objet aberrante, code inconnu).



Sources : C. Turck, FTR&D, 2002.

Figure 134 : Exemples de contours vectoriels anormaux

La vérification de la qualité des données géographiques (exactitude géométrique) s'effectue d'abord de manière automatique à l'aide du SIG. Puis une deuxième phase de vérification est

effectuée manuellement par l'opérateur pour corriger les erreurs ne pouvant pas être détectées automatiquement par le SIG.

Ainsi, certaines corrections à la suite de contrôles des données vectorielles seront automatiques alors que d'autres non. Les modes opératoires sont différents selon la catégorie de contrôles effectués :

- Contrôle des points rapprochés,
- Contrôle des contours mal fermés,
- Contrôle des altitudes aberrantes,
- Contrôle des contours superposés (le contour le plus petit est réduit à sa surface non adjacente),
- Contrôle des objets similaires (doublons).

Pour ce type de vérifications, qui sont facilement détectables, la correction est effectuée automatiquement par le SIG.

De plus, l'opérateur va pouvoir choisir si les géométries sont à corriger automatiquement sans son approbation, ou si il doit valider une correction pour que celle-ci soit prise en compte définitivement. Pour cela, le SIG stocke les géométries corrigées dans une structure intermédiaire, qui va permettre de les visualiser avant et après corrections, et éventuellement de valider ces corrections.

► **Les corrections manuelles**, nécessitant l'intervention d'un opérateur se rencontrent dans les cas suivants :

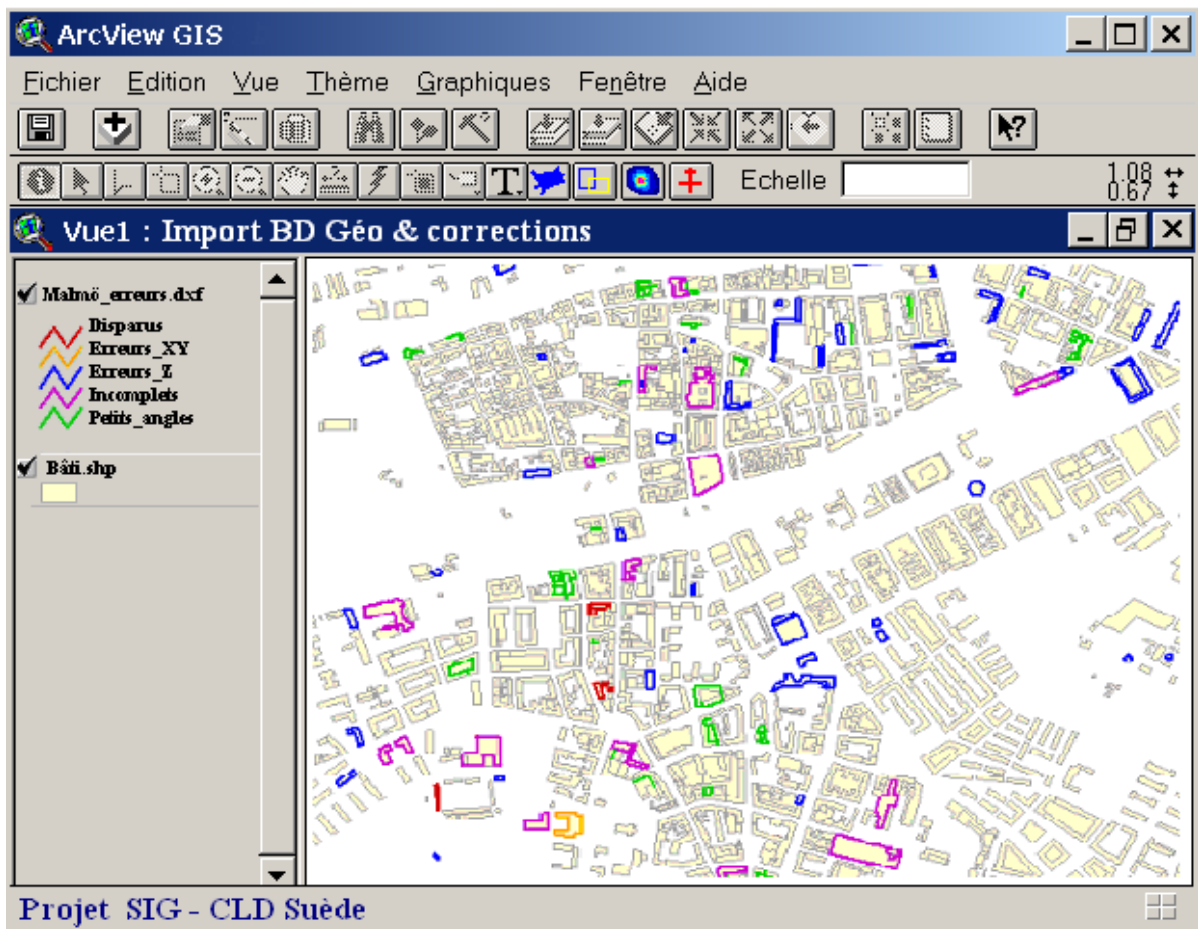
- Contrôle des contours entrelacés,
- Contrôle des contours internes de bâtiments,

Pour ces types de vérifications, la correction n'est pas effectuée automatiquement par le SIG. Par contre, le SIG affiche la liste de tous les objets semblants présenter une anomalie et propose des outils de correction manuelle à l'opérateur.

► **Les outils de corrections automatiques** des données vectorielles de type contours permettent :

- De choisir le type de contrôle à effectuer sur les contours,
- De choisir si les validations seront automatiques ou non,
- De choisir si les contrôles s'effectueront sur les données temporaires ou sur les données géographiques mises à jours automatiquement dans la base de données, ou sur les deux,
- De paramétrer si nécessaire la distance minimale entre deux points d'un même contour et la distance minimale entre deux points de contours différents,
- De choisir les thèmes (couches d'informations géographiques) à contrôler,
- De choisir les données à contrôler (comprises dans la fenêtre graphique courante, comprises dans une surface délimitée par l'utilisateur),
- De visualiser le résultat du contrôle et des corrections effectuées dans une liste,
- De valider les corrections pour un ou plusieurs objets de la liste,

- De générer un rapport pour avoir un compte-rendu du contrôle et des corrections effectuées.



Sources : C.Turck, LIV, 2005.

Figure 135 : Visualisation de la correction automatique sous SIG des données contours de bâtiments au format vectoriel pour la ville de Malmö en Suède

2.4.1.2 – Corrections à effectuer sur les axes des rues

Les axes des rues correspondent à des données géographiques vectorielles sous la forme d'arcs (polygones) : deux points reliés par un segment de droite, un vecteur.

Ces axes pourraient aussi correspondre à des voies de chemin de fer, des autoroutes, un réseau de fibres optiques, etc.

Nous avons effectués différents types de vérifications et de corrections sur les axes des rues (figure 136) :

- Contrôle des points rapprochés,
- Contrôle des altitudes aberrantes (aux intersections entre les segments, ou bien par rapport à l'altitude du sol),
- Contrôles des objets similaires (doublons),
- Contrôle d'axes réduits à un seul point.

Pour ces types de vérification, la correction est effectuée automatiquement par le SIG.

De plus, l'opérateur choisit si les géométries sont à corriger automatiquement sans son approbation, ou si il doit valider une correction pour que celle-ci soit prise en compte définitivement. Pour cela, le SIG stocke les géométries corrigées dans une structure intermédiaire, qui va permettre de les visualiser avant et après corrections, et éventuellement de valider ces corrections.

► Les corrections manuelles, nécessitant l'intervention d'un opérateur se rencontrent dans les cas suivants :

- 1 : Contrôle de points positionnés trop loin par rapport à l'axe des rues (*overshoot*),
- 2 : Contrôle d'axes de route proches mais non connectés,
- 3 : Contrôle de points déplacés,
- 4 : Contrôle d'intersection d'axes de routes avec des contours,
- 5 : Contrôle des oublis importants (tronçons de routes).

Pour ces types de vérifications, la correction n'est pas effectuée automatiquement par le SIG. Par contre, le SIG affiche la liste de tous les objets semblants présenter une anomalie et propose des outils de correction manuelle à l'opérateur.

Toutes ces corrections permettront également de générer automatiquement des graphes d'axes de rues sans erreur.



Sources : C. Turck, FTR&D, 2002.

Figure 136 : Exemples d'anomalies des axes des rues

2.4.2 – Vérifications et corrections des données géographiques maillées

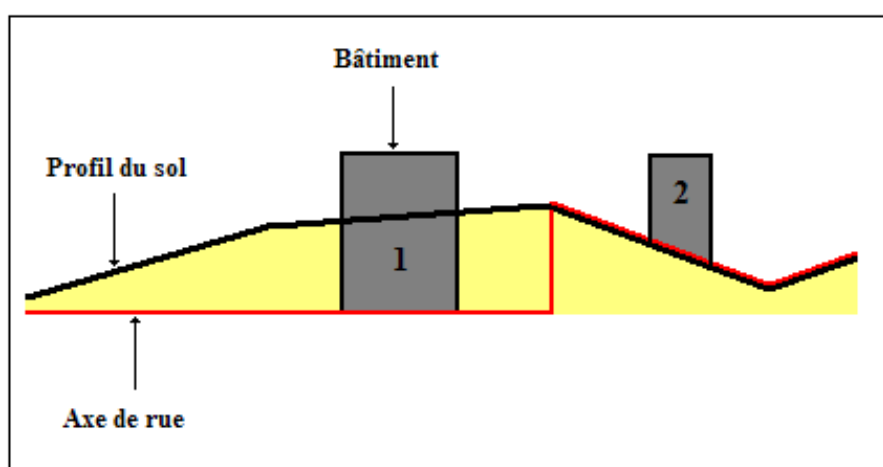
2.4.2.1 – Corrections à effectuer sur les altitudes

Les données géographiques maillées, contenant l'altitude dans chaque maille, peuvent avoir des résolutions très variées : 400 mètres de résolution pour les fichiers DELOC 400 couvrant toute la France, 10 mètres de résolution (voir 1 mètre dans certains cas) pour les données d'altitude en milieu urbain dense.

Les fichiers d'altitude du type Modèle Numérique de Terrain, altitude pointé (25 mètres) et hauteur de sursol (pourcentage), ont souvent une résolution plus importante (10 à 400 mètres) que la résolution des données vectorielles (contours, axes) utilisées (1 mètre), dans lesquels figurent aussi des altitudes (hauteur du bâti, etc.).

Si une incohérence d'altitude est détectée entre le sol et un objet issu d'un autre fichier ayant une altitude plus précise (figure 137), le fichier de sol est alors corrigé automatiquement à l'aide du SIG, pour éliminer cette incohérence. Des seuils de tolérance sont mis en place et sont paramétrés au sein du SIG pour contrôler toutes ces vérifications.

La figure 137 illustre ce phénomène de décalage qu'il peut y avoir entre le Modèle Numérique de Terrain et l'altitude des axes des rues. Dans ce cas, l'axe des rues et le profil des rues ne sont pas superposables. Les bâtiments se retrouvent à une altitude incohérente par rapport au niveau du sol.



Sources : C. Turck, FTR&D, 2002.

Figure 137 : Exemple d'incohérence d'altitude

Les erreurs détectées par le SIG et les corrections automatiques effectuées doivent être validées par l'opérateur, car certaines anomalies apparentes peuvent s'avérer tout à fait normales dans certaines situations particulières : un axe routier encaissé par rapport au sol par exemple.

2.4.2.2 – Corrections à effectuer surs les clutters

Corrections à effectuer sur les données maillées de type d'occupation du sol :

Les anomalies à détecter dans les fichiers sont les zones de mailles non définies. Il faut donc les rajouter. Ce type d'erreurs se rencontrent souvent dans les limites de fichiers (mauvais calages de photographies aériennes), ainsi que dans des zones géographiques particulières (littoral, frontière, etc.).

Pour compléter les valeurs manquantes on peut se servir de la méthode « du plus proche voisin » et affecter comme coefficient à la maille « non définie » celle de la maille « définie » la plus proche.

2.4.3 – Vérifications et corrections des données techniques

Les corrections dépendront des types de données, on peut distinguer principalement trois types de données et donc de corrections à effectuer :

- Les mesures de terrain : vérification de la cohérence avec les données géographiques, recalage des coordonnées (des points de mesures) par rapport aux axes des rues dans lesquelles les mesures ont été effectuées,
- Les données de trafic radio : vérification de la cohérence des valeurs, c'est-à-dire si elles sont bien comprises entre deux seuils (minimum et maximum),
- Les diagrammes d'antennes : vérification de la cohérence des angles, de la cohérence des valeurs, vérification qu'il ne manque pas de données.

2.4.4 – Création de nouvelles données géographiques

Nous avons travaillé sur les données géographiques correspondant aux contours de base des bâtiments, en mode vecteur. Le but final était de diminuer le temps de calcul de l'affaiblissement radio dans les modèles de propagation. Nous avons procédé de la manière suivante : en diminuant le temps de calcul nécessaire afin de calculer les interactions des ondes avec les objets géographiques (principalement des bâtiments) en milieu urbain. En simplifiant les objets géographiques (bâtiments) par la diminution du nombre de facettes de bâtiments, par la fusion des bâtiments accolés, nous diminuons en même temps le nombre d'objets à prendre en compte dans les calculs de diffraction, réflexion, etc., ce qui induit un gain en temps de calcul, mais peut aussi parfois induire une diminution de la qualité de la prédiction. Il faut alors trouver un compromis entre une bonne prédiction et un temps de calcul machine optimal.

Nous avons également effectué l'opération inverse, c'est-à-dire que nous avons rajouté des informations, des données géographiques (bâtiments manquants, tronçons de routes manquantes, etc.). Cette opération doit être effectuée lorsque les données géographiques n'ont pas été mises à jours régulièrement par l'achat de nouvelles BD auprès des fournisseurs de BD Géographiques (IGN, Cartosphère, Siradel, etc.), et que par exemple les nouvelles constructions n'y figurent pas.

2.4.4.1 – Fusion de données

La fusion de données cartographiques, appelée aussi généralisation (confère travaux de Anne Ruas, laboratoire COGIT, IGN) consiste à abstraire (réduire, simplifier) l'information géographique disponible.

Remarque : Les méthodes de généralisation et les modélisations proposées dans cette sous partie mettent l'accent sur les problématiques liées à la composante spatiale de l'information géographique.

2.4.4.1.1 - Regroupement de bâtiments

Nous avons effectués des opérations de fusions des bâtiments. Nous obtenons un seul et même volume bâti : un îlot bâti. La généralisation des données géographiques a été effectuée en utilisant une méthode d'agrégation.

* Du point de vue de la modélisation radioélectrique, le fait d'effectuer des opérations de regroupement des bâtiments ou d'autres objets géographiques est logique, car les ondes utilisées pour le GSM (900 Mhz) ont le même comportement radio que ce soit un seul et même bâtiment ou plusieurs bâtiments accolés qui sont pris en compte dans le calcul de propagation des ondes radio.

* Du point de vue informatique, ceci permet un gain de place (stockage des données sur le disque dur), et un gain en temps de calcul (moins de calculs car moins d'objets à prendre en compte).

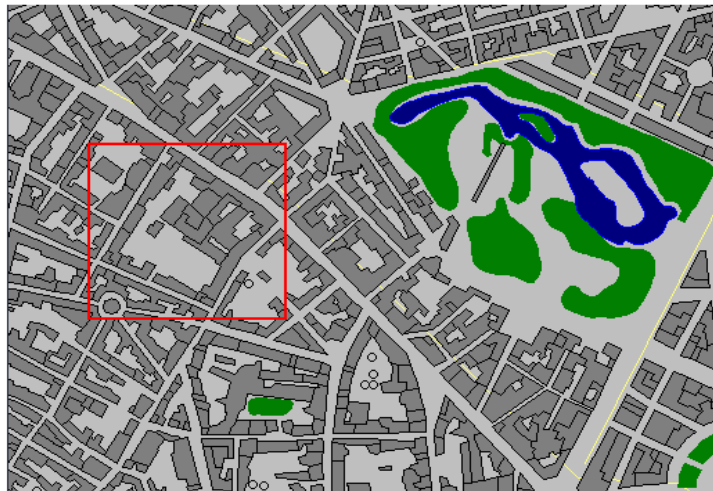
On peut aussi choisir de fusionner les façades (coupe de profil), ou bien de faire l'inverse : de subdiviser les façades par étage : comme on le voit sur la figure 140, les façades des bâtiments peuvent être très différentes selon l'étage (présence de balcon en pierre, différents

revêtements de façade, etc.). Il peut alors être intéressant de disposer d'une information géographique plus précise concernant les façades : pour les ondes UHF à 900 et 1800 MHz tous les objets dont la taille est supérieure ou égale à 32 centimètres vont donc interférer avec les ondes radio. Les balcons et ornements en pierre vont avoir une influence sur la propagation des ondes UHF, par contre le type de revêtement de façade (béton, pierre, bois, métal, verre, etc.) ne va pas avoir une grande influence sur la propagation des ondes UHF, mais beaucoup plus sur les micro-ondes qui sont utilisées par les GPS. Par contre la présence de surface vitrées ou de murs épais sera important pour les modèles de propagation des ondes radio en indoor : plus il y a de surfaces vitrées meilleure sera la réception du signal radio à l'intérieur du bâtiment.

La constitution de nouvelles Bases de Données géographiques contenant des informations plus précises sur le milieu urbain est intéressante pour les calculs d'ingénierie radio. Ceci correspond par exemple à la description architecturale (bâtiments, mobilier urbain, réseaux routiers, etc.) et environnementale (rangées d'arbres, buissons, etc., présence d'espaces ouverts, etc.) du milieu urbain dense.

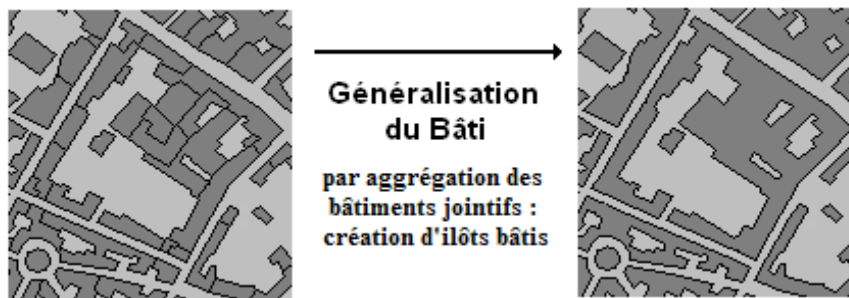
A l'inverse, la constitution de nouvelles Bases de Données géographiques contenant des informations moins précises, des données généralisées, est également importante car elle permet une diminution du temps de calcul de l'affaiblissement radio. La généralisation peut être appliquée aux bâtiments (fusion des façades, création d'îlots bâtis, etc.), aux espaces ouverts (création de surfaces en visibilité), etc.

Ainsi, une adaptation des Bases de Données géographiques selon les objectifs (le niveau de complexité thématique et spatiale de l'information géographique recherché) et le rapport coûts/bénéfices, est nécessaire avant de débiter le processus de généralisation.



Sources : C. Turck, FTR&D, 2002.

Figure 138 : Extraits des contours de base vectoriels en milieu urbain dense



Sources : C. Turck, FTR&D, 2002.

Figure 139 : Exemple de généralisation du bâti par une méthode d'agrégation



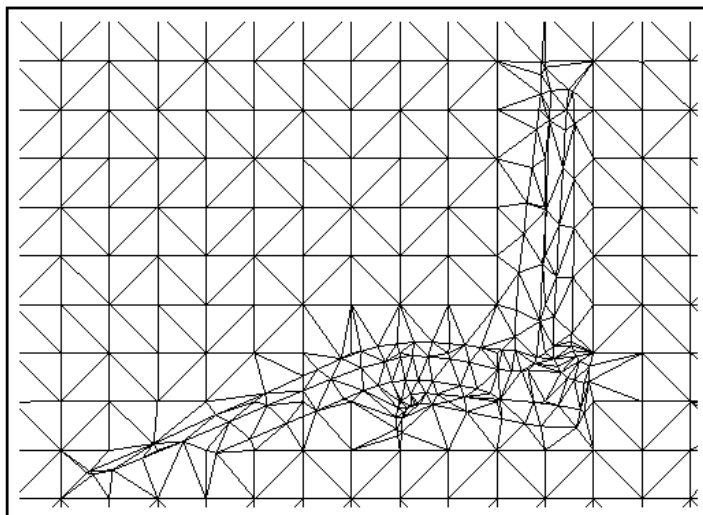
Sources : C. Turck, in Mémoire de DEA, LIV, 2000.

Figure 140 : Photographie de façades Place Kléber à Strasbourg

2.4.4.1.2 - Regroupement de zones de même pente : création de facettes de montagnes

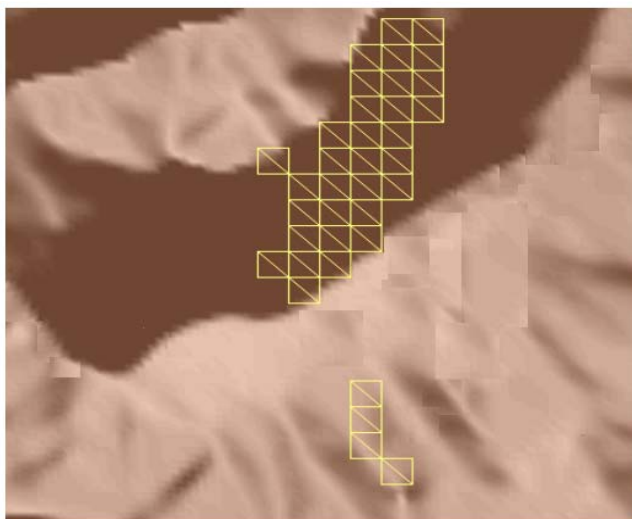
Nous avons travaillé sur des données géographiques correspondant au Modèle Numérique de Terrain, en zones montagneuses, à une résolution de 100 mètres. Le but final était de diminuer le temps de calcul de l'affaiblissement radio dans les modèles de propagation, en diminuant le temps de calcul des réflexions des ondes radio sur les flancs des montagnes. En simplifiant les objets géographiques pris en compte dans les calculs des réflexions (les mailles du MNT, qui fournissent des informations sur l'altitude du sol), nous diminuons en même temps le temps de calcul, sans diminuer la qualité de la prédiction du modèle de propagation de FTR&D dédié au milieu montagneux.

Nous avons effectué des opérations de fusion de pans de montagnes ayant la même pente et présentant la même visibilité optique (le même vecteur normal par rapport au sol). On fusionne les flancs des montagnes sous la forme de zones géographiques, de surfaces de même visibilité. On appelle ces zones des facettes de montagnes. Elles seront par la suite utilisées comme paramètre d'entrée dans le modèle de propagation dédié au milieu montagneux.



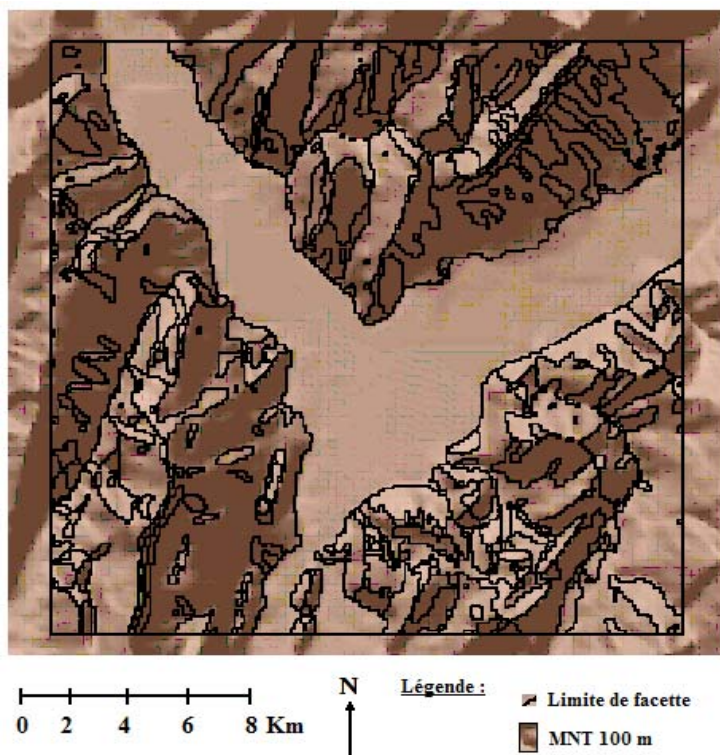
Sources : C. Turck, LIV, 2002.

Figure 141 : Principe d'un Modèle Numérique de Terrain



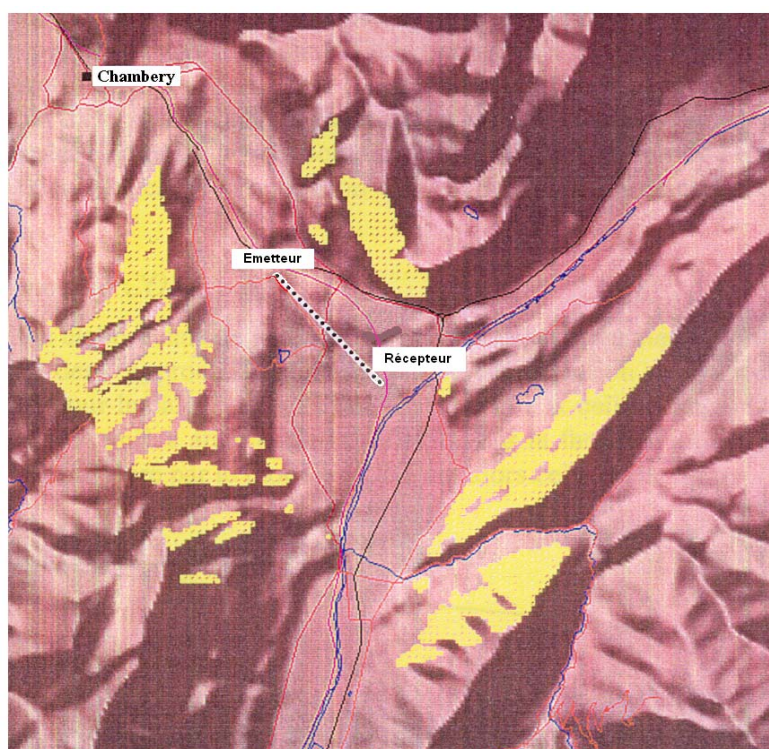
Sources : FTR&D, 2002.

Figure 142 : Recherche des mailles en visibilité optique



Sources : FTR&D, 2002.

Figure 143 : Génération des facettes de montagne, à partir des mailles en visibilité
Zone de Chamonix



Sources : FTR&D, 2002.

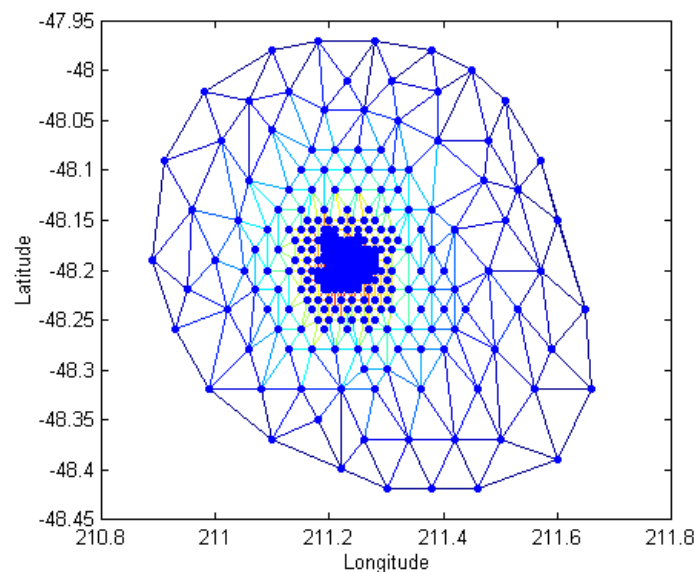
Figure 144 : Visualisation des facettes de montagnes en visibilité depuis l'émetteur et le mobile

2.4.4.1.3 – Création d'un MNT 3D par un Réseau Triangulaire Irrégulier : le TIN

Le terme TIN, signifie « *Trianguled Irregular Network* », c'est-à-dire « Réseau Triangulaire Irrégulier ». Cette représentation est du même type que celle des facettes de montagnes, mais au lieu d'avoir des facettes vectorielles sous la forme de polygones irréguliers, on a des triangles irréguliers (figure 145). Cette représentation de l'altitude sous la forme d'un réseau de triangles accolés est souvent utilisée en Infographie, on parle « d'image en fil de fer ».

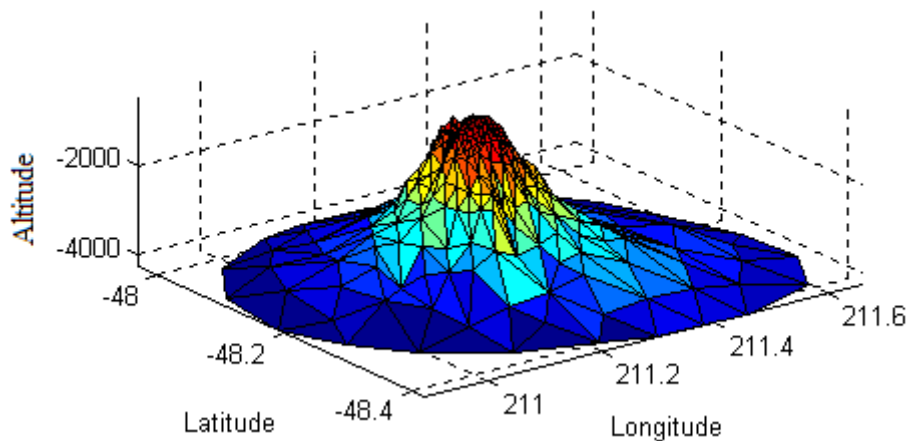
Cette représentation est directement issue du modèle spatial équivalent généré automatiquement par les Systèmes d'Information Géographique : on part d'un Modèle Numérique de Terrain (données maillées à un pas de 100 mètres dans notre cas), et on va générer automatiquement un fichier de données géographiques vectorielles d'altitude en 3 dimensions (figures 146 et 147) sous la forme d'un réseau de triangles irréguliers, un TIN. L'idée de base est que les sommets des triangles vont être placés aux points caractéristiques du terrain (changement de pente, crête, thalweg) et qu'on va ainsi disposer d'une représentation plus pratique dans certains cas. En effet, la pente et son orientation sont constantes sur une face.

Cette représentation est de plus bien adaptée aux SIG vecteurs, comme ArcView ou Géoconcept par exemple, puisqu'elle se contente d'un semis de points (X, Y, Z).



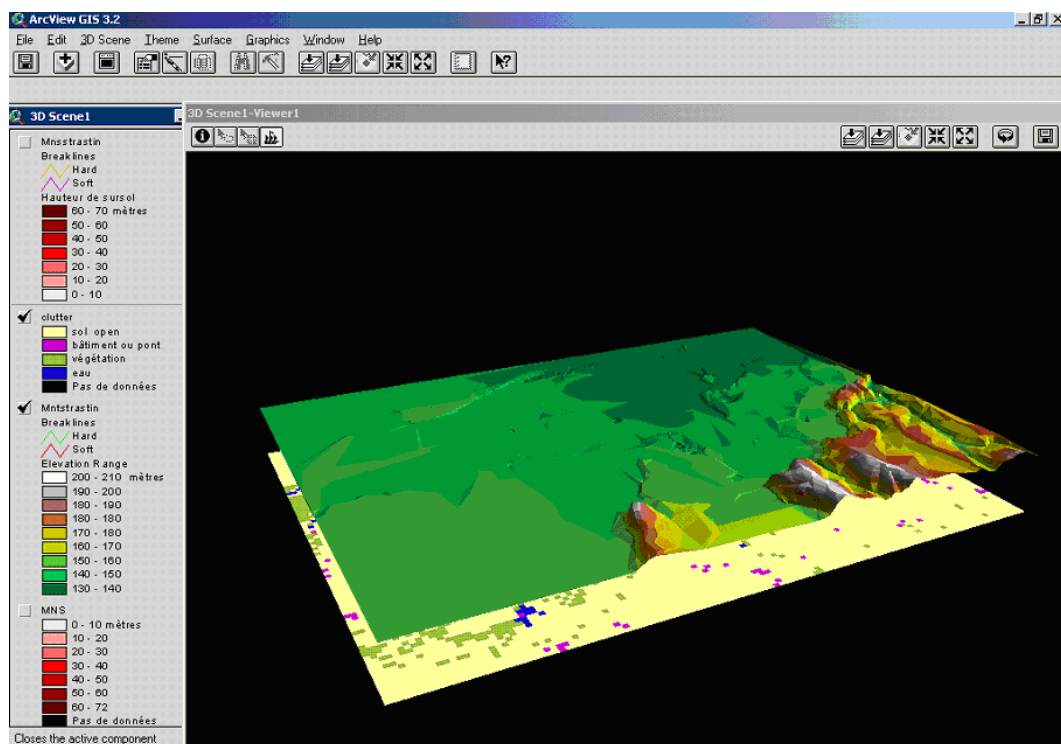
Sources : Matlab, 2002.

Figure 145 : Principe de création d'un TIN : réseau de triangles irréguliers en 2D



Sources : Matlab, 2002.

Figure 146 : Principe de création d'un TIN pour une montagne : réseau de triangles irréguliers en 3D



Sources : C. Turck, LIV, 2000.

Figure 147 : Visualisation en 3D de la plaine d'Alsace et des contreforts des Vosges au format TIN. Zone de Phalsbourg - Strasbourg

La figure 147 représente le Modèle Numérique de Terrain du Bas-Rhin, au pas de 25 mètres au format TIN. La représentation en trois dimensions a été générée automatiquement par le SIG ArcView, à partir du MNT 25 mètres couvrant une zone allant des premiers contreforts des Vosges à l'Ouest jusqu'à l'agglomération de Strasbourg-Kehl et au Rhin à l'Est.

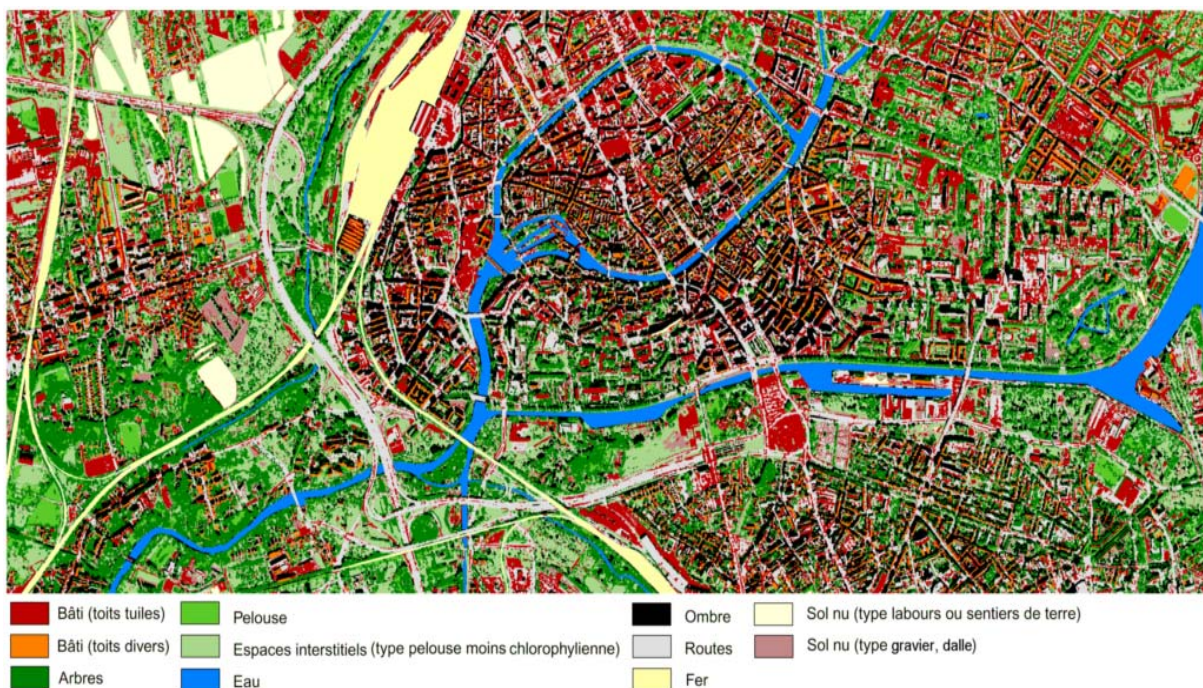
Le SIG permet de visualiser, de croiser et d'analyser plusieurs couches d'informations géographiques différentes. La figure 147 illustre l'utilisation simultanée de deux couches d'informations : un Modèle Numérique de Terrain au format TIN et une Carte d'Occupation du Sol au format maillé.

2.4.4.2 – Ajout de nouvelles données géographiques

2.4.4.2.1 – Images à Haute ou Très Haute Résolution Spatiale, Photographies aériennes

Les données géographiques du type image satellite, notamment les images à Très Haute Résolution spatiale¹⁶⁹, THR (de 2,5 mètres jusqu'à quelques décimètres de résolution) correspondent à une source d'informations complémentaires intéressante à utiliser pour décrire le milieu urbain. Leur utilisation comme paramètre d'entrée dans les modèles de propagation permet de disposer d'une description très précise de l'environnement, ceci est d'autant plus intéressant en milieu urbain, où l'environnement est complexe, et induit de nombreux phénomènes de diffraction, réflexion, etc., des ondes radioélectriques sur les objets géographiques (bâtiments, mobilier urbain, etc.).

Les images satellites et photographies aériennes à HR et THR étant disponibles sur le marché, les opérateurs de télécommunications radiomobiles en ont testé l'intérêt potentiel (amélioration de la qualité de la modélisation en propagation radio, etc.). On assiste ainsi depuis deux ans à l'introduction de ce type de données géographiques dans les modèles de propagation d'ondes radiomobiles dédiés au milieu urbain, et notamment pour les modèles de propagation dédié à la 3G (norme UMTS).



Sources : Anne Puissant, LIV, 2003.
Données : THR 1 m, Spot Image.

Figure 148 : Image à Très Haute Résolution Spatiale (1 mètre) sur Strasbourg

¹⁶⁹ Pour de plus amples informations concernant les images THR consulter la Thèse de Anne PUISSANT, 2003, *Information géographique et images à très haute résolution : Utilité et applications en milieu urbain*, Université Louis Pasteur, Laboratoire Image et Ville, Strasbourg, 445 pages.

Rappels :

L'image satellite (comme la photographie aérienne) est un vecteur d'information brut, c'est-à-dire fourni à l'état presque initial sans traitement (à part les améliorations radiométriques et les corrections géométriques).

La télédétection (détection à distance par l'intermédiaire d'un satellite ou d'un avion) fournit une information spatiale compréhensible relativement aisément par rapport à une carte ou à un résultat de traitement de données. Par rapport aux méthodes traditionnelles d'acquisition des données, la télédétection spatiale (par satellite) présente un certain nombre de caractéristiques intéressantes (Bied-Charrenton *et al.*, 1989) :

- le caractère homogène des observations pour une grande superficie (une seule image couvre plusieurs milliers de km²).

- la facilité d'accès à la plupart des régions inabornables du monde, Ceci est intéressant pour l'étude des zones montagneuses, des zones maritimes ou bien encore des zones frontalières, qui sont des zones géographiques pour lesquelles on a plus de difficultés pour obtenir des données.

- la répétitivité, c'est-à-dire la possibilité d'obtenir périodiquement, à un rythme accéléré (plusieurs jours ou plusieurs semaines), le même type de données sur la même zone de manière à pouvoir suivre l'évolution. Ceci est intéressant, car on peut multiplier les prises de vue à des dates différentes (tous les 2 ans, par exemple) sur une même zone pour faire une analyse diachronique en milieu urbain : la destruction ou la construction d'un immeuble haut dans un quartier va fortement modifier la propagation des ondes radioélectriques dans ce quartier. Une analyse diachronique du bâti dans le quartier va permettre de détecter la construction/destruction de bâtiments, la plantation d'arbres, etc. Nous allons alors pouvoir comparer grâce au SIG la carte d'occupation du sol (avec mise en valeur des changements : destruction/construction de bâtiments, etc.) avec la couverture de champ radioélectrique sur cette même zone.

- Un autre exemple d'utilisation intéressant correspond à la détection de la présence d'hydrométéores (brouillard, pluie, pollution de l'air, etc.) sur les images satellites (opacité de l'image). Les ondes radioélectriques sont atténuées par la présence d'hydrométéores dans l'atmosphère. L'utilisation d'images satellites permet d'avoir des informations sur la présence/l'absence d'hydrométéores dans l'atmosphère lors de campagne de mesure de terrain.

- le caractère global et synthétique des informations collectées.

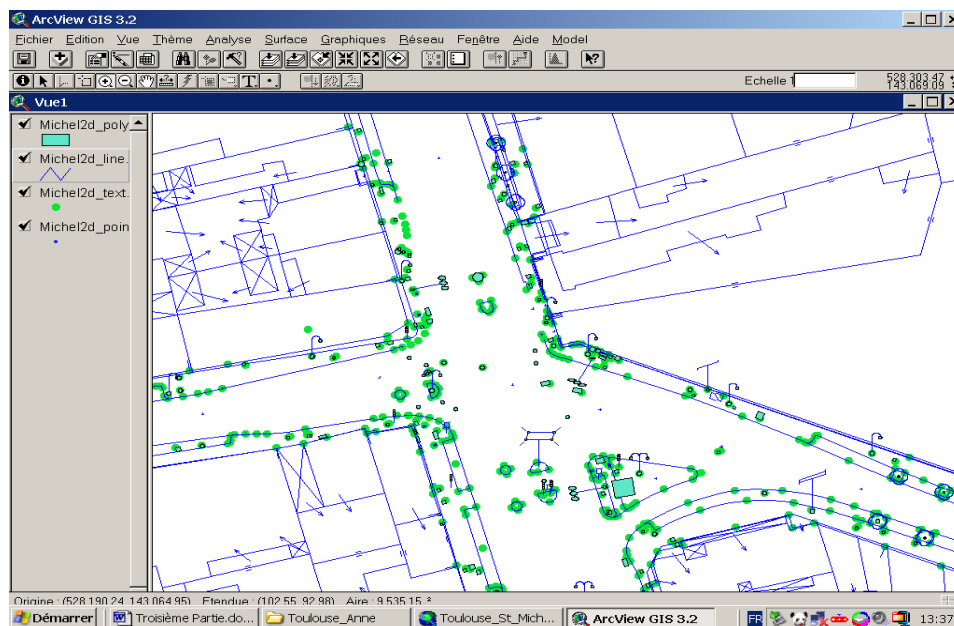
- les possibilités offertes par les techniques de traitement des données permettant de traiter rapidement un grand volume de données concernant de vastes régions.

2.4.4.2.2 – Données topographiques à grande échelle

Les plans topographiques à très grande échelle sont d'un grand intérêt pour FTR&D, car ils fournissent des informations géographiques précises très utiles pour le calcul de l'affaiblissement radioélectrique dans les modèles micro cellulaires et pico cellulaires en milieu urbain dense, comme par exemple dans les modèles de pénétration, ainsi que dans les modèles de calcul destinés à la Boucle Locale Radio, aux réseaux Wifi ou bien encore aux liaisons optiques atmosphériques par liaison laser.

Les plans topographiques à très grande échelle sont apparus dans les années 80. Ils ne sont pas disponibles pour toutes les agglomérations françaises. Néanmoins, à l'heure actuelle les communautés de communes et les grandes agglomérations françaises disposent de services en charge de la gestion de l'information géographique sur son territoire. Ces services disposent d'un personnel de techniciens et ingénieurs topographes qui font des relevés topographiques de terrains afin d'établir ou de compléter ces plans topographiques numériques à grande échelle ainsi que les plans cadastraux.

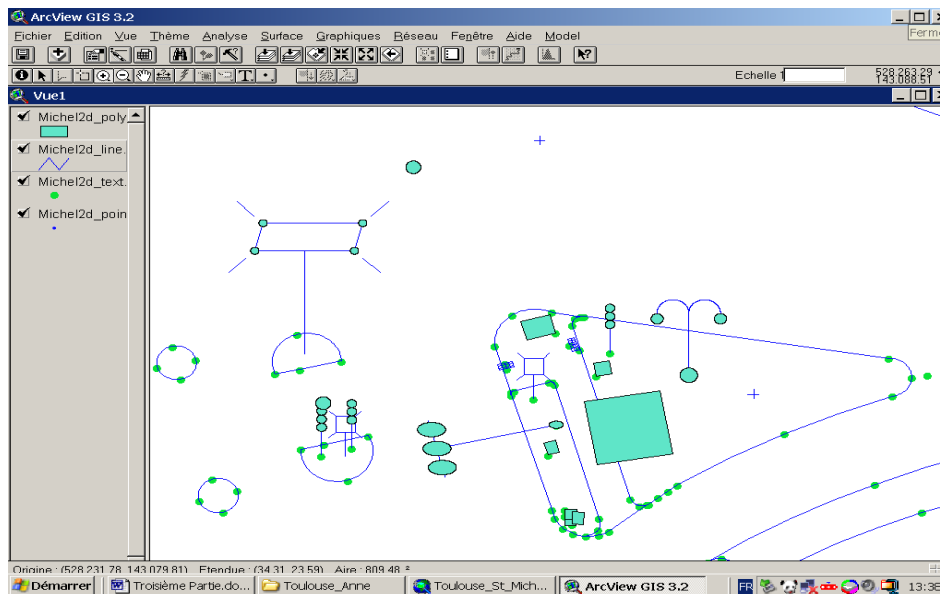
Les figures 149 et 150 présentent un extrait de plan topographique de la voirie à très grande échelle (données vectorielles avec une résolution métrique) pour le quartier Saint Michel à Toulouse. La commune de Toulouse a constitué en 1984, dans le cadre de sa Banque de données urbaines¹⁷⁰ et avec le concours de l'IGN, une campagne de relevés topographiques de précision par photogrammétrie de masse à grande échelle.



Sources : Anne Puissant, LIV, 2003.
Données : Communauté Urbaine de Toulouse, Service des systèmes d'information.

Figure 149 : Plan topographique de la voirie de surface à grande échelle
Quartier Saint-Michel à Toulouse

¹⁷⁰ In Paul Rouet, 1991, *Les données dans les Systèmes d'Information Géographique*, Ed. Hermès, Col. Traité des Nouvelles Technologies, Série Géographie assistée par ordinateur, Paris, 278 pages.



Sources : Anne Puissant, LIV, 2003.

Données : Communauté Urbaine de Toulouse, Service des systèmes d'information.

Figure 150 : Visualisation en gros plan des données vectorielles pour le plan topographique de la voirie de surface - Quartier Saint-Michel à Toulouse

De même sur la Communauté Urbaine de Strasbourg¹⁷¹, il a été constitué en 15 ans, de 1975 à 1990, un « plan Voirie et Réseaux Divers¹⁷² ». Sa confection a exigé la restauration de 4000 points caractéristiques et le stockage d'un million de points mesures dont les coordonnées cartésiennes (X, Y, Z) ont été relevés. Les plans papiers, ont été réalisés à différentes échelles : 73 km² en milieu urbain dense au 1/200, 104 km² au 1/500 et 310 km² 1/1000. Tous ces plans topographiques ont été ensuite numérisés, et sont maintenant intégré à un SIG partagé par plusieurs partenaires, dont France Télécom.

¹⁷¹ Pour de plus amples informations voir le Service d'arpentage de la Communauté Urbaine de Strasbourg, et le Service en charge du SIG.

¹⁷² Le plan VRD a été financé, pour un coût total de 100 millions de francs, par la Communauté Urbaine de Strasbourg, France Télécom, la région Alsace, Electricité de Strasbourg et Gaz de Strasbourg, le Port autonome et Strasbourg Citévision.

2.4.4.2.3 – Données socio-économiques géolocalisées

Avec l'apparition depuis 2 ans de la « troisième génération » (3G) de nouvelles technologies de l'information et de la communication : services localisés, multimédia, internet mobile, etc., les téléphones portables 3G deviennent de véritables assistants personnels pourvus de nouvelles fonctions tels que les services localisés, qui permettent aux individus de se localiser en temps réel grâce à leur téléphone portable. Les services localisés nécessitent l'utilisation de données socio-économiques géolocalisées. L'opérateur mobile doit ainsi disposer de bases de données géographiques socio-économiques (localisation des parkings, des commerces et services, itinéraire routier, etc.) auxquelles les utilisateurs vont pouvoir accéder en temps réel via leur téléphone portable.

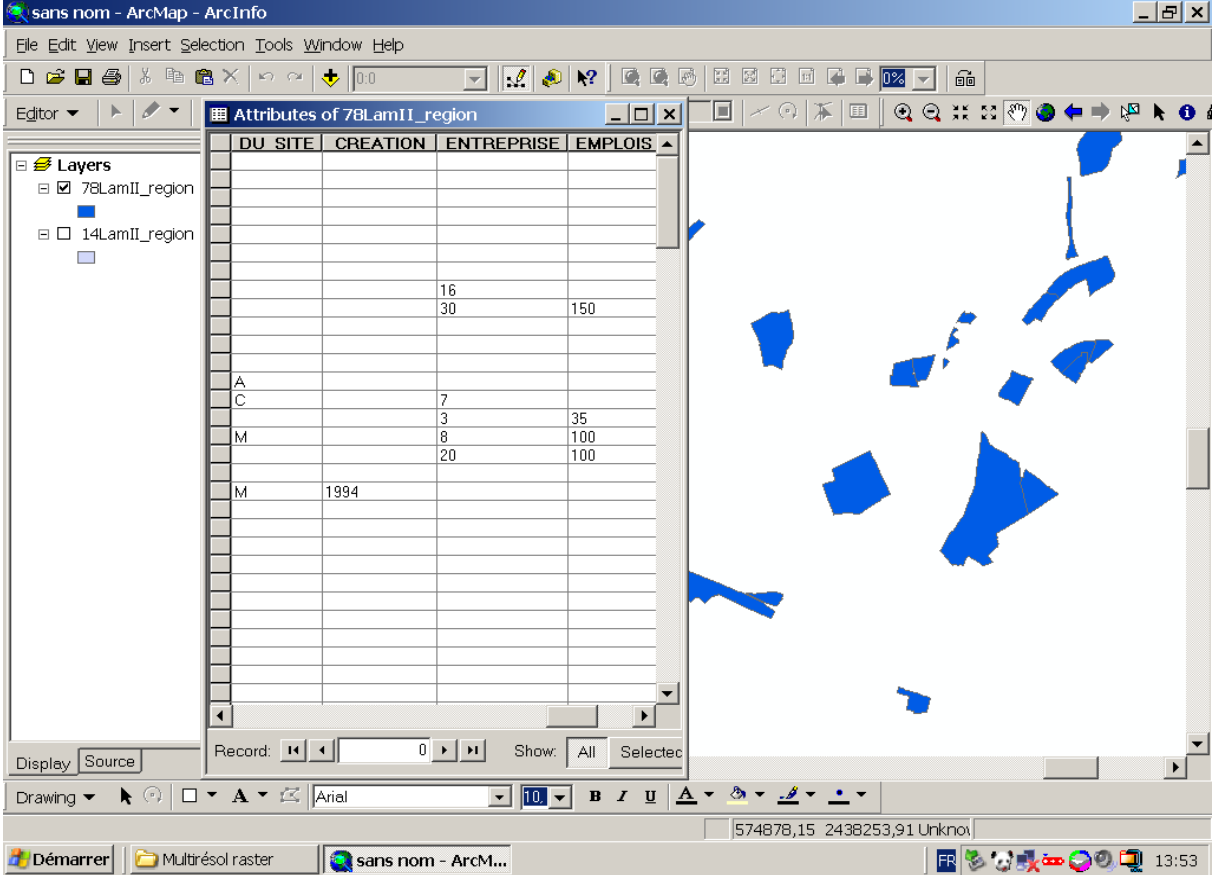
L'opérateur va également pouvoir utiliser ces données socio-économiques afin d'effectuer des études de suivi de comportement des consommateurs, pour des études de géomarketing ou bien encore pour localiser plus rapidement les personnes lors d'un appel d'urgence.

Les données socio-économiques collectées par les différentes administrations (collectivités territoriales, INSEE, recensement de la population, chambre de commerce, etc.) sont des données « sensibles », car elles sont souvent nominatives. De ce fait, par exemple pour les données démographiques, elles sont disponibles au niveau de l'IRIS et non de l'immeuble.

L'INSEE définit l'îlot de la manière suivante : *Un îlot est une fraction de territoire, en principe d'un seul tenant, délimité par la voirie qui l'entoure (c'est en milieu urbain le pâté de maison), et quelquefois par des barrières naturelles (cours d'eau, canal, voie ferrée, bord de mer) ou par des limites administratives de quartiers, d'arrondissement ou de commune. Un îlot a autant de façades que de voies de dessertes qui le bordent. Une façade va d'un carrefour à un autre. Les îlots sont définis au moment du recensement général de la population. Chaque façade est décrite avec le numéro d'îlot auquel elle appartient, et avec le numéro postal de chacune de ses deux extrémités.*

N'importe quelles données, localisées par une adresse, ou par un numéro d'îlot du recensement, peuvent être exploitées dans un SIG, à condition de disposer d'un mode de représentation spatiale de l'adresse ou de l'îlot.

La figure 151 présente un exemple de données socio-économiques géolocalisées fournies par l’INSEE : le fichier SIRENE, Système Informatique répertoriant les entreprises et les établissements. Ce fichier recense tous les établissements d’activité, y compris du secteur public et parapublic. Il comporte pour chaque établissement une table attributaire contenant : une adresse, permettant de l’introduire dans un SIG, la raison sociale de l’entreprise, la nature de l’établissement, le nombre de salariés, etc.



Sources : Anne Puissant, LIV, 2003. Données : INSEE, 2002.

Figure 151 : Exemple de données socio-économiques géolocalisées fournies par l’INSEE : Extrait du fichier SIRENE pour la ville de Caen.

2.4.5 – Transformations géométrique de données

FTR&D dispose des contours de base au format vectoriel pour les agglomérations. La précision des données étant métrique, et l'opérateur ayant besoin de données géographiques maillées à haute résolution (1 à 10 mètres), FTR&D a proposé alors de convertir les fichiers contours de base vectoriels en fichiers mailles fines. Le but final est un gain financier important, car l'achat de données géographiques raster pour toutes les villes françaises de taille moyenne ou plus importante ($N > 50\,000$ habitants) représente un coût financier très important pour l'opérateur. En revanche, il faut également évaluer si la conversion des données vectorielles en données maillées, n'entraîne pas une dégradation trop importante de la qualité (géométrie) des données géographiques.

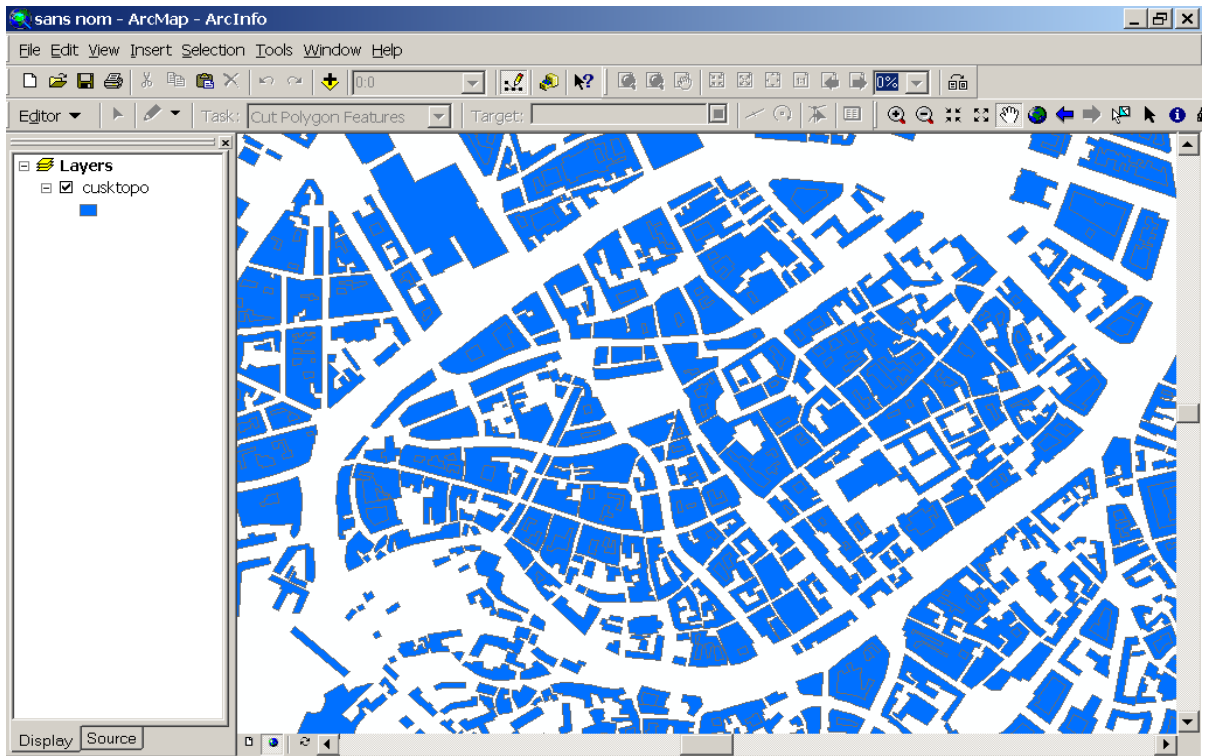
2.4.5.1 - Rastérisation de données vectorielles : transformation de la BD Topo IGN en données mailles fines (1 à 10 mètres de résolution)

Nous observons sur ces trois images maillées (figures 153, 154, 155) la dégradation de la qualité (la précision des contours des bâtiments) selon la résolution des images (10, 5 et 1 mètre). Sur une image à un mètre de résolution, la qualité de la précision des objets au sol (contours) est excellente (figure 153). Lorsque nous choisissons de rastériser les contours de bases des bâtiments au format vectoriel en une image avec un pas de 5 mètres, la précision des données est encore acceptable (figure 153). Par contre, la rastérisation vers une image ayant un pas de 10 mètres affecte déjà fortement la qualité des données contours du bâti (figure 155). Un compromis acceptable pour une bonne prise en compte de l'espace bâti en milieu urbain très dense correspond à une image à 5 mètres de résolution.

Le gain en terme de qualité de la prédiction radioélectrique : l'utilisation de données maillées à très haute résolution (métrique) n'est pertinente que pour les environnements très complexes correspondant au milieu urbain dense, comme Strasbourg centre-ville par exemple.

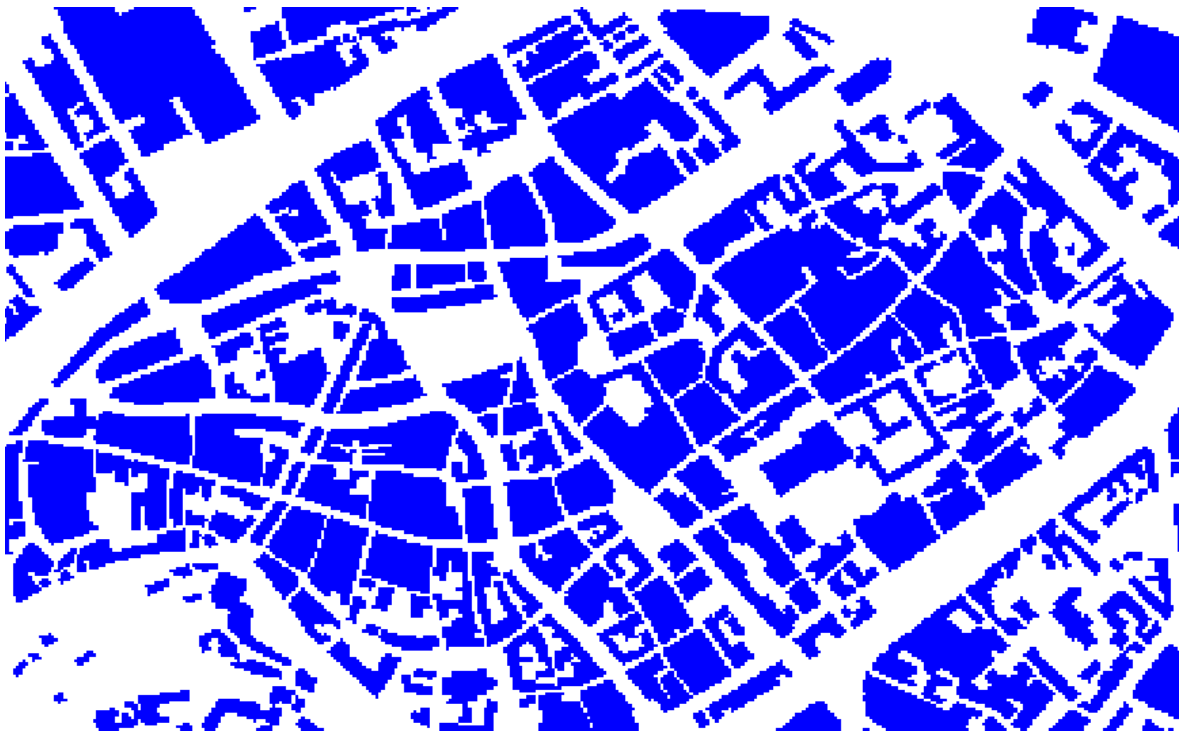
Les données maillées à haute résolution du type clutter, ou contours de base du sursol, sont utilisées uniquement dans les modèles micro cellulaires et pico cellulaires en milieu urbain dense. L'achat de Bases de données maillées à 1 mètre ou 5 mètres de résolution ne présente donc actuellement d'intérêt, que pour le milieu urbain très dense.

De plus l'utilisation de données maillées (clutters, contours de base) à Haute Résolution et Très Haute Résolution implique un coût d'achat des données et des moyens de traitement et de stockage, non négligeables, car il ne faut pas oublier que le Groupe France Télécom comprend plusieurs filiales s'occupant du secteur des mobiles dispersées en France (Orange France, France Télécom Mobile, Immarsat, FT Câble, etc.), en Europe (FT Mobile Pologne, Mobistar Belgique, Orange Suisse et Grande-Bretagne, etc.) et dans le monde entier (Télécom Maroc, FTR&D New-York, Tokyo, San Francisco, etc.).



Sources : C. Turck, LIV, 2003.

Figure 152 : Image vectorielle source : la BD Topo IGN qui correspond aux contours des bâtiments, avec une résolution métrique.



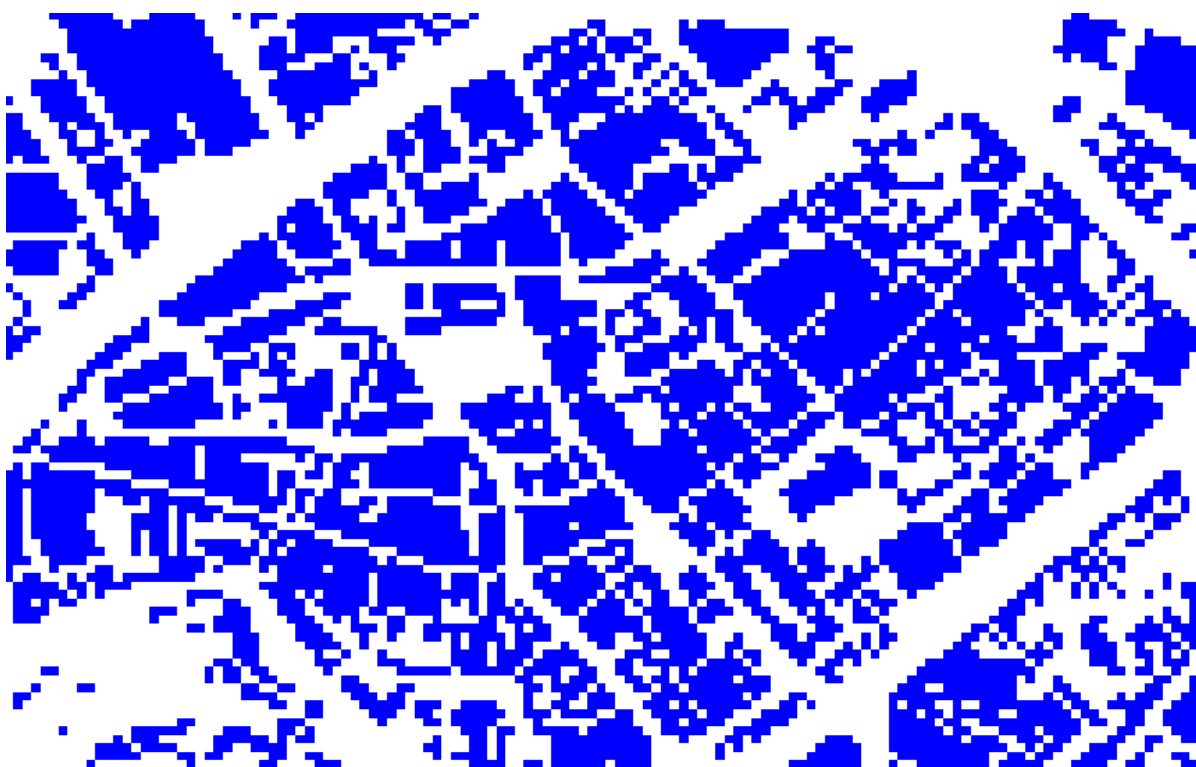
Sources : C. Turck, LIV, 2003.

Figure 153 : Image rastérisée à 1 mètre de résolution



Sources : C. Turck, LIV, 2003.

Figure 154 : Image rastérisée à 5 mètres de résolution



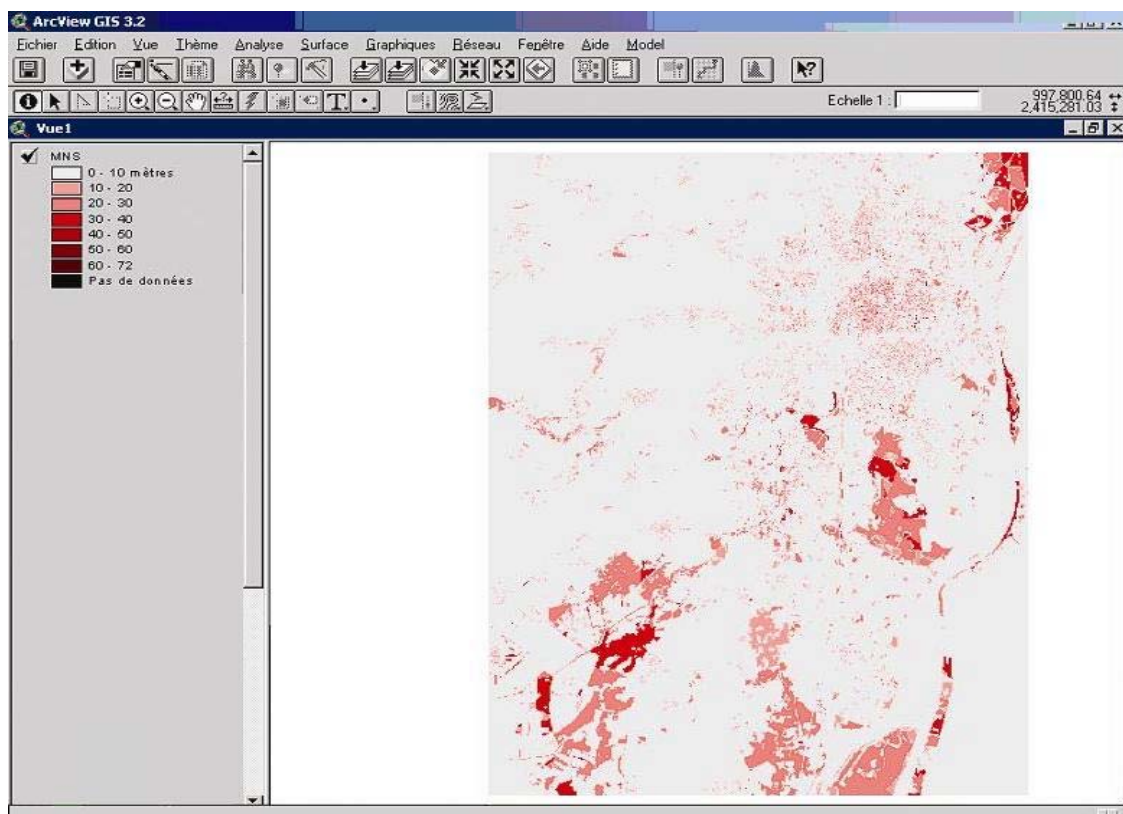
Sources : C. Turck, LIV, 2003.

Figure 155 : Image rastérisée à 10 mètres de résolution

2.4.5.2 - Vectorisation de données maillées : conversion d'un Modèle Numérique de Sursol en données vectorielles

Dans les modèles de propagation d'ondes radioélectriques il existe plusieurs mode de calcul de l'affaiblissement radio (confère troisième chapitre) : le mode maillé (pour une seule maille), le mode profil (le long du profil entre l'émetteur et le récepteur) et le mode couverture (sur l'ensemble d'une zone géographique). Pour le calcul de l'affaiblissement le long du profil entre l'émetteur et le récepteur, le modèle utilise comme paramètre d'entrée le Modèle Numérique de Sursol (figure 156). Les zones boisées sont représentées sous la forme d'un seul polygone avec la hauteur moyenne de bois, de même pour les bâtiments on dispose de la hauteur moyenne du bâtiment, à une résolution de 25 mètres.

Or, il est nécessaire d'utiliser des données assez fines sinon on obtient de mauvais résultats comme sur la figure 157. Ce genre de généralisation très grossière du sursol est encore utilisé en modélisation radio pour le milieu rural, mais les résultats peuvent être améliorés en utilisant un MNS plus fin.

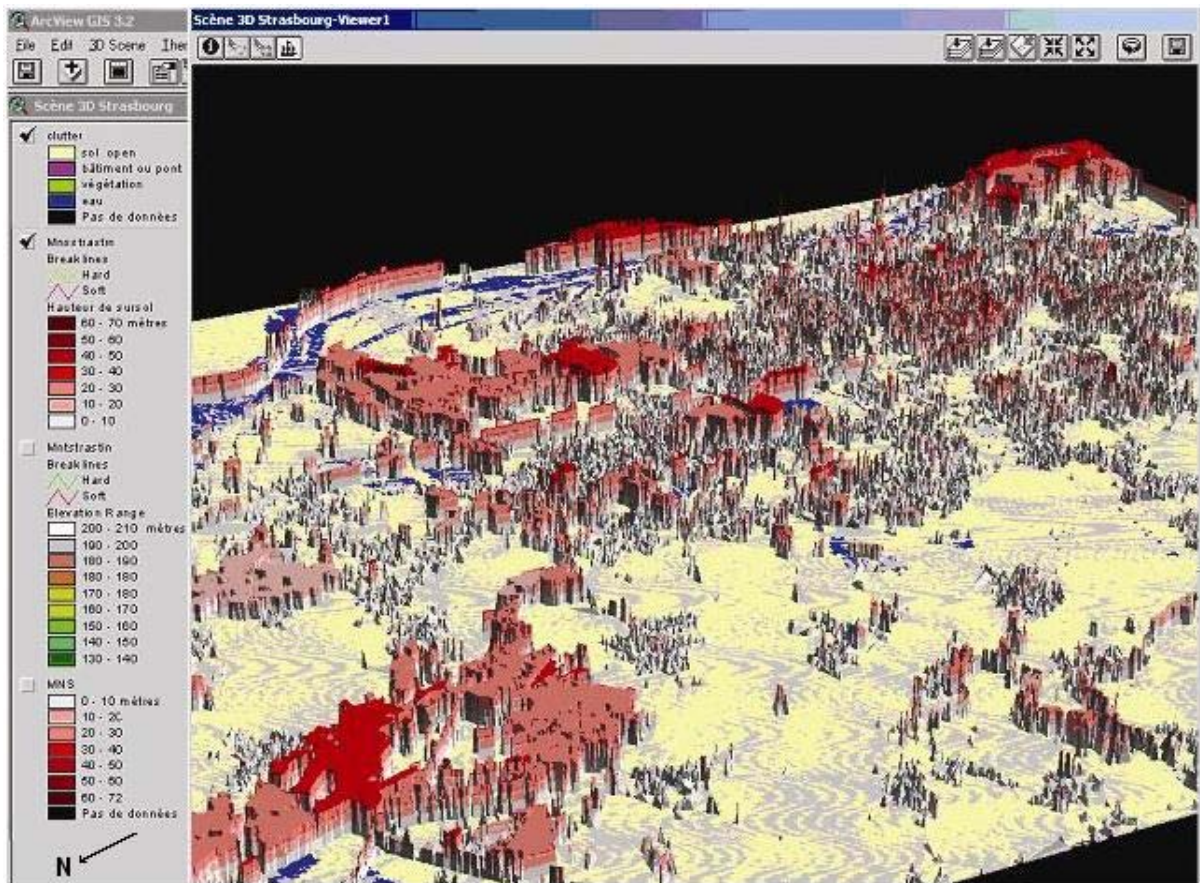


Sources : C. Turck, LIV, 2003.

Figure 156 : Modèle Numérique de Sursol maillé à 25 mètres de résolution sur Strasbourg et sa région

Comme données de départ nous ne disposons que d'un Modèle Numérique de Sursol à un pas de 25 mètres, avec la hauteur moyenne de sursol dans chaque maille. De ce fait, les résultats obtenus lors de la vectorisation des données ne sont pas très bons. Sur la figure 157, nous avons volontairement utilisé une représentation en trois dimensions avec une extrusion verticale de la hauteur de sursol assez importante, afin de bien visualiser les défauts engendrés par l'utilisation d'un MNS trop imprécis.

Si l'on se sert d'un MNS au pas de 5 ou 1 mètre, avec la hauteur réelle de sursol dans la maille, les résultats qu'on obtient lors de la vectorisation des données, sont beaucoup plus proches de la réalité observée sur le terrain.



Sources : C. Turck, LIV, 2001.

Figure 157 : Image vectorisée du Modèle Numérique de Sursol sur Strasbourg – Vue en 3 D.

2.4.5.3 - Création d'un Modèle Numérique de Terrain Pointé 25 mètres en milieu urbain

Ce MNT est appelé « Pointé », c'est-à-dire que l'altitude est renseignée pour une grille de points (X,Y) et non une grille de maille, comme c'est le cas habituellement. Le MNT Pointé à 25 mètres de résolution a été généré par FTR&D à partir d'autres Bases de Données géographiques existantes, car le MNT maillé au pas de 100 mètres dont disposait FTR&D n'était pas assez précis pour certains calculs d'affaiblissement radio, notamment en milieu micro cellulaire urbain.

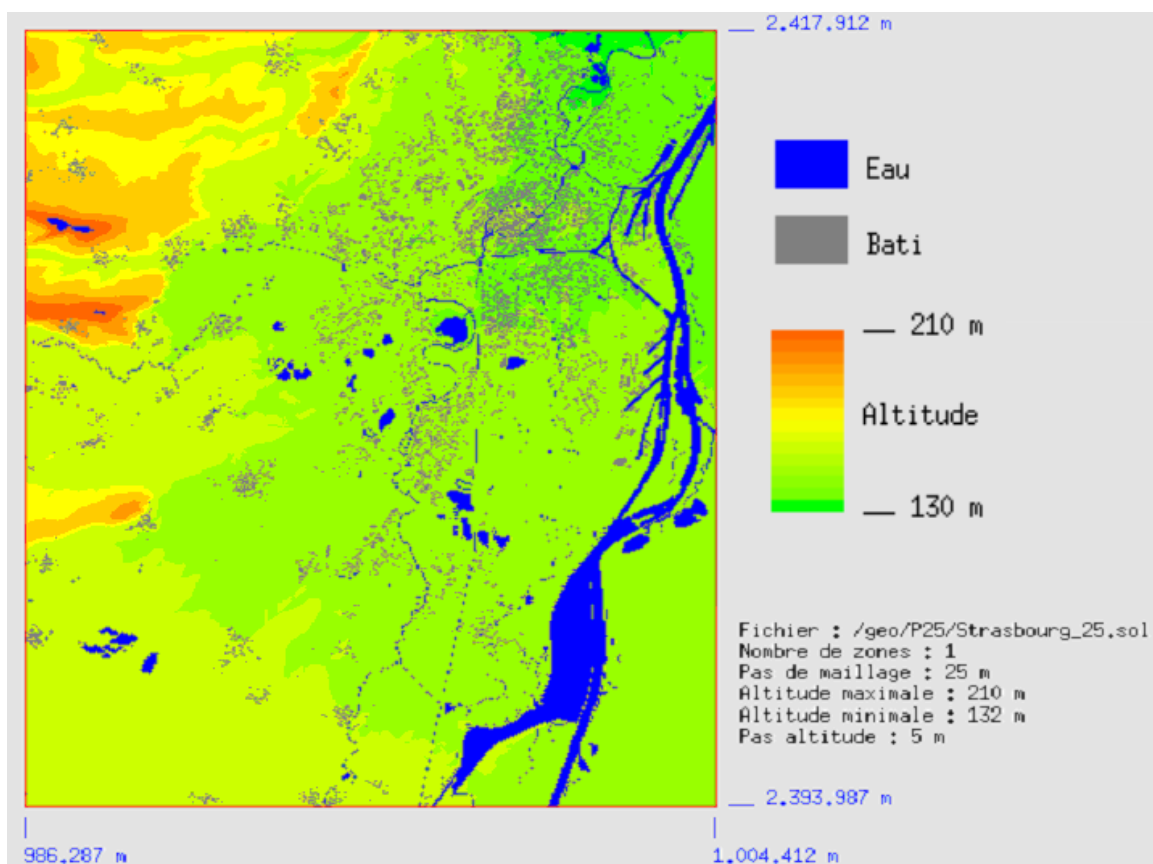
Le « pointé 25 m » est un fichier de données géographique propre à FTR&D. Il ne correspond pas à un simple MNT, il contient également, en plus de l'altitude au niveau de chaque point, des informations concernant le sursol (type et hauteur de sursol).

Le MNT pointé 25 mètres résulte d'un traitement des données géographiques vectorielles du type contours de base du sursol, par restitution maillée des contours de bâtiments et de bois.

A l'aide d'un SIG nous appliquons une grille de points avec un pas de maillage de 25 mètres sur les données de sursol de départ. Nous effectuons ensuite dans le SIG une opération spatiale du type « croisement de couches d'informations » : on crée une jonction entre la grille de points, de coordonnées cartésiennes X_i, Y_i , avec la couche maillée de sursol.

Nous obtenons ainsi un fichier de points au pas de 25 mètres. Pour chaque point ainsi défini, le type de sursol et l'altitude du contour de base correspondant sont repérés.

Les informations fournies dans ce type de fichiers géographiques pour chaque point sont : l'altitude du sol, le type de sursol (sol nu, bâti, végétation, eau, pont) et la hauteur de sursol (calculée par recoupement).



Sources : C. Turck, FTR&D, 2003.

Figure 158 : Modèle Numérique de Terrain Pointé à 25 mètres de résolution – Strasbourg et sa région

3 – De nouvelles variables géographiques pour la modélisation de la propagation des ondes radio : les indicateurs morphologiques

3.1 – Introduction

Le troisième chapitre présente les résultats de travaux de recherches menées à France Télécom R&D dans le cadre de la thèse. Plusieurs notes techniques et rapports d'études correspondant à l'apport de la morphologie urbaine à la modélisation radioélectrique ont été publiés. Ce troisième chapitre reprend les résultats exposés dans deux rapports d'études¹⁷³ publiés en 2002 et 2003.

Les données géographiques utilisées actuellement dans les modèles de propagation donnent de bons résultats, mais la modélisation peut encore être améliorée grâce à l'utilisation de variables géographiques plus complexes, qui caractériseraient plus efficacement le milieu rural et urbain.

Le travail exposé porte sur l'utilisation de données géographiques d'un nouveau type, les indices morphologiques, qui pourront être utilisées dans les modèles de propagation d'ondes radioélectriques développés. Plus précisément, nous travaillons sur des variables géographiques (indicateurs morphologiques) qui sont calculées une fois pour toute. Elles sont indépendantes de la position de la station émettrice, et sont intéressantes pour caractériser plus efficacement l'environnement autour du récepteur.

Les modèles de propagation des ondes radio ont pour but de prédire l'affaiblissement du signal radio en fonction de tout un ensemble de paramètres différents, comme par exemple le type d'antenne, la fréquence du signal émis, l'altitude, le type d'occupation du sol, etc. Dans le calcul de l'affaiblissement du signal radio entrent deux catégories de variables : les variables radioélectriques et les variables géographiques (figure 159).

Le but ici est d'enrichir cet ensemble de variables géographiques avec des variables morphologiques pré-calculées qui remplaceront et/ou compléteront les variables géographiques calculées sur la coupe de terrain entre la station émettrice et le mobile.

Nous allons proposer une technique de modélisation de l'environnement géographique le long du canal de propagation radio E-R en milieu urbain par la délimitation des espaces libres. La méthode mise en œuvre pour extraire les espaces ouverts (Open) est basée sur la technique du lancer de rayon. Elle permet de délimiter les surfaces en visibilité optique pour chaque maille.

La zone géographique à étudier correspond à la Communauté Urbaine de Strasbourg, qui comprend la ville de Strasbourg, les communes périphériques correspondant à la banlieue

¹⁷³ TURCK C., novembre 2002, *Détermination des indices de forme géographiques à Strasbourg, en vue d'une étude des corrélations entre "images géographiques" et "images radioélectriques" du champ propagé*, Rapport d'Etude, France Télécom FTR&D, Belfort et Laboratoire Image et Ville, Strasbourg, 60 pages.

TURCK C., mai 2003, *Contribution des indices de forme géographiques à la modélisation radioélectrique des réseaux radiomobiles GSM 900 MHz*, Rapport d'Etude, France Télécom FTR&D, Belfort et Laboratoire Image et Ville, Strasbourg, 150 pages.

ainsi que des communes rurales localisées à une dizaine de kilomètres maximum du centre-ville. Ainsi quatre types de milieux géographiques seront pris en compte dans notre étude de la morphologie : le milieu urbain très dense, le milieu urbain dense, le milieu périurbain et le milieu rural. Pour chaque milieu géographique, nous allons effectuer des calculs afin de délimiter les espaces ouverts (les surfaces de visibilité), puis les indicateurs morphologiques pour chaque surface de visibilité. Ceci nous permettra de caractériser la forme des espaces ouverts et ainsi de pouvoir introduire ces nouvelles variables morphologiques dans la modélisation afin de mieux prendre en compte le milieu géographique dans la modélisation radioélectrique, et ainsi d'en améliorer la qualité (précision des calculs radio, réduction des temps de calcul).

Les surfaces de visibilité se présentent sous la forme de polygones le plus souvent irréguliers, et de formes très variées. La question que nous nous posons alors est de savoir comment étudier la forme de ces surfaces, comment faire pour les caractériser ?

L'utilisation d'indices arithmétiques basés sur des mesures géométriques de base (surface du polygone, périmètre, rayon inscrit, rayon circonscrit, etc.) nous permet d'obtenir toute une série de valeurs numériques caractéristiques de la forme de ces polygones, et ainsi de pouvoir analyser la forme de ces surfaces de visibilité. Neuf indices de forme ont été proposés. Ils permettent de caractériser plus efficacement le milieu géographique en présence : ils décrivent la morphologie des objets géographiques (surfaces libres, clusters bâtis, clusters boisés, etc.) sur de vastes zones géographiques. Ils permettent d'appréhender la forme du relief terrestre, la forme des éléments de sursol (les bâtiments, les zones boisées), et la forme des espaces libres (rues, places).

Ces variables seront calculées à l'échelle locale, c'est-à-dire pour l'environnement proche du récepteur, elles sont indépendantes de la position de la station émettrice.

Enfin, pour comprendre les relations qui relient la morphologie d'une zone géographique et la propagation des ondes radio sur cette même zone, nous nous proposons d'étudier les corrélations entre l'affaiblissement moyen collecté pour chaque point de mesure et les valeurs des 9 indices morphologiques calculés pour ces mêmes points de mesure.

La première partie de ce chapitre expose la démarche scientifique (enchaînement logique et méthodes) que nous avons adoptée.

La deuxième partie présente les différentes variables morphologiques mises au point : les mesures morphométriques de base (Surface, Volume, Densité), les indices de relief (Altitude et Pente) et les indices de forme arithmétiques.

La troisième partie du chapitre présente les algorithmes géomatiques et l'implémentation du de calcul des indices de forme sous ArcView 3.

La quatrième partie présente les différents résultats numériques obtenus : le calcul des différents indices morphologiques sur une zone géographique précise, la Communauté Urbaine de Strasbourg (CUS).

Enfin, la cinquième partie présente la validation des résultats d'un point de vue géographique et radioélectrique par l'étude des corrélations entre indices de forme et affaiblissements

radioélectriques mesurés pour une campagne de mesures radio (campagne de mesures sur Strasbourg : Campagne COST-CNET trajet IMPG).

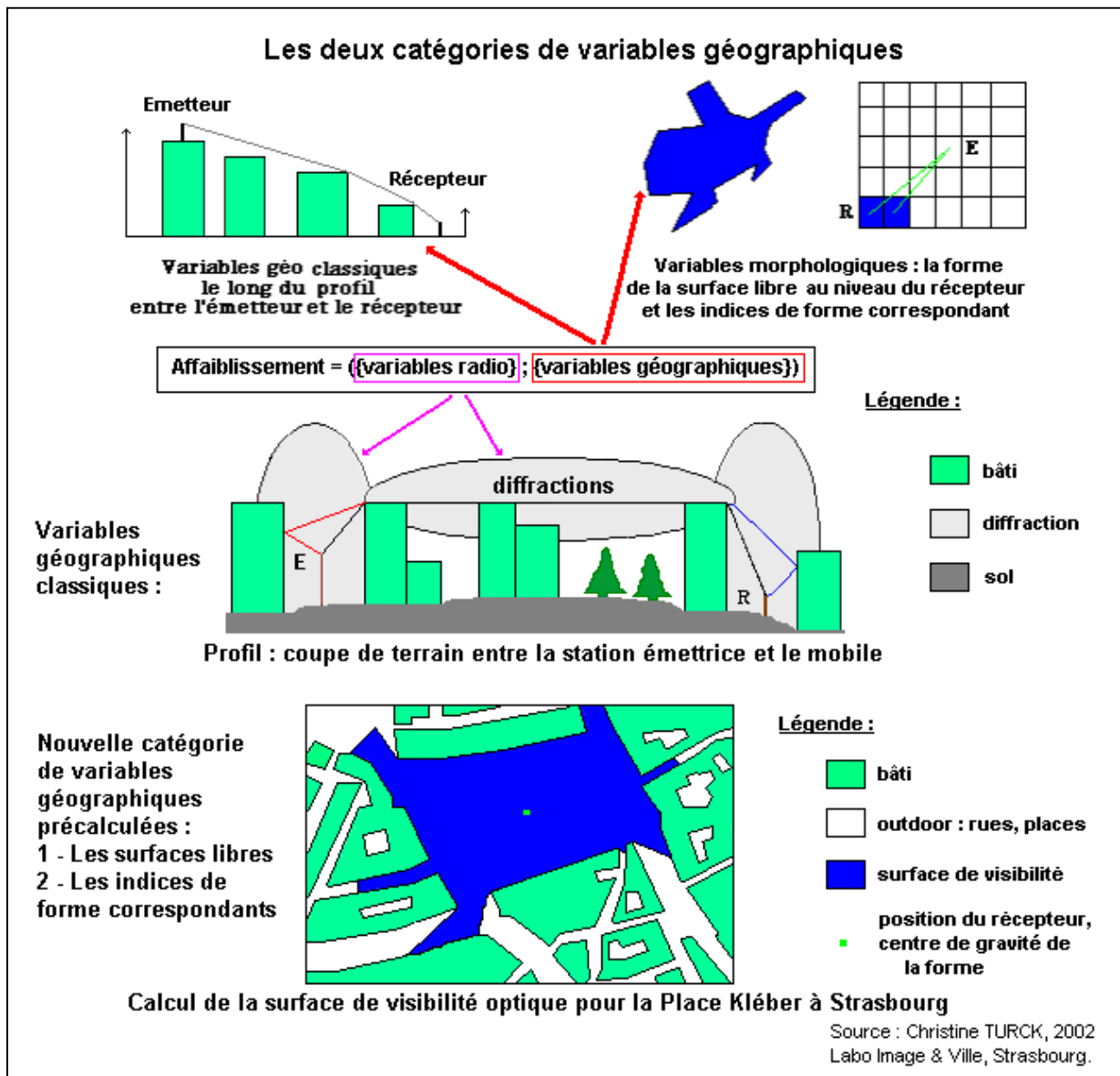


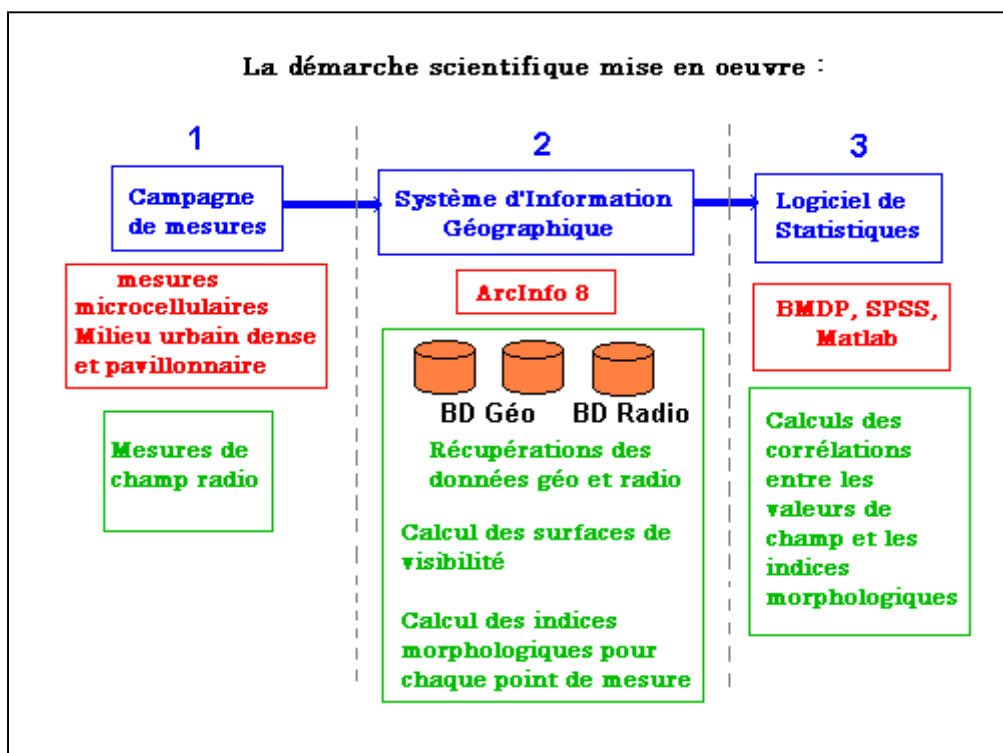
Figure 159 : les différentes catégories de variables géographiques utilisées en modélisation radio.

3.2 – Présentation de la démarche scientifique adoptée

Pour comprendre les relations qui relient la morphologie d'une zone géographique et la propagation des ondes radio sur cette même zone, nous proposons d'utiliser plusieurs types d'indicateurs morphologiques. Ils permettent d'appréhender la forme 2D et éventuellement 3D du relief terrestre, la forme des éléments de sursol (les bâtiments, les zones boisées) et la forme des espaces libres (rues, places).

Avant de vouloir calculer les indices de forme arithmétiques, qui permettent de caractériser les zones de propagation des ondes radio, il faut tout d'abord délimiter l'espace libre autour du récepteur, c'est-à-dire la surface de visibilité. Nous proposons d'utiliser la méthode du lancer de rayon, pour déterminer cet espace.

La figure 160 permet d'illustrer la démarche scientifique mise en œuvre pour valider l'intérêt des indicateurs morphologiques.



Sources : C. Turck, FTR&D, 2002.

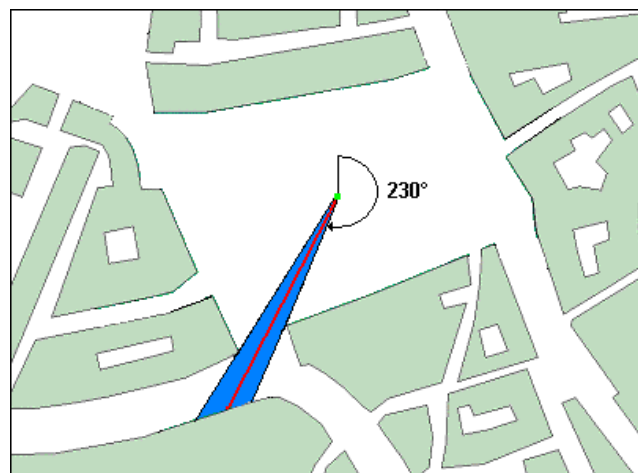
Figure 160 : Démarche scientifique adoptée afin de valider l'utilisation des indicateurs morphologiques en modélisation des ondes radio

3.2.1 - Présentation de la méthode de calcul des surfaces de visibilité optique : Le lancer de rayon

La surface de visibilité représente l'espace libre autour du récepteur. Il est donc nécessaire de prendre en compte les éléments bâtis (bâtiments, gros mobilier urbain, etc.) et végétaux (surfaces boisées, rangées d'arbres), qui jouent le rôle d'obstacle à la propagation des ondes radio.

Elle est calculée à partir des données Contours de Base, qui contiennent les caractéristiques du sursol : le type (bâti, bois, eau, ponts, etc.), la position (X,Y) et la hauteur de sursol (Z).

La figure 161 permet d'illustrer le calcul du lancer de rayon pour un angle de 230 degrés sur la Place Kléber à Strasbourg.



Sources : C. TURCK, 2002
Données : BD TOPO IGN, Logiciel : Arc Info 8

Figure 161 : Principe du lancer de rayon

Légende :

- Position du récepteur, point de départ du rayon
- Rayon
- Portion de surface visible correspondant au rayon
- Bâti
- Outdoor : rues, places, squares, cours intérieures

Le récepteur est représenté par un point (en vert).

Le lancer de rayon dans la direction 230 degrés permet de calculer la distance de visibilité, nommée D_{Vi} , correspondant au lancer de rayon (en rouge).

A partir de la distance de visibilité, nous allons calculer la portion de surface visible, nommée S_{Vi} pour un angle de 230 degrés.

Nous répétons ce calcul pour toutes les directions, donc tous les un degré. Nous obtenons alors 360 portions de surfaces visibles S_{Vi} .

La somme de ces 360 portions de surfaces de base permet d'obtenir la surface de visibilité totale pour le récepteur, nommée S_{tot} .

$$\sum_1^{360} S_{Vi} = S_{tot} \quad (25)$$

Avec :

S_{Vi} : la portion de surface visible

S_{tot} : la surface de visibilité totale du récepteur

Un lancement de rayon dans toutes les directions permet d'estimer la surface de visibilité.

La surface calculée correspond donc à un échantillonnage angulaire de la surface de visibilité.

L'estimation de la surface de visibilité dépend de deux paramètres : le nombre de rayons lancés et la distance maximale D_{max} prise en compte pour le calcul de la distance de visibilité D_{Vi} .

Choix de la distance maximale D_{max} pour le calcul du lancer de rayon :

Définition de la distance de visibilité (D_{max}) : elle correspond à la distance qui sépare le point origine du lancer de rayon et le point d'impact du rayon avec un bâtiment.

Les surfaces de visibilité correspondent à une quantification de l'espace libre autour du récepteur. De ce fait, en milieu urbain dense leur superficie est limitée à l'environnement très proche du récepteur. Nous travaillons à un niveau micro cellulaire.

Dans les paragraphes suivants, nous précisons l'approche et son application.

Dans un premier temps, nous allons effectuer les calculs de lancer de rayon avec une distance maximale de 500 mètres. Pour Strasbourg, la longueur maximale des bâtiments situés autour de la Place Kléber ne dépasse pas les 100 mètres, et la longueur maximale des places et des squares dépasse rarement les 100 mètres, nous effectuerons donc un deuxième calcul de lancer de rayon avec une distance maximale de 100 mètres.

Une fois que les surfaces de visibilité de la zone d'étude auront été délimitées, nous pourrions calculer les indices morphologiques pour ces surfaces.

Pour pouvoir valider l'efficacité de ces indices morphologiques en modélisation radio, nous avons comparé les résultats de calculs des indices morphologiques avec des mesures radio de terrain. Pour cela, nous avons récupéré les résultats de mesure de champ radio (affaiblissement radio moyenné) collectées lors d'une campagne de mesure effectuée en 1997 à Strasbourg Centre-ville, en milieu micro cellulaire, pour une fréquence de 900 MHz. Les calculs de visibilité et des indicateurs morphologiques ont été effectués pour chaque point de mesure radio.

Nous comparons ensuite les valeurs obtenues pour chaque indicateur avec la valeur de champ radio correspondante en étudiant la corrélation statistique entre les deux variables.

Ceci nous permet alors de savoir s'il existe un lien statistique entre les indicateurs morphologiques et l'affaiblissement radio mesuré sur le terrain. Ceci permet aussi de vérifier la validité de l'utilisation des indices morphologiques pour la modélisation radio.

3.3 - Les mesures morphométriques de base

3.3.1 - La longueur

Prenons un objet géographique, par exemple un bâtiment. On peut calculer la longueur moyenne des bâtiments pour une zone géographique donnée. La longueur moyenne sera égale à la longueur totale des bâtiments divisée par le nombre de bâtiments.

$$L_{moy} = \frac{\sum_i L}{n_i} = \frac{L_{tot}}{n_i} \quad (26)$$

Avec :

L_{moy} : la longueur moyenne des bâtiments

L_{tot} : la somme des longueurs de tous les bâtiments

n_i : le nombre de bâtiments.

Remarque : Pour un polygone, L correspond à la longueur du plus grand axe, c'est-à-dire la distance séparant les deux points les plus éloignés.

3.3.2 - La hauteur

La hauteur correspond à l'espace 2D occupé par un objet géographique (bâti, bois, etc.) et un plan à une altitude donnée (le plus souvent le niveau du sol).

La hauteur correspond à la valeur Z_h du bâti, qui correspond le plus souvent à la hauteur du bâti sous gouttière. Mais la valeur Z_h peut aussi correspondre à la hauteur moyenne de la construction.

On va par exemple calculer la hauteur moyenne des murs en mètres, la hauteur moyenne de bois par maille ou par surface.

3.3.3 - La surface

Dans notre cas, la surface calculée correspondra à une vue planimétrique d'une entité ou d'une surface polygone. La surface est une mesure arithmétique en deux dimensions, elle est exprimée en unités carrées, comme par exemple calculer la surface au sol ou bien la superficie déployée des murs.

3.3.4 - Le volume

Dans notre cas, le volume correspond à l'espace occupé entre une surface et un plan à une altitude donnée.

Le volume est une mesure arithmétique en trois dimensions, il est exprimé en unités cubes.

On calculera par exemple le volume inscrit (V_i) pour un bâtiment.

3.3.5 - La densité

La densité correspond à une mesure de quantité ou amplitude (de phénomènes, d'objets géographiques comme par exemple des bâtiments, des points) par unité de surface.

$$d = \frac{\text{quantité}}{\text{surface}} \quad (27)$$

$$d = \frac{n}{S} \quad (28)$$

Avec :

d : la densité

n : le nombre d'objets géographiques

S : la superficie de la zone étudiée

On pourra par exemple calculer la densité du bâti, la densité des espaces libres, la densité de population.

3.3.6 – Les indices de relief

L'influence du relief sur la propagation des ondes radio se conçoit aisément, car de nombreux paramètres radio varient avec l'altitude, la pente et la morphologie de la zone. Le relief se détermine lui aussi au moyen d'indices ou de caractéristiques suivants :

3.3.6.1 - La courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente d'une zone, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface de la zone en fonction de son altitude. Elle porte en abscisse la surface (ou le pourcentage de surface) de la zone qui se trouve au-dessus (ou au-dessous) de l'altitude représentée en ordonnée (figure 162). Elle exprime ainsi la superficie de la zone ou le pourcentage de superficie, au-delà d'une certaine altitude.

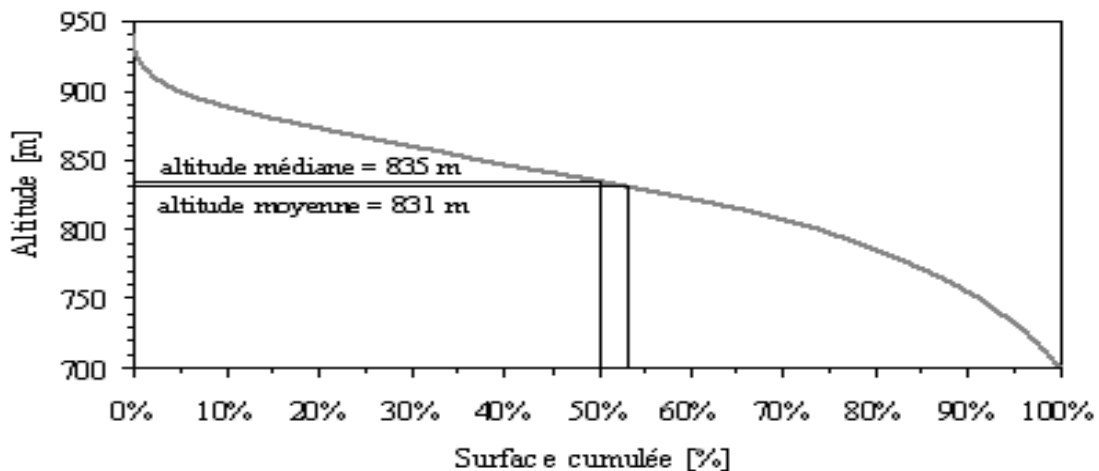


Figure 162 : Exemple de courbe hypsométrique

Les courbes hypsométriques demeurent un outil pratique pour comparer plusieurs zones géographiques entre elles, notamment en milieu montagneux ou bien les diverses sections d'une même zone géographique, notamment le versant d'une montagne. Elles peuvent en outre servir à la détermination de la réflexion moyenne sur les facettes d'un flanc de montagne et donnent des indications quant au comportement radioélectrique de la zone.

3.3.6.2 - Les altitudes caractéristiques

3.3.6.2.1 - Les altitudes maximale et minimale

Elles sont obtenues directement à partir de cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus élevé de la zone tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas. Elles déterminent l'amplitude altimétrique d'une zone et interviennent aussi dans le calcul de la pente.

3.3.6.2.2 - L'altitude moyenne

L'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique. On peut la définir comme suit :

$$H_{moy} = \sum \frac{A_i \cdot h_i}{A} \quad (29)$$

Avec :

H_{moy} : altitude moyenne d'une zone (en mètres),

A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau (en kilomètres carrés),

h_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau (en mètres),

A : superficie totale de la zone (en kilomètres carrés).

L'altitude moyenne est peu représentative de la réalité. Toutefois, elle est parfois utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre de modèles hydrologiques.

3.3.6.2.3 - L'altitude médiane

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale de la zone géographique, sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique de la zone concernée présente une pente régulière.

3.3.6.3 – La pente

3.3.6.3.1 - La pente moyenne

La pente moyenne est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie d'une zone. Elle est considérée comme une variable indépendante. Plusieurs méthodes ont été développées pour estimer la pente moyenne d'une zone donnée. Toutes se basent sur une lecture d'une carte topographique réelle ou approximative. La méthode proposée par Carlier et Leclerc (1964) consiste à calculer la moyenne pondérée des pentes de toutes les surfaces élémentaires comprises entre deux altitudes données. Une valeur approchée de la pente moyenne est alors donnée par la relation suivante :

$$i_m = \frac{D.L}{A} \quad (30)$$

Avec :

i_m : pente moyenne (en mètres par kilomètre ou ‰),

L : longueur totale de courbes de niveau (en kilomètres),

D : équidistance entre deux courbes de niveau (en mètres),

A : surface de la zone (en kilomètres carrés).

Cette méthode de calcul donne de bons résultats dans le cas d'un relief modéré et pour des courbes de niveau simples et uniformément espacées. Dans les autres cas, il convient de styliser les courbes de niveau pour que leur longueur totale ait un sens réel vis-à-vis de la pente.

Le calcul de la pente moyenne tout comme celui de leur exposition (orientation des pentes) peut-être assez facilement automatisée en se basant sur des données numériques représentant la topographie des bassins versants (Modèle Numérique d'Altitude).

3.3.6.3.2 - L'indice de pente i_p

Cet indice se calcule à partir du rectangle équivalent. Il est égal à la somme des racines carrées des pentes moyennes de chacun des éléments pondérés par la surface intéressée, soit :

$$i_p = \frac{1}{L} \cdot \sum_{i=1}^n \left(x_i \cdot \sqrt{\frac{d}{x_i}} \right) \quad (31)$$

Avec :

i_p : indice de pente (en %),

L : longueur du rectangle (en mètres),

x_i : distance qui sépare deux courbes sur le rectangle (en mètres) [la largeur du rectangle étant constante, cette distance est égale au facteur de pondération],

d : distance entre deux courbes de niveau successives (en mètres),

d/x_i : pente moyenne d'un élément (en %).

La notion de rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius, introduite par Roche (1963), permet de comparer facilement des zones géographiques.

La zone géographique rectangulaire résulte d'une transformation géométrique de la zone réelle dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre (ou le même coefficient de compacité) et donc par conséquent la même répartition hypsométrique. Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles aux petits côtés du rectangle. La répartition des sols, la couverture végétale restent inchangées entre les courbes de niveau.

Si L et l représentent respectivement la longueur et la largeur du rectangle équivalent, alors :

Le périmètre du rectangle équivalent vaut :

$$P = 2(L + l) \quad (32)$$

La surface :

$$A = Ll \quad (33)$$

Le coefficient de compacité :

$$K_G = \frac{0.28P}{\sqrt{S}} \quad (34)$$

En combinant ces trois relations, on obtient :

$$L = \frac{K_G \cdot \sqrt{S}}{1.12} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right) \text{ si } K_G \geq 1.12 \quad (35)$$

Le tracé des droites de niveau du rectangle équivalent découle directement de la répartition hypsométrique cumulée.

3.4 – Les indicateurs morphologiques globaux : la rugosité

Un autre type d'indicateur morphologique intéressant à prendre en compte afin de décrire la morphologie en milieu urbain, périurbain, rural et montagnoux correspond à la rugosité. Les indicateurs de rugosité permettent d'avoir une appréciation mathématique globale de l'aspérité d'une surface, de la même manière que l'œil perçoit les aspérités de surface grâce à la texture des objets, ou que la main perçoit les aspérités d'un objet grâce au touché (la rugosité de la peau d'une orange, la douceur de la peau d'une mangue, etc.).

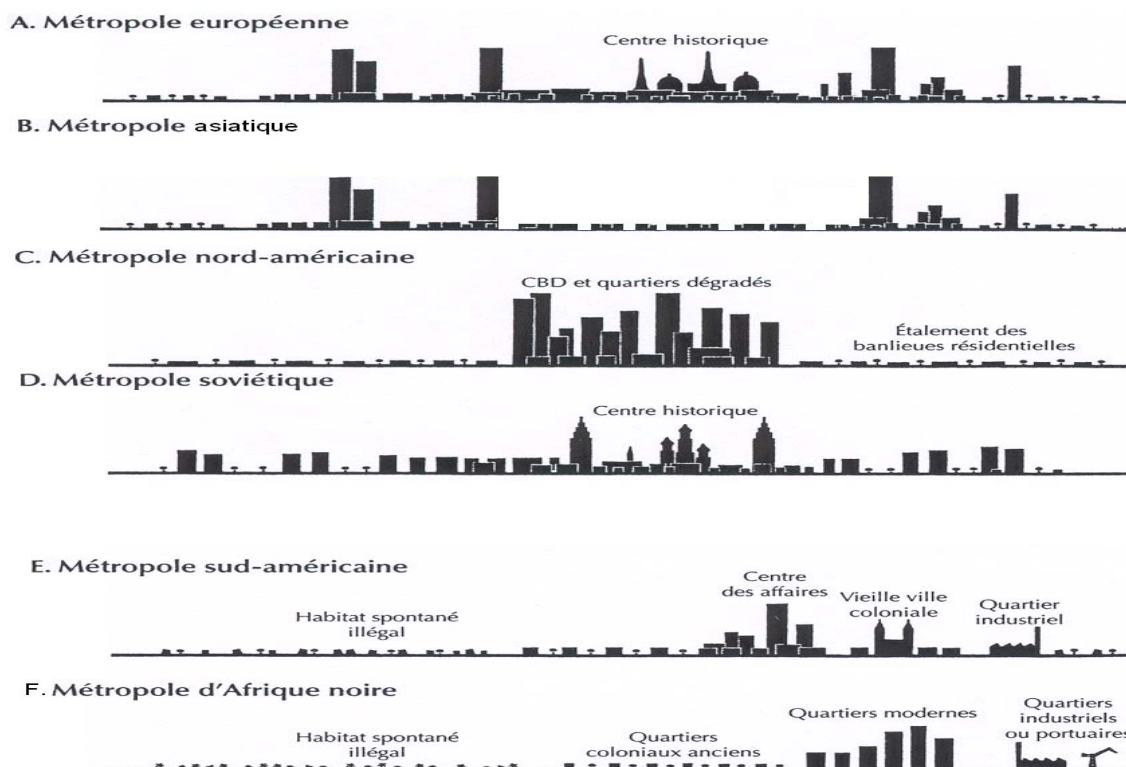
La rugosité peut-être abordée de différentes manières :

- soit de manière surfacique (la rugosité surfacique) : nous nous intéressons à la rugosité à la surface des objets géographiques en 2,5 D ou 3D. Pour cela, nous avons utilisé le SIG, afin de superposer une grille maillée au dessus des couches d'informations volumiques contenant l'altitude du sol et la hauteur du sursol, en 2,5 D. Cette grille maillée est alors utilisée un peu à la manière d'un Modèle Numérique de Terrain. Nous en extrayons certaines valeurs que nous utilisons pour calculer la valeur de la rugosité surfacique.
- soit en mode profil (la rugosité Z_0 , selon l'altitude du sol Z et du sursol Z_H) : la rugosité Z_0 est calculée sur la coupe de profil du sol et du sursol (figure 163, 164). Elle permet d'avoir une appréciation des aspérités (des espaces vides/espaces pleins, etc.) de la fluidité du milieu, etc. Elle correspond donc à un indicateur morphologique intéressant à utiliser en modélisation radioélectrique, ainsi qu'en analyse spatiale en géographie et dans le module d'analyse spatiale d'OpenMorph.



Sources : C. Turck, LIV, 2004.

Figure 163 : Profil et rugosité Z_0 en milieu urbain, pour les villes françaises de taille moyenne



Sources : C. Turck, 2005, d'après J-P. Paulet, 2000.

Figure 164 : Profils et rugosité en milieu urbain : profils différents selon le continent

3.5 - Les indices de forme arithmétiques

Il existe différents indicateurs morphologiques permettant de caractériser le milieu, de rendre compte des aspects généraux des macro formes¹⁷⁴, c'est-à-dire des objets géographiques de taille macro, ainsi que de pouvoir comparer les zones morphologiques entre elles.

L'étude de la morphologie des zones géographiques est également importante pour les ingénieurs en télécommunications radioélectriques, car elle permet de mieux comprendre le comportement radioélectrique dans ces zones.

Les indices permettent de classer les surfaces de visibilité.

3.5.1 – Présentation des indices de forme

Indices	Nom	Origine	Formule de base	Formule calculatoire	Intervalle de variation
I_A	Indice d'aplatissement		$I_A = \frac{R_i}{R_c}$		[0,1]
I_C	Indice de compacité		$I_C = \frac{S}{S_c}$	$I_C = \frac{S}{\pi R_c^2}$	[0,1]
K_G	Coefficient de compacité de Gravélius	Gravélius 1963	$K_G = \frac{P}{2\pi\sqrt{\frac{S}{\pi}}}$	$K_G = \frac{0.28P}{\sqrt{S}}$	[1, +∞[
I_M	Indice de circularité	Miller 1953	$I_M = \frac{S}{\pi \frac{P^2}{2\pi}}$	$I_M = \frac{12.56S}{P^2}$	[0,1]
I_H	Indice de forme	Morton 1932	$I_H = \frac{S}{\frac{1}{2}L^2\pi}$	$I_H = \frac{S1,27}{L^2} = \frac{S}{\pi(0,5L)^2}$	[0,1]
I_S	Indice d'élongation	Schumm 1956	$I_S = \frac{\sqrt{\frac{S}{\pi}}}{L}$	$I_S = \frac{\sqrt{S}}{L\sqrt{\pi}}$	[0, +0,5]
I_E	Indice elliptique	Stoddart 1965	$I_E = \frac{L}{2\frac{S}{\pi\frac{L}{2}}}$	$I_E = \frac{\pi L^2}{4S}$	[1, +∞[
I_K	Indice B.K.	Kostrubiec 1971	$I_K = \frac{P^2}{S} - 12.56$		[0, +∞[
K_f	Coefficient de forme		$K_f = \frac{l_{moyen}}{L_{max}}$		[0,1]

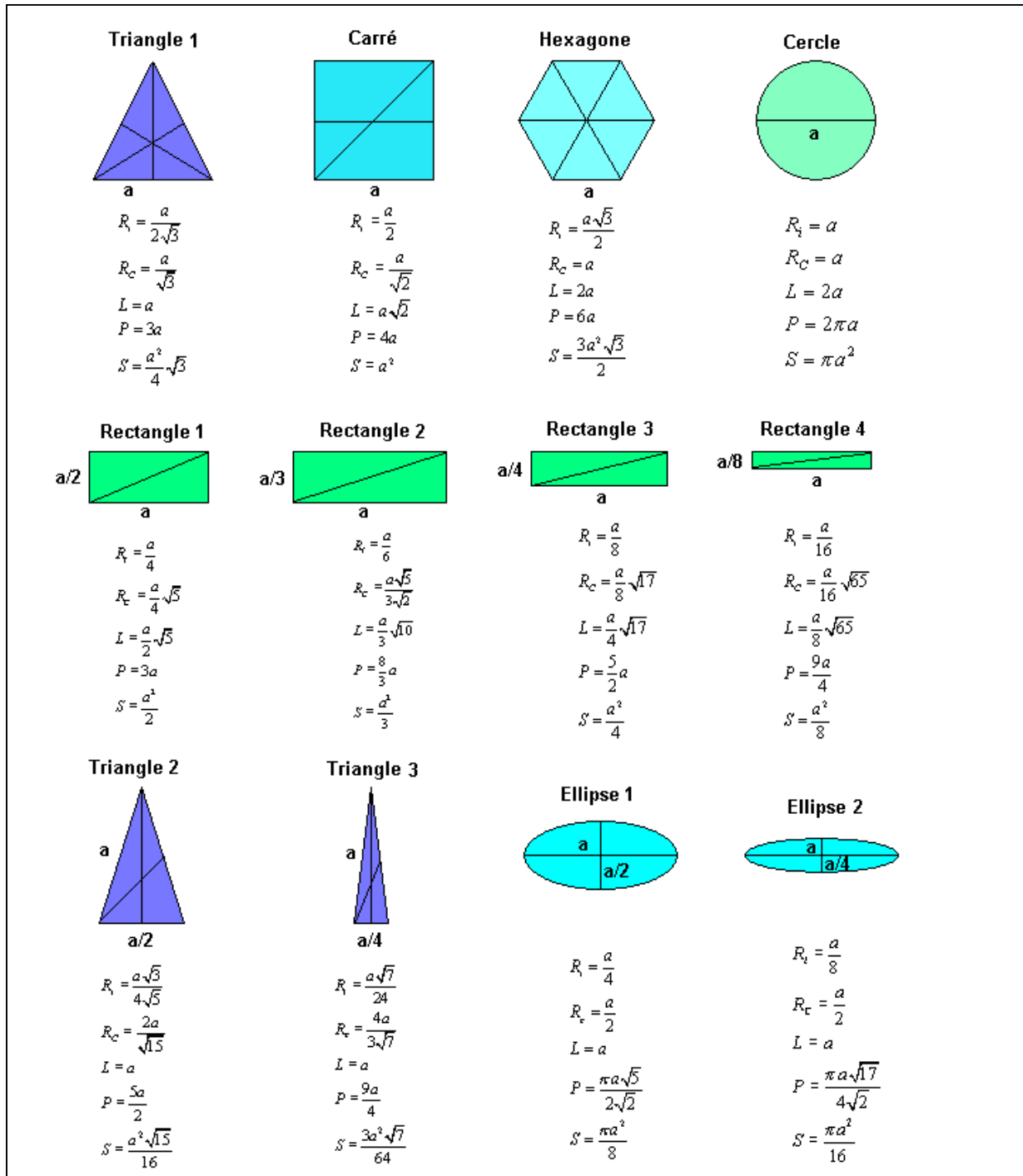
Sources : C.Turck, LIV, 2001, d'après C. Cauvin, 1976.

Figure 165 : Les principaux indices de forme géométrique

¹⁷⁴ Se référer aux travaux du géographe américain P. Haggett, publiés en 1973.

Nous utiliserons 7 indices de forme couramment implémentés dans les études de morphologie urbaine, auxquels nous ajouterons l'indice de Benjamin Kostrubiec et le Coefficient de forme.

Ces indices prennent des valeurs spécifiques pour certaines géométries (figures 164 et 165) et facilitent ainsi les classements.



Sources : C. Cauvin, 1976.

Figure 166 : Indices de forme : référentiels

Indice	Triangle			Rectangle				Ellipse		Carré	Hexagone	Cercle
	T1	T2	T3	R1	R2	R3	R4	E1	E2			
I _A	0.5	0.375	0.219	0.447	0.316	0.243	0.124	0.5	0.25	0.707	0.866	1
I _C	0.414	0.289	0.156	0.510	0.382	0.300	0.157	0.5	0.25	0.638	0.827	1
K _G	1.28	1.42	1.79	1.19	1.29	1.4	1.78	1.11	1.45	1.12	1.04	1
I _M	0.604	0.486	0.308	0.698	0.589	0.502	0.310	0.8	0.470	0.785	0.906	1
I _H	0.55	0.307	0.158	0.508	0.381	0.299	0.156	0.498	0.249	0.635	0.83	1
I _S	0.371	0.278	0.199	0.357	0.309	0.274	0.198	0.354	0.25	0.399	0.455	1
I _E	1.813	3.243	6.33	1.96	2.62	3.34	6.38	2	4	1.57	1.21	1

Sources : C. Cauvin., 1976.

Figure 167 : Valeurs des indices pour les formes de référence

3.5.2 - L'indice d'aplatissement

L'indice d'aplatissement permet d'évaluer le taux d'aplatissement d'une forme, d'une surface, d'une zone géographique :

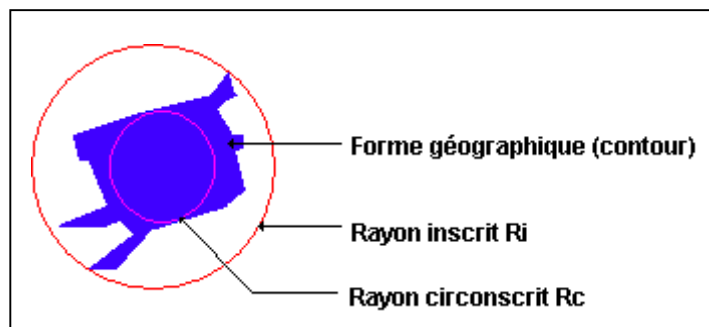
$$I_A = \frac{R_i}{R_c} \quad (36)$$

Avec :

I_A : l'indice d'aplatissement

R_i : le rayon du cercle inscrit dans la zone (le R_{max})

R_c : le rayon du cercle circonscrit dans la zone (le R_{min})



Sources : C.Turck, LIV, 2002.

Figure 168 : visualisation des cercles inscrit et circonscrit

3.5.3 - L'indice de compacité

L'indice de compacité I_C revient à comparer la zone géographique (son contour) à un cercle.

Formule mathématique de base :

$$I_C = \frac{S}{S_c} \quad (37)$$

Avec :

I_C : l'indice de compacité

S : la surface de la zone géographique

S_c : la surface du cercle circonscrit à l'intérieur de la zone

Formule calculatoire :






$$I_C = \frac{S}{\pi R_c^2} \quad (38)$$

Avec :

R_c : le rayon du cercle circonscrit à l'intérieur de la zone

C'est la formule calculatoire qui sera mise en œuvre dans le Système d'Information Géographique dans les calculs de morphologie urbaine.

Valeurs de référence pour l'indice de compacité I_C

Indice de compacité I_C	0	1	1,12	1,3	2,1	2,5	infini
Formes géométriques							
Milieu géographique	Open	Rural & Pavillonnaire (places)	Rural & Pavillonnaire (rue)	Urbain dense & très dense	Urbain dense & très dense		

Source : Christine TURCK, 2002
Labo Image & Ville, Strasbourg

Figure 169 : valeurs de référence pour l'indice de compacité I_C

3.5.4 – Le coefficient de compacité de Gravélius

Le coefficient de compacité de Gravélius (1914) K_G , est défini comme le rapport du périmètre d'une zone (comme pour une figure géométrique) au périmètre du cercle ayant la même surface :

Formule mathématique de base :

$$K_G = \frac{P}{2\pi\sqrt{\frac{S}{\pi}}} \quad (39)$$

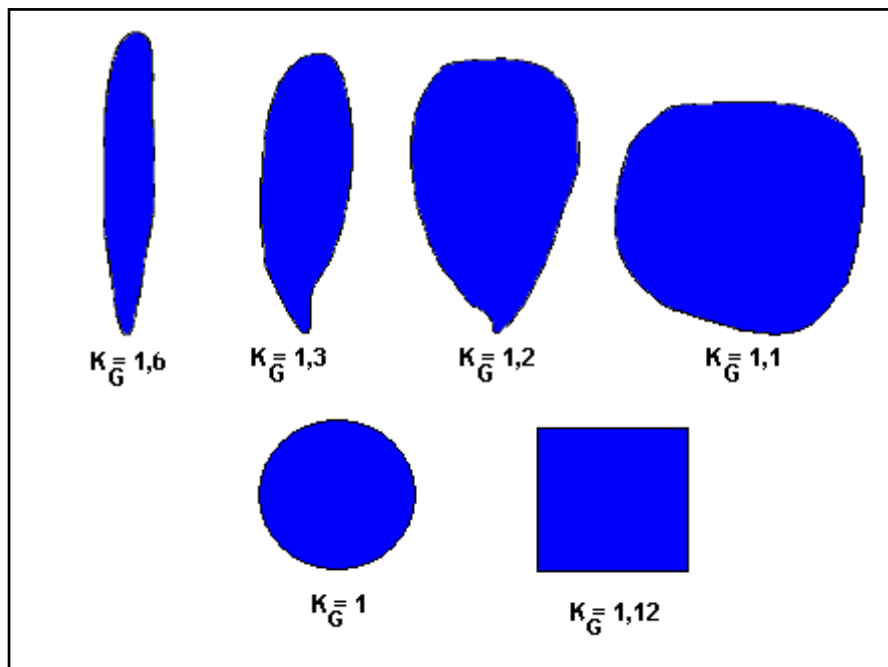
Avec :

K_G est l'indice de compacité de Gravélius¹⁷⁵,
 S : la surface de la zone géographique [km²],
 P : le périmètre de la zone [km]

Formule calculatoire :

$$K_G = \frac{0.28P}{\sqrt{S}} \quad (40)$$

Ce coefficient se détermine à partir d'une carte topographique en mesurant le périmètre de la zone et sa surface. Il est proche de 1 pour une zone de forme quasiment circulaire et supérieure à 1 lorsque la zone est de forme allongée, tel qu'illustré par la figure 170. Pour un carré il est égal à 1,12.



Sources : B. Kostrubiec, LIV, 1998.

Figure 170 : Exemples de coefficients de compacité

¹⁷⁵ Gravélius, Docteur en Géographie Physique (Hydrologie : bassins versants), 1914.

3.5.5 - L'indice de circularité de Miller

L'indice de Miller (1953) compare la forme d'une zone à celle d'un cercle qui aurait le même périmètre que la zone.

Ceci peut s'écrire :

$$I_M = \frac{\text{Surface } S \text{ réelle de la zone}}{\text{Surface du cercle ayant le même périmètre}}$$

Formule mathématique de base :

$$I_M = \frac{S}{\pi \frac{P^2}{2\pi}} \quad (41)$$

Avec :

I_M : l'indice de circularité

P : le périmètre de la zone

S : la surface de la zone

Formule calculatoire :

$$I_M = \frac{12.56S}{P^2} \quad (42)$$






Avec $0 \leq I_M \leq 1$

$I_M = 0$ pour une zone linéaire (surface nulle)

$I_M = 0.785$ pour une zone de forme carrée

$I_M = 1$ pour une zone idéale parfaitement circulaire.

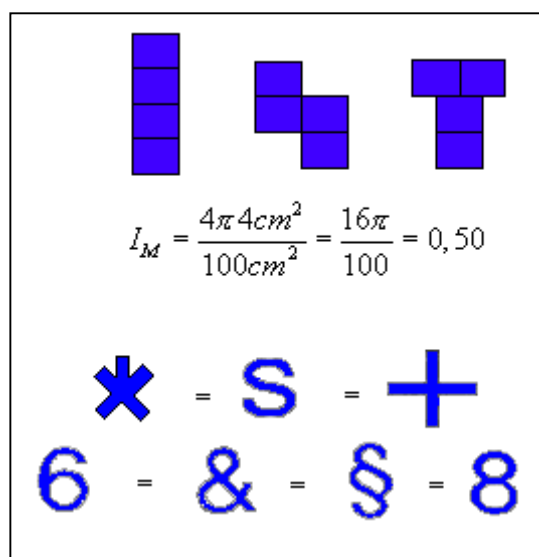
Valeurs de référence pour l'indice de circularité I_M

Indice de circularité I_M	0	0.5	0.685	0.785	1
Formes géométriques					
Milieu géographique	Rural & Pavillonnaire (rue)	Rural & Pavillonnaire	Urbain dense & très dense	Rural & Pavillonnaire (places)	Open

Source : Christine TURCK, 2002
Labo Image & Ville, Strasbourg

Figure 171 : valeurs de référence pour l'indice de circularité

Remarque : Quelques figures, chacune de 10 cm de périmètre et de 4 cm² de surface ayant diverses formes, échappent à la discrimination et correspondent à la même valeur de l'indice I_M (figure 172) :



Sources : B. Kostrubiec, LIV, 1998.

Figure 172 : Formes caractéristiques présentant la même valeur d'indice I_M

3.5.6 – L'indice de forme de Morton

L'indice de forme de Morton (1932) permet d'apprécier l'étalement de la forme d'une zone géographique par rapport à sa surface.

Formule mathématique de base :

$$I_H = \frac{S}{\frac{1}{2} L^2 \pi} \quad (43)$$

Avec :

I_H : l'indice de Morton

S : la surface de la zone

L : la longueur, l'élongation de la zone (le diamètre maximum)

Formule calculatoire :

$$I_H = \frac{S1,27}{L^2} = \frac{S}{\pi(0,5L)^2} \quad (44)$$






$I_H = 1$ pour un cercle de rayon 1

$I_H = 0.636$ pour un carré de coté 1

$I_H = 0.126$ pour un rectangle de largeur 1 et de longueur 10.

Donc si la forme d'une zone est plutôt étirée l'indice I_H tend vers zéro.

Valeurs de référence pour l'indice de forme I_H

Indice d'étirement I_H	0	0.126	0.21	0.47	0.636	1
Formes géométriques						
Milieu géographique		Rural & Pavillonnaire (rue)	Urbain dense & très dense	Urbain dense & très dense	Rural & Pavillonnaire (places)	Open

Source : Christine TURCK, 2002
Labo Image & Ville, Strasbourg

Figure 173 : valeurs de référence pour l'indice de forme I_H

3.5.7 – L'indice d'élongation de Schumm

L'indice de Schumm (1956) permet d'apprécier l'élongation d'une zone géographique d'après sa forme géométrique.

Formule mathématique de base :

$$I_s = \frac{\sqrt{\frac{S}{\pi}}}{L} \quad (45)$$

Avec :

I_s : l'indice d'élongation

S : la surface de la zone

L : la longueur, l'élongation de la zone (le diamètre maximum)

Formule calculatoire :

$$I_s = \frac{\sqrt{S}}{L\sqrt{\pi}} \quad (46)$$

3.5.8 – L'indice elliptique de Stoddart

L'indice de Stoddart (1965) compare la forme de la zone à celle d'une ellipse.

Formule mathématique de base :

$$I_E = \frac{L}{\frac{S}{2\frac{L}{\pi\frac{L}{2}}}} \quad (47)$$

Avec :

I_E : l'indice elliptique

S : la surface de la zone

L : la longueur, l'élongation de la zone (le diamètre maximum)

Formule calculatoire :

$$I_E = \frac{\pi L^2}{4S} \quad (48)$$

3.5.9 - L'indice B.K

L'indice I_K de Kostrubiec¹⁷⁶ (1971), il dérive de Miller :

$$I_K = \frac{P^2}{S} - 12,56 \quad (49)$$

Avec :

I_K : l'indice B.K

P : le périmètre de la zone

S : la surface de la zone

$$0 \leq I_K \leq \infty$$

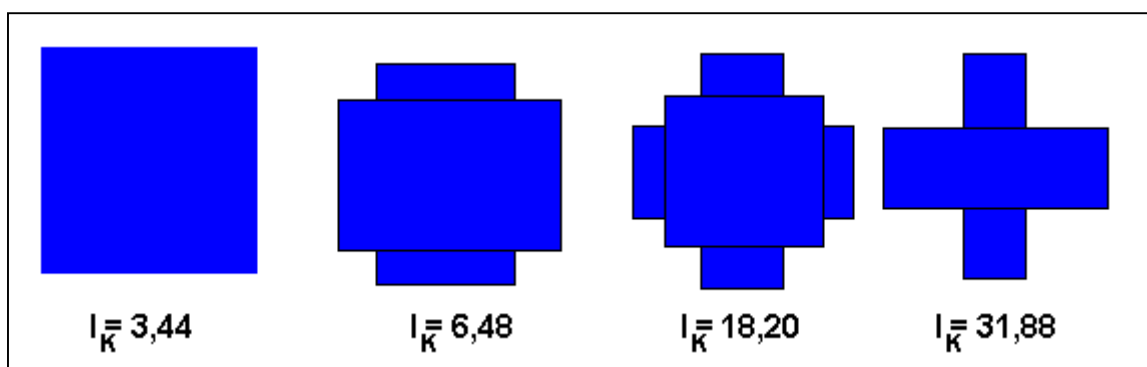
L'indice varie de zéro vers l'infini, et pour le cercle prend la valeur minimale zéro.

	Surface	Périmètre	Indice I_K
Cercle	πr^2	$2\pi r$	0
Carré	a^2	$4a$	3,44
Triangle rectangle	$\frac{a^2}{2}$	$a(2 + \sqrt{2})$	10,64
Rectangle	ab	$2(a+b)$	$4\left(2 + \frac{a}{b} + \frac{b}{a}\right) - 12,56$
Ellipse	πab	$\pi(a+b)$	$\pi\left(2 + \frac{a}{b} + \frac{b}{a}\right) - 12,56$
Hexagone	$9 \frac{a^2}{2\sqrt{3}}$	$6a$	1,30 pour a=1
Hexagone régulier	$\rho^2 \tan \beta$	$2\pi \tan \beta$	$4\pi\rho \tan \beta - 12,56$

Sources : B. Kostrubiec, LIV, 1998.

Où a est le côté, ρ est la hauteur du triangle et β son angle.

Figure 174 : Valeurs de l'indice I_K pour les formes de référence



Sources : B. Kostrubiec, LIV, 1998.

Figure 175 : Exemples de valeurs d'indice I_K

Remarque : Ces quatre figures ont le même périmètre $P = 10$, mais les différentes surfaces provoquent l'augmentation des valeurs de l'indice de forme B. K.

¹⁷⁶ Benjamin Kostrubiec, Docteur en Géographie et en Mathématiques, Professeur de Géographie Théorique et Quantitative, Université de Silésie (2005), Pologne.

3.5.10 - Le coefficient de forme K_f

Le coefficient de forme K_f revient à comparer la zone à un carré

Formule mathématique de base :

$$K_f = \frac{l_{moyen}}{L_{max}} \quad (50)$$

Avec :

K_f : le coefficient de forme de la zone

l_m : la largeur moyenne de la zone

L_{max} : la longueur maximale de la zone

$$0 \leq K_f \leq 1$$

3.5.11 – Etude algorithmique et implémentation du calcul des indices de forme

Du point de vue algorithmique, la difficulté réside dans le fait que les variables géométriques qui entrent dans le calcul des indices de forme concernent des polygones irréguliers. En mathématique il n'existe pas de formule mathématique toute prête permettant de calculer le rayon circonscrit, le rayon inscrit et l'élongation maximale et la largeur maximale pour un polygone quelconque (c'est-à-dire soit convexe, soit concave, régulier ou irrégulier).

3.5.11.1 - Etude algorithmique : implémentation du calcul des indices de forme géographiques

La méthode de calcul des indices de forme pour une zone géographique donnée peut être subdivisée en deux phases : une phase de calcul des surfaces de visibilité, suivie d'une phase de calcul des indices de forme correspondant.

Les surfaces de visibilité ont été obtenues grâce à la technique du lancer de rayon. Les formes géométriques ainsi obtenues correspondent à **des polygones irréguliers**.

La deuxième phase de notre travail va considérer le calcul des valeurs des indices de forme pour ces polygones.

Le langage de programmation utilisé dans le Système d'Information Géographique ArcView version 3 est un langage propriétaire d'ESRI (l'éditeur du logiciel ArcView) : le langage AVENUE. C'est un langage de scripts orienté objet.

Algorithmes géométriques pour le calcul des indices de forme :

Les variables mathématiques nécessaires pour effectuer le calcul des 9 indices de forme pour chaque polygone sont au nombre de six : **la Surface** du polygone, **le Périmètre**, **le Rayon Circonscrit** au polygone, **le Rayon Inscrit** dans le polygone, **l'Elongation Maximale**, et **la Largeur Maximale** du polygone.

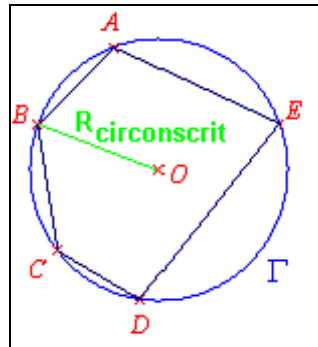
Nous avons donc été amené à mettre au point des approximations pour ces quatre variables géométriques (R_I et R_C , L_{Max} et I_{Max}), afin de pouvoir calculer ces variables quelque soit la forme du polygone.

Mise au point de l'algorithme de calcul du Rayon Inscrit et du Rayon Circonscrit :

Faisons d'abord quelques rappels de Géométrie :

Circonscrit (cercle - à un polygone) :

Un cercle est circonscrit à un polygone lorsqu'il passe par tous ses sommets. Un tel cercle n'existe pas toujours.



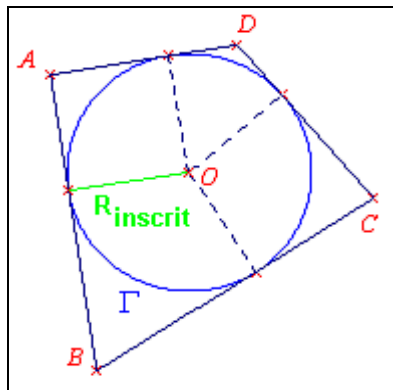
Sources : C.Turck, LIV, 2002.

Figure 176 : visualisation du rayon circonscrit à un polygone

Le cercle Γ est circonscrit au pentagone $ABCDE$.

Inscrit (cercle - dans un polygone convexe) :

Un cercle est inscrit dans un polygone convexe lorsqu'il est tangent à tous ses côtés. Un tel cercle n'existe pas toujours.



Sources : C.Turck, LIV, 2002.

Figure 177 : visualisation du rayon inscrit dans un polygone

Le cercle Γ est inscrit dans le quadrilatère $ABCD$.

Si R_I est le rayon du cercle inscrit, et R_C celui du cercle circonscrit, on peut démontrer les formules suivantes (figure 178) :

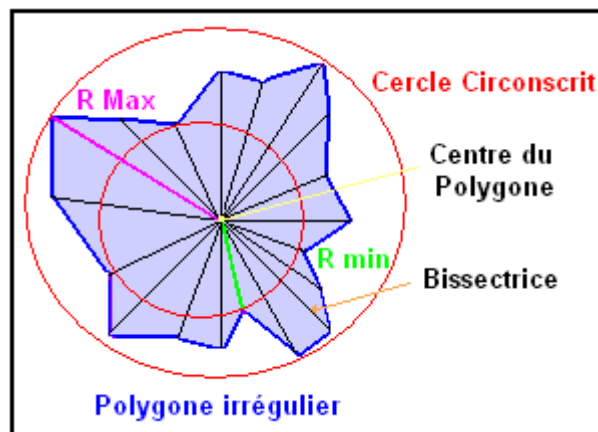
	R_I	R_C	Périmètre	Surface
Disque de rayon x	x	x	$P = 2\pi x$	$S = \pi x^2$
Triangle de côtés a , b , c et de surface S	$\frac{2S}{(a+b+c)}$	$\frac{(abc)}{4S}$	$P = (a+b+c)$	Notons $p = \frac{P}{2}$, $S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}$
Carré de côté a	$\frac{a}{2}$	$\frac{a}{\sqrt{2}}$	$P = 4a$	$S = a^2$
Hexagone régulier de côté a	$\frac{a\sqrt{3}}{2}$	a	$P = 6a$	$S = \frac{3a^2\sqrt{3}}{2}$

Sources : C.Turck, LIV, 2002.

Figure 178 : Valeurs des rayons inscrit et circonscrit pour quelques formes géométriques de référence

Le centre du cercle inscrit dans un triangle est le point de concours de ses bissectrices.
 Le centre du cercle inscrit dans un losange est le point d'intersection de ses diagonales.
 Un rectangle qui n'est pas un carré n'a pas de cercle inscrit.

Un polygone possède un cercle inscrit si et seulement si ses bissectrices sont concourantes.
 Dans ce cas, leur point de concours est le centre du cercle inscrit dans le polygone.



Sources : C.Turck, LIV, 2002.

Figure 179 : Illustration du Cercle Inscrit et du Cercle Circonscrit à un polygone quelconque

Le centre du cercle circonscrit à un triangle est le point de concours des médiatrices de ses côtés.

Le centre du cercle circonscrit à un rectangle est le point d'intersection de ses diagonales.

Un losange qui n'est pas un carré n'a pas de cercle circonscrit.

Généralisation du calcul des rayons R_C et R_I à tout type de polygone (régulier ou non) :

Calcul du Rayon inscrit et du rayon circonscrit pour un polygone irrégulier :

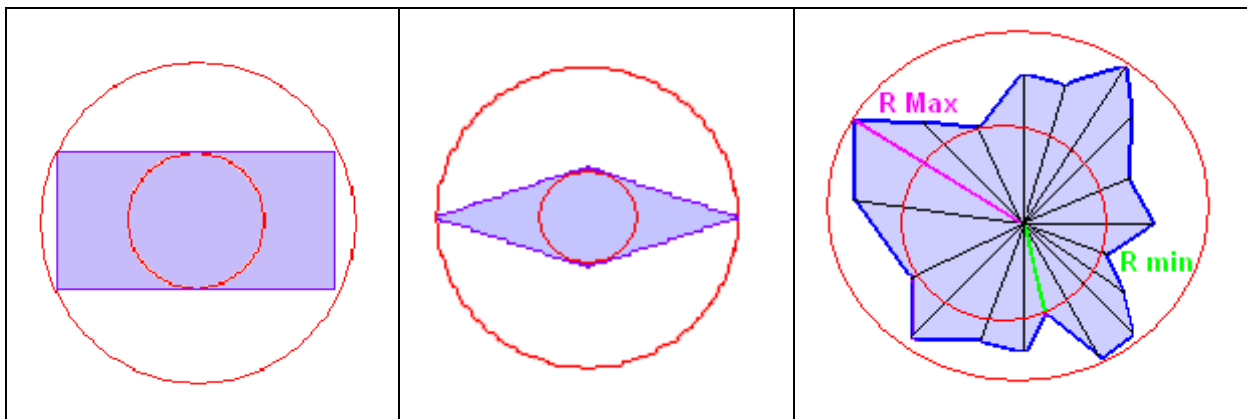
Pour des figures qui ne sont pas des polygones réguliers, il sera nécessaire d'adapter les constructions employées.

On définit :

Un cercle **Pseudo Circonscrit** à une figure est le plus petit cercle pouvant la contenir entièrement.

Un cercle **Pseudo Inscrit** dans une figure est le plus grand cercle que la figure peut contenir entièrement.

Du point de vue algorithmique, cette formule revient à calculer **le rayon minimum** et **le rayon maximum** du polygone.



Sources : C.Turck, LIV, 2002.

Figure 180 : Illustration de cercles pseudo inscrit et pseudo circonscrit à une figure

On peut donc écrire :

Rayon Pseudo inscrit = R_{PI} = Rayon Maximum = R_{Max} = Distance $_{Max}$

Rayon Pseudo circonscrit = R_{PC} = Rayon Minimum = R_{Min} = Distance $_{Min}$

3.5.11.2 - Algorithme de calcul de la largeur Maximale pour un polygone quelconque

Soit P un polygone quelconque.

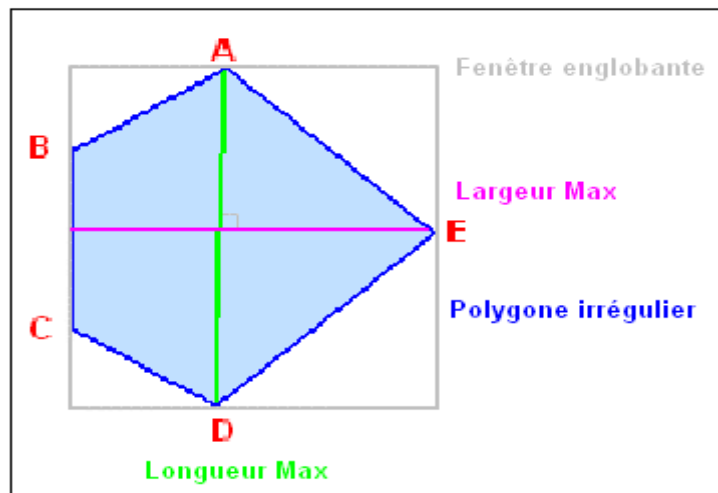
On délimite la fenêtre englobant le polygone P , de telle manière que deux des cotés soient parallèles à la Longueur Maximale du Polygone.

On cherche à calculer la largeur Maximale pour ce polygone.

La largeur Maximale est orthogonale à la Longueur Maximale.

On calcul la longueur de tous les segments de droites (arcs) orthogonaux au segment de droite L_{Max} du polygone.

On stocke la valeur du segment le plus grand. Ce segment de droite correspond à la largeur maximale du polygone.



Sources : C.Turck, LIV, 2002.

Figure 181 : Visualisation de la largeur Maximale d'un polygone quelconque

Cette méthode de calcul de la largeur Maximale n'est pas optimale. Elle est fastidieuse et nécessite un temps de calcul élevé.

Nous avons donc décidé de procéder d'une autre manière pour calculer la Largeur Maximale.

Soit R un rectangle quelconque.

La surface du rectangle s'exprime comme suit :

$$\boxed{S_{\text{Rectangle}} = l_{\text{max}} \times L_{\text{max}}} \quad (51)$$

Ce qui équivaut à écrire :

$$\boxed{\frac{S_{\text{Rectangle}}}{L_{\text{max}}} = l_{\text{max}}} \quad (52)$$

En multipliant les deux termes de l'équation par $\frac{1}{L_{\text{max}}}$ on obtient alors :

$$\boxed{\frac{S_{\text{Rectangle}}}{L_{\text{max}}^2} = \frac{l_{\text{max}}}{L_{\text{max}}}} \quad (53)$$

Or, le coefficient de forme K_f est égal à :

$$\boxed{K_f = \frac{l_{\text{max}}}{L_{\text{max}}}} \quad (54)$$

On peut donc écrire :

$$\boxed{K_f = \frac{S_{\text{Rectangle}}}{L_{\text{max}}^2}} \quad (55)$$

$S_{\text{Rectangle}}$ correspond à la surface du rectangle englobant le polygone.

On approxime donc la largeur maximale en utilisant un algorithme de fenêtrage (rectangle englobant un polygone).

La largeur maximale peut donc s'écrire :

$$\boxed{l_{\text{max}} = \frac{S_{\text{Rectangle}}}{L_{\text{max}}}} \quad (56)$$

3.5.12 - Synthèse : Formule calculatoire des indices de forme

La figure 182 reprend les formules calculatoires des 9 indices de forme que nous avons optimisés et implémentés afin de pouvoir les utiliser dans le SIG.

Indices	Nom	Origine	Formule de base	Formule calculatoire	Intervalle de variation
I_A	Indice d'aplatissement		$I_A = \frac{R_i}{R_c}$	$I_A = \frac{R_{\min}}{R_{\max}}$	[0,1]
I_C	Indice de compacité		$I_C = \frac{S}{S_c}$	$I_C = \frac{S}{\pi R_{\max}^2}$	[0,1]
K_G	Coefficient de compacité de Gravélius	Gravélius 1963	$K_G = \frac{P}{2\pi\sqrt{\frac{S}{\pi}}}$	$K_G = \frac{0.28P}{\sqrt{S}}$	[1, +∞[
I_M	Indice de circularité	Miller 1953	$I_M = \frac{S}{\pi \frac{P^2}{2\pi}}$	$I_M = \frac{12.56S}{P^2}$	[0,1]
I_H	Indice de forme	Morton 1932	$I_H = \frac{S}{\frac{1}{2}L^2\pi}$	$I_H = \frac{S1,27}{L^2} = \frac{S}{\pi(0,5L)^2}$	[0,1]
I_S	Indice d'élongation	Schumm 1956	$I_S = \frac{\sqrt{\frac{S}{\pi}}}{L}$	$I_S = \frac{\sqrt{S}}{L\sqrt{\pi}}$	[0, +0,5]
I_E	Indice elliptique	Stoddart 1965	$I_E = \frac{L}{2\frac{S}{\pi\frac{L}{2}}}$	$I_E = \frac{\pi L^2}{4S}$	[1, +∞[
I_K	Indice B.K.	Kostrubiec 1971	$I_K = \frac{P^2}{S} - 12.56$	$I_K = \frac{P^2}{S} - 12.56$	[0, +∞[
K_f	Coefficient de forme		$K_f = \frac{l_{\max}}{L_{\max}}$	$K_f = \frac{S_{\text{rectangle}}}{L_{\max}^2}$	[0,1]

Sources : C.Turck, LIV, 2002.

Figure 182 : Les 9 indices de forme géométrique optimisés (formule calculatoire)

Soit P un polygone quelconque, on note :

- $L_{\max} = L$ = l'élongation du polygone,
- S = la surface, l'aire du polygone,
- l_{\max} = la largeur maximale du polygone,
- P = le périmètre du polygone,
- R_i = le rayon inscrit dans le polygone,
- R_c = le rayon circonscrit au polygone.

3.5.13 – Application du calcul des indices de forme pour l'agglomération de Strasbourg

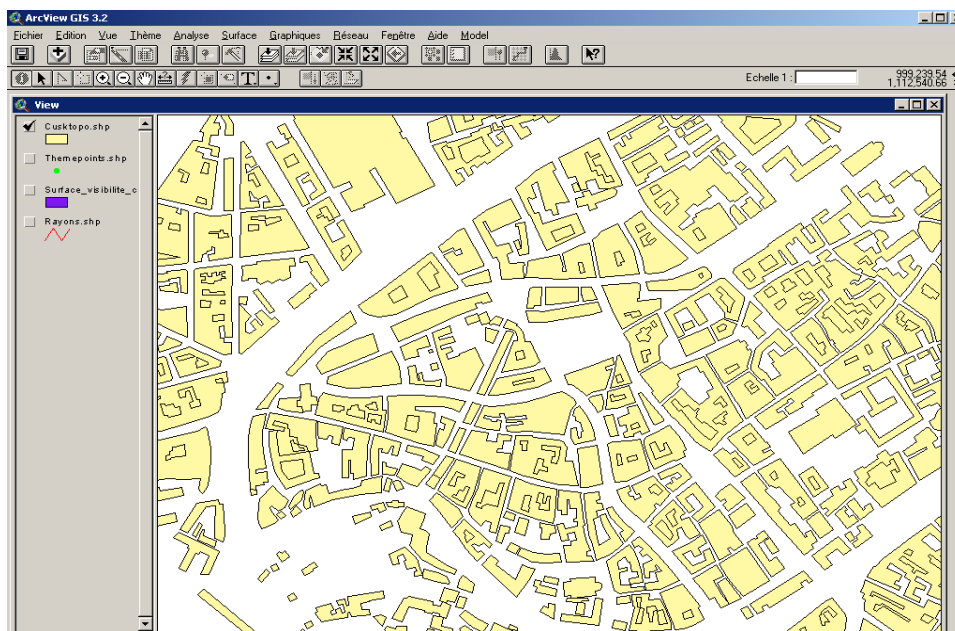
Après avoir mis au point les formules calculatoires des indicateurs morphologiques, et les avoir implémenté sous SIG, nous allons appliquer cette méthode de description morphologique de l'espace grâce à ces variables géographiques indirectes à un cas concret. Ce paragraphe présente les résultats de calcul des surfaces de visibilité et des indices morphologiques pour deux parcours de mesure radio dans la Communauté Urbaine de Strasbourg.

3.5.13.1 - Visualisation des résultats

3.5.13.1.1 - Test : Visualisation des résultats pour 9 points de calcul

Avant d'effectuer les calculs sur les mesures radio provenant des deux campagnes de mesures, nous avons d'abord testé les calculs des indices présentés sur 9 points pour évaluer les temps de calcul et vérifier les scripts. Parmi les points choisis, trois points sont localisés sur des places, les autres sont localisés dans des rues du Centre ville de Strasbourg (ellipse insulaire).

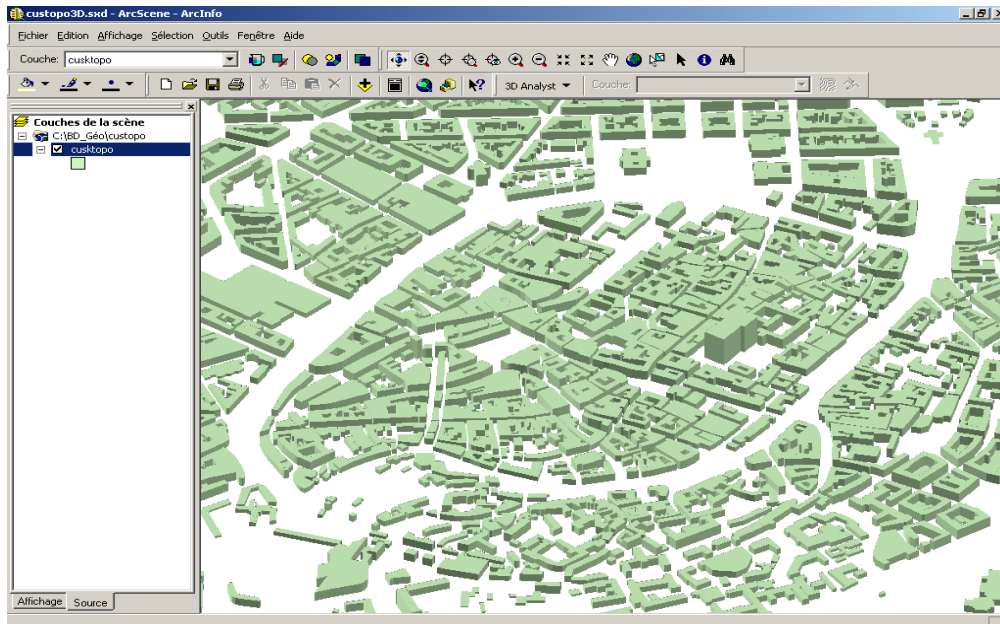
Les données géographiques utilisées correspondent à la base de données géographiques décrivant le bâti au format vectoriel : la BD Topo de l'IGN (figure 183). La BD Topo contient la description du bâti sous la forme de polygone irréguliers, (coordonnées X, Y des points pour chaque polygone), ainsi que la hauteur moyenne du bâtiment, ce qui permet de visualiser les données en trois dimensions grâce à une extrusion¹⁷⁷ dans le SIG (figure 184), et d'effectuer les calculs morphologiques et radioélectriques en 3D.



Sources : C. TURCK, LIV 2003
Logiciel : ArcView 3, Données géo : BD Topo IGN

Figure 183 : Visualisation 2D des données géographiques utilisées pour le lancer de rayon : La BD TOPO de l'IGN sur Strasbourg Centre-ville.

¹⁷⁷ Extrusion : confère Lexique



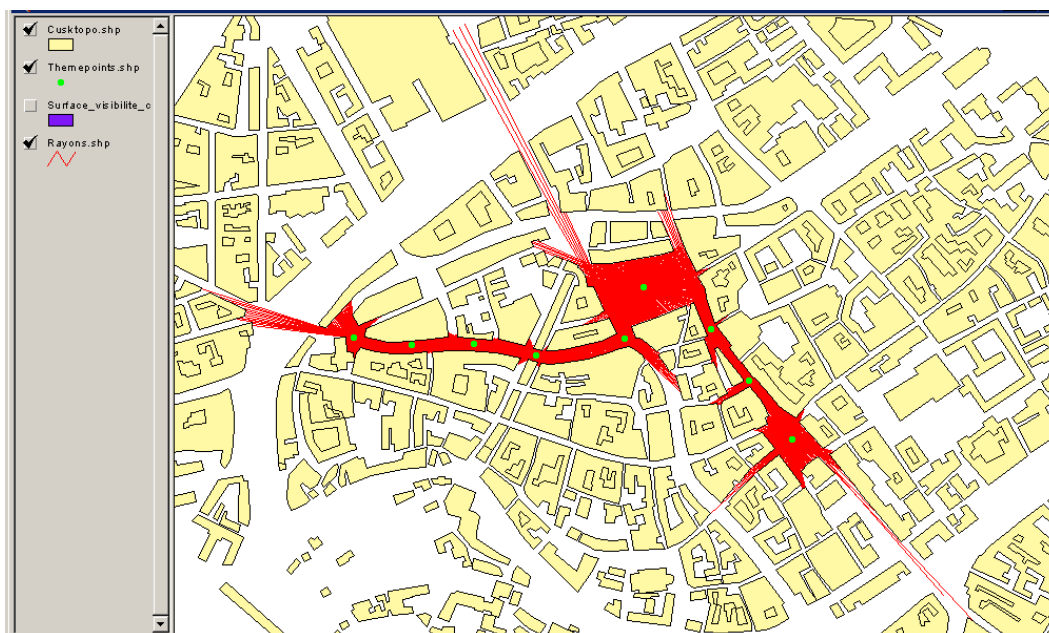
Sources : C. TURCK, LIV, 2003

Figure 184 : Visualisation en 3D de la BD TOPO de l'IGN sur Strasbourg Centre-ville

La figure 185 présente une vue globale des lancers de rayons (en rouge) obtenus pour 9 points (en vert).

Pour chaque point, nous avons lancé 360 rayons (un rayon tous les degrés) pour évaluer le temps de calcul maximal.

Remarque : Nous avons effectué les mêmes calculs en diminuant le nombre de rayons lancés : si on effectue un lancer tous les 5 degrés, la qualité des résultats obtenus (délimitation de la surface de visibilité) varie très peu. Nous conseillons d'effectuer préférentiellement un lancer de rayon tous les 5 degrés, même en milieu urbain très dense.



Sources : C. TURCK, LIV, 2003

Figure 185 : Visualisation des lancers de rayon : vue générale de Strasbourg
360 lancers effectués pour chaque point de calcul



Sources : C. TURCK, LIV, 2003

Figure 186 : Visualisation des lancers de rayon : gros plan sur la Place Kléber
360 lancers effectués pour chaque point de calcul

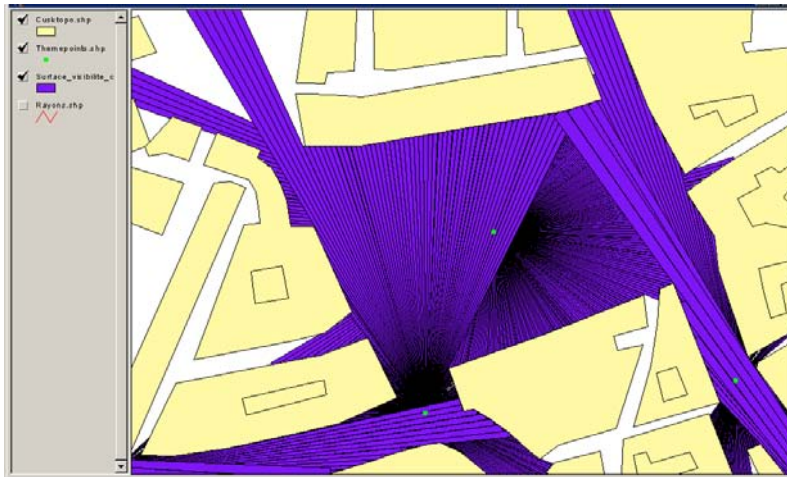
Sur la figure 186, on visualise les rayons lancés à partir du centre de la Place Kléber (au centre de l'image) et des deux autres places. La distance maximale de lancer de rayons que nous avons choisi est de 500 mètres, car en milieu urbain très dense, la visibilité optique dépasse rarement 500 mètres.



Sources : C. TURCK, LIV 2003

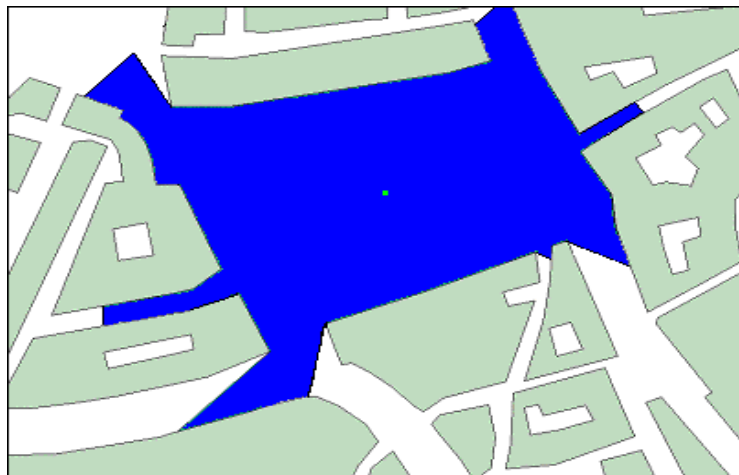
Figure 187 : Visualisation des surfaces de visibilité : vue générale de Strasbourg
360 lancers effectués chaque point de calcul

La figure 187 présente une vue globale des secteurs (en bleu) en visibilité (portion de surface visible pour chaque rayon) obtenus pour 9 points (en vert). Pour chaque point, nous avons 360 secteurs.



Sources : C. TURCK, LIV 2003

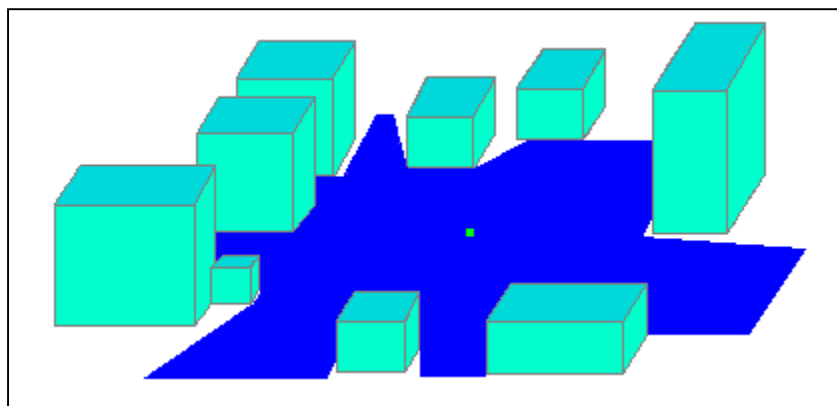
Figure 188 : Visualisation des secteurs de visibilité : gros plan sur la Place Kléber
360 lancers effectués pour chaque point de calcul



Sources : C. TURCK, LIV, 2002

Figure 189 : Calcul de la surface de visibilité en 2D pour la Place Kléber

La figure 190 présente la surface de visibilité obtenue pour la Place Kléber. La surface de visibilité, encore appelée surface libre, correspond à la somme des 360 secteurs pour le point de calcul situé au centre de la place.



Sources : C. TURCK, LIV, 2002

Figure 190 : Calcul de la surface libre, vue en 2,5 D pour la Place Kléber

Calcul des indicateurs morphologiques pour la Place Kléber :

Surface au sol (S_l) = 13431,573 m²

Superficie des murs (S_m) = 10633,879 m²

Hauteur moyenne des murs (H_m) = 22,813 m

Coefficient d'enfermement surfacique (C_{es}) = 0,792

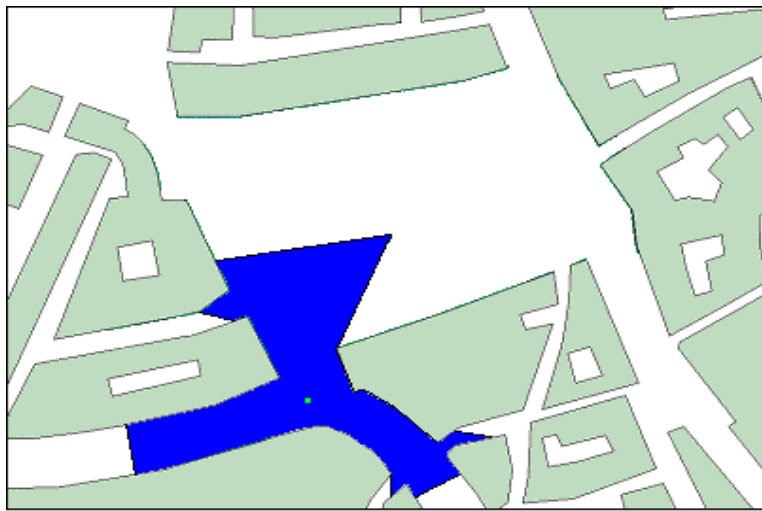
Volume inscrit (V_i) = 306414,475 m³

Indice de Miller (I_M) = 0,361

Indice de Morton (I_H) = 0,452

Indice de Gravélius (I_G) = 1,6653

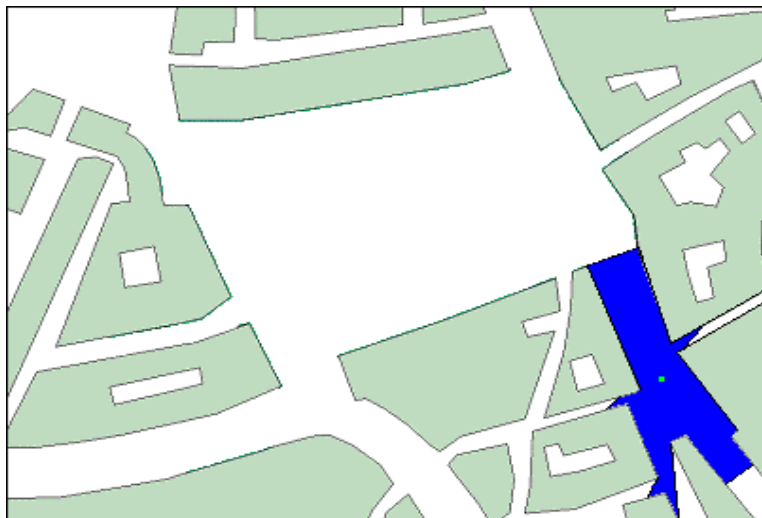
- Calcul de la surface libre à l'intersection des rues : "22 novembre" et "Hallebardes" :



Sources : C. TURCK, LIV, 2002

Figure 191 : surface de visibilité : rue du 22 novembre et rue des Hallebardes

- Calcul de la surface libre pour la rue des Grandes Arcades :



Sources : C. TURCK, LIV, 2002

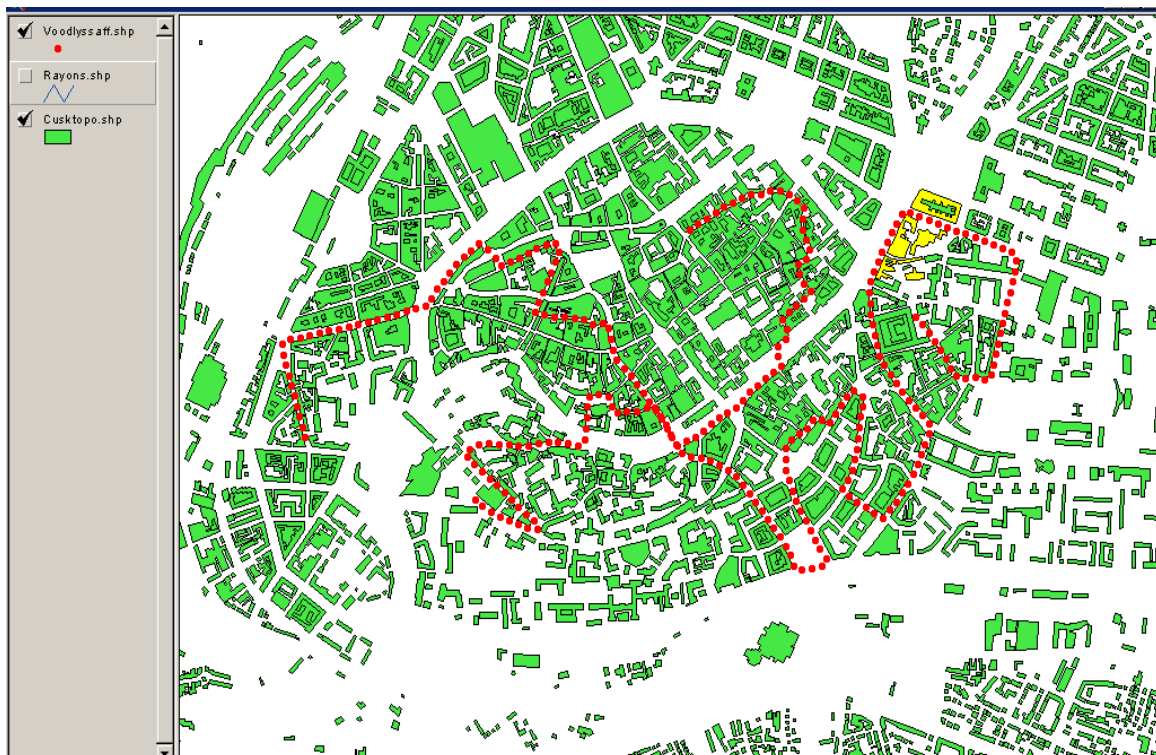
Figure 192 : surface de visibilité rue des Grandes Arcades

3.5.13.1.2 - Visualisation des résultats pour la campagne de mesure « STRASBOURG » sous ArcView

La première campagne de mesure de terrain que nous avons utilisées pour effectuer nos calculs de surfaces de visibilité et d'indicateurs morphologiques (les coordonnées des points de mesures radio correspondront alors aux points pris comme origine des lancers de rayon) correspond à une campagne prénommée « STRASBOURG » effectuée par le CNET en 1994 sur Strasbourg Centre-ville, pour un parcours prénommé « trajet VOODLY » comprenant 285 points de mesures radioélectriques (figure 191).

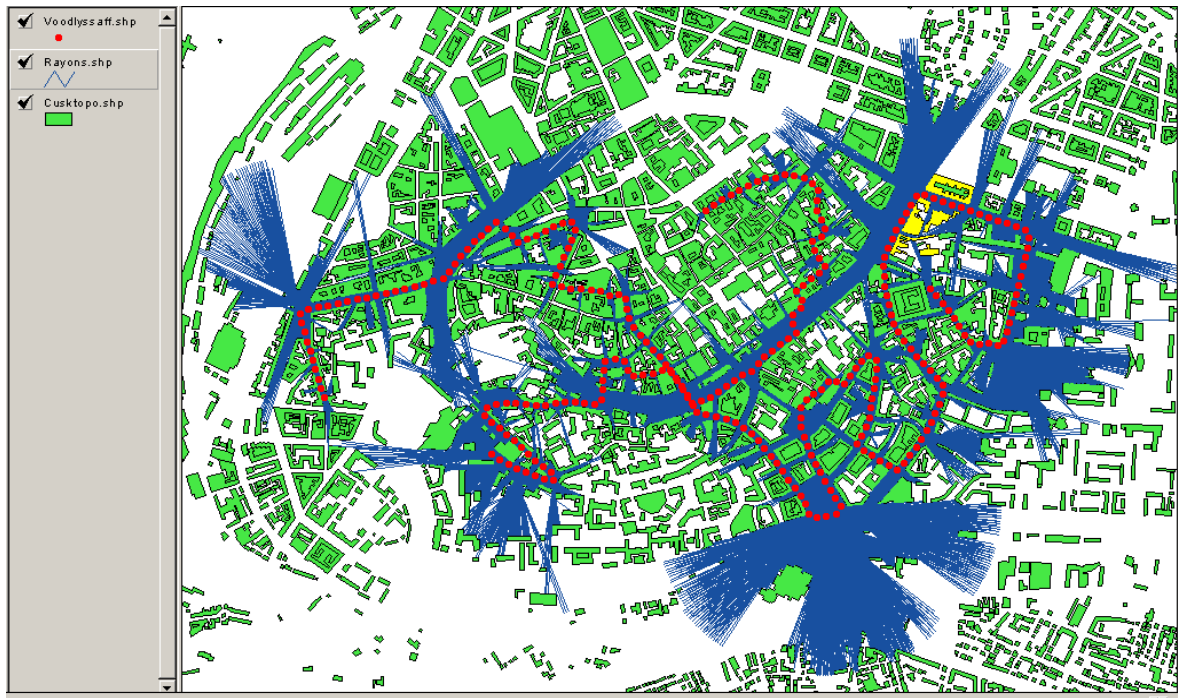
Nous avons repris les mêmes points de mesures (repérées par leur coordonnées X, Y) localisées dans des rues et des places du Centre-ville, pour lesquelles nous avons effectuées les calculs des surfaces de visibilité et des valeurs des 9 indices de forme correspondant.

Les figures 194 et 195 présentent les lancers de rayon (en bleu) obtenus pour les 285 points de calcul (en rouge). Nous voyons bien sur l'image la différence entre les espaces en forte visibilité (grande place) où les rayons vont très loin, et les rues étroites où les rayons ont une portée très courte.



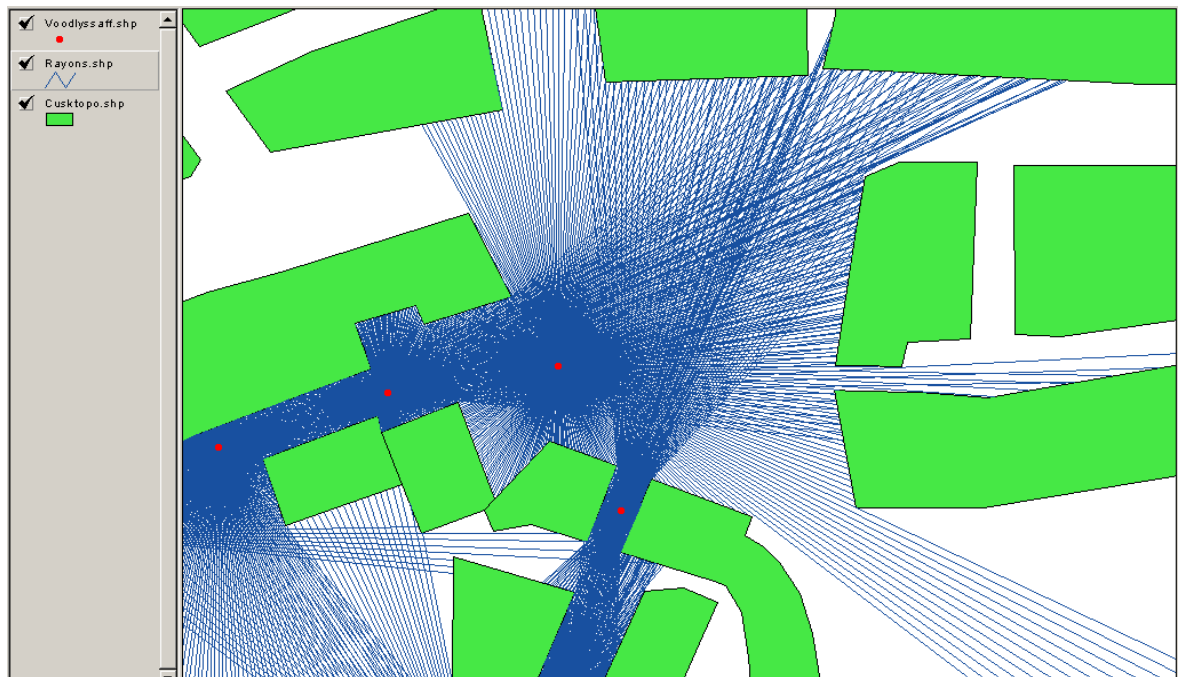
Sources : C. TURCK, LIV, 2003

Figure 193 : Visualisation des 285 points de mesure de la campagne STRASBOURG sous ArcView 3 - Strasbourg Centre Place Kléber



Sources : C. TURCK, LIV, 2003

Figure 194 : Visualisation des lancers de rayon et des points de mesures correspondant :
Vu générale de Strasbourg Centre Ville - 360 lancers effectués pour chaque point de calcul



Sources : C. TURCK, LIV, 2003

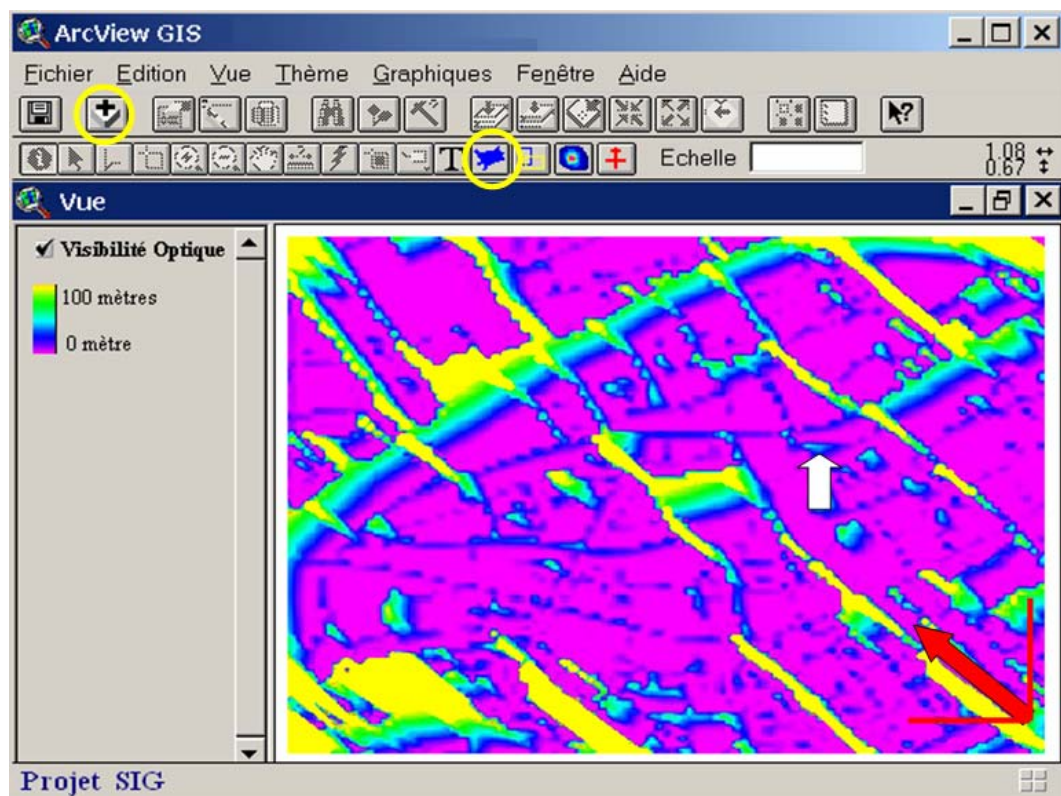
Figure 195 : Visualisation des lancers de rayon : gros plan sur la Place Kléber
360 lancers effectués pour chaque point de calcul

Implémentation du calcul des indices à l'ensemble des mailles d'une grille :

Dans un premier temps, nous avons calculé les valeurs des indices de forme pour l'environnement caractéristique le long des deux parcours de mesures effectués sur Strasbourg. Afin de généraliser l'utilisation de cette technique à l'ensemble des mailles d'une grille, nous avons mis au point un script en langage de programmation Avenue (script 2DpointNetworkCreator) qui permet de créer une grille vectorielle de points. Le script lancé sous ArcView permet de générer une grille de points espacés régulièrement sur l'ensemble d'une zone géographique. Puis les calculs d'indices de formes peuvent être effectués à partir de ces points (les coordonnées des points servent de point d'origine au lancer de rayon). On obtient une table attributaire comprenant les valeurs des 9 indices de forme calculées pour l'ensemble des points de la grille. Puis on applique une table de transcodage (on utilise une opération spatiale du type interpolation spatiale dans le SIG) qui génère une grille de mailles, comportant la visibilité optique pour chaque maille, ou bien la valeur numérique des indices de forme (comme dans le cas d'une carte d'occupation du sol).

Cette nouvelle carte, que nous pouvons appeler « carte de visibilité » (figure 196), ainsi que la carte de morphologie urbaine (en prenant comme variable, par exemple la valeur moyenne de l'indice dans la maille), peuvent ensuite être utilisées en ingénierie radiomobile de la même manière que les autres types de données géographiques.

La figure 196 illustre la généralisation du calcul des surfaces de visibilité à l'ensemble d'une zone géographique. Nous observons la visibilité optique pour la Place Kléber à Strasbourg, le point origine de la visibilité correspondant au point origine du repère rouge (en bas à droite de la figure). La distance de visibilité maximale prise en compte dans le calcul est de 100 mètres, et la direction de visibilité est de 140 degrés comme indiqué par la flèche rouge. On observe que la visibilité optique est maximale pour les places, comme la Place Kléber, et présente une visibilité croissance en direction du nord (flèche blanche).



Sources : C. TURCK, LIV, 2005

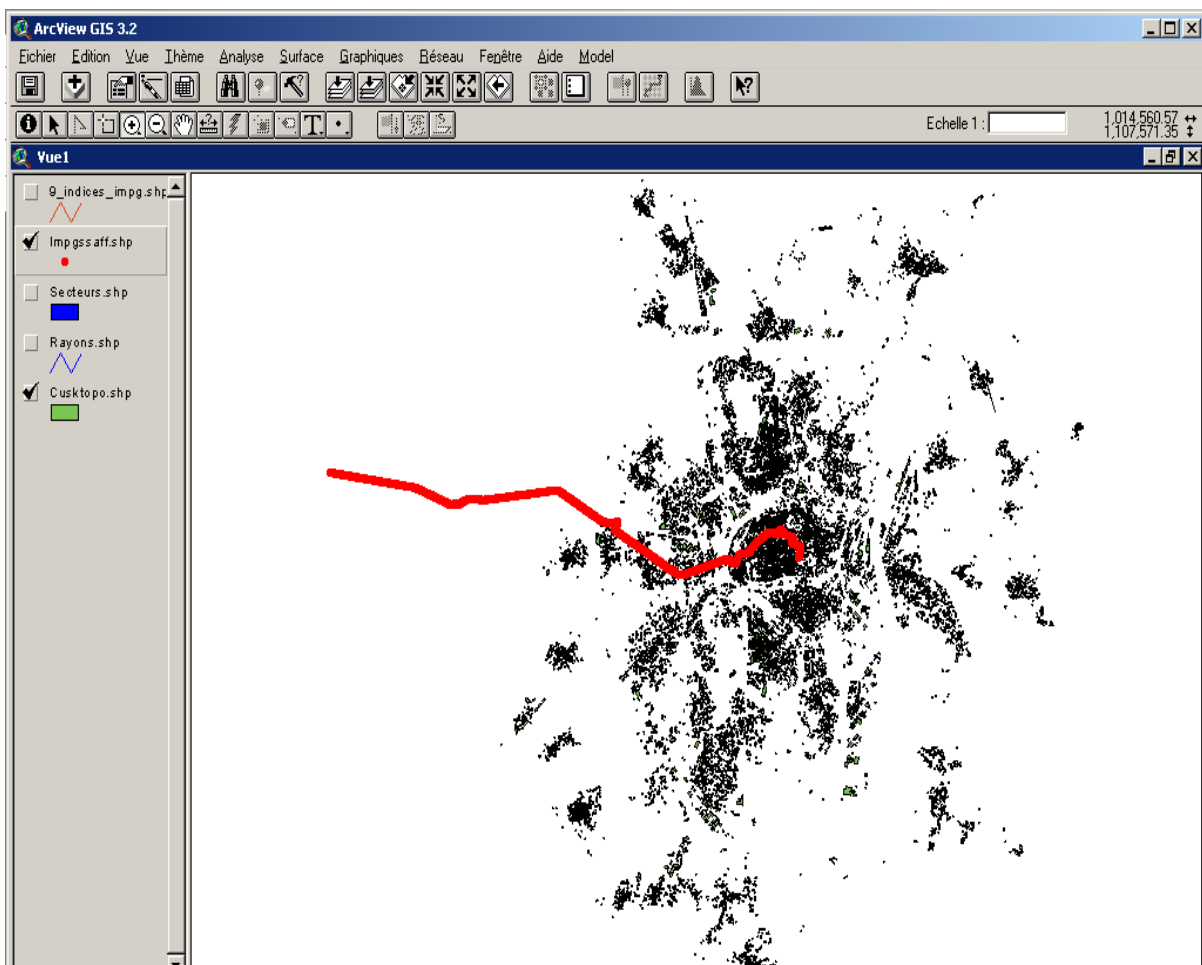
Figure 196 : Visualisation des surfaces de visibilité optique pour Strasbourg Centre Ville, pour une distance de visibilité maximale de 100 mètres et dans une direction de 140 degrés

3.5.13.1.3 - Visualisation des résultats pour la campagne de mesure COST-CNET2, trajet IMPG sous ArcView

La deuxième campagne de mesure de terrain que nous avons utilisées pour effectuer nos calculs et nos comparaisons de résultats (valeurs obtenues pour les indicateurs morphologiques par rapport aux valeurs d'affaiblissements radioélectriques mesurés) correspond à une campagne prénommée « COST-CNET2 » effectuée par le CNET en 1997 sur l'ensemble de la Communauté Urbaine de Strasbourg, ce qui correspond à des mesures en milieu rural, périurbain et urbain, pour un parcours prénommé « IMPG » comprenant 1392 points de mesures radioélectriques (figure 197).

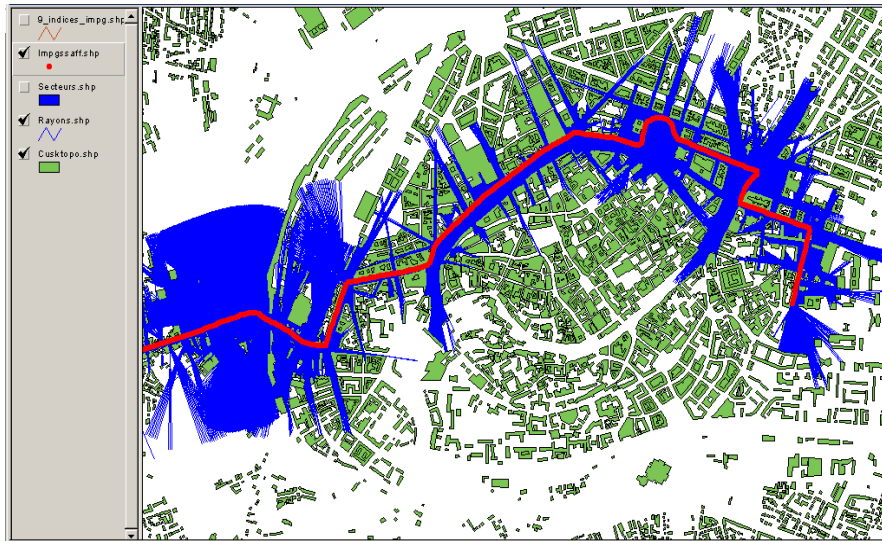
Nous avons repris les mêmes points de mesures (repérées par leurs coordonnées X, Y) localisées dans des rues et des places au Centre-ville, sur la route nationale 4 en milieu rural, et l'autoroute en milieu périurbain, pour lesquelles nous avons effectuées les calculs des surfaces de visibilité et des valeurs des 9 indices de forme correspondant.

Les figures 198 et 199 présentent les lancers de rayon (en bleu) obtenus pour les 1392 points de calcul (en rouge). Nous voyons bien sur l'image la différence entre les espaces en forte visibilité (grande place) où les rayons vont très loin, et les rues étroites où les rayons ont une portée très courte.



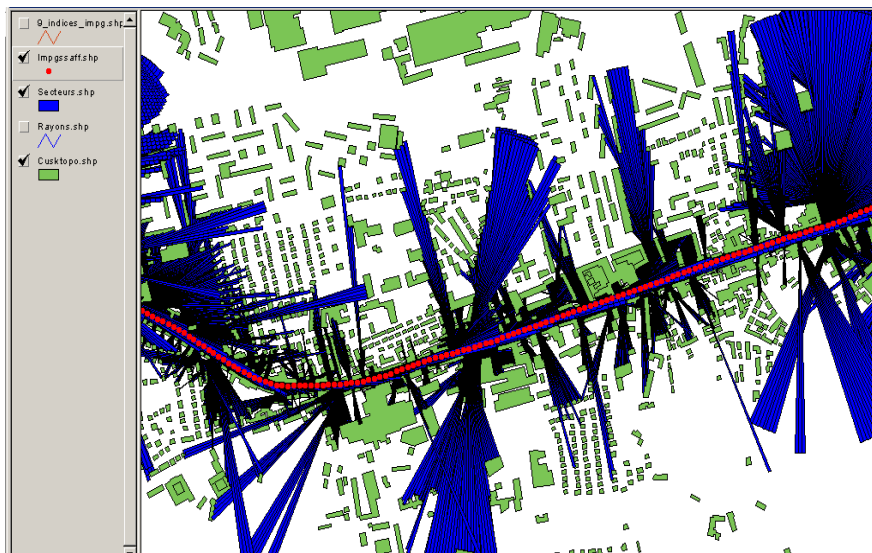
Sources : C. TURCK, LIV, 2003

Figure 197 : Vue globale sur l'ensemble de la Communauté Urbaine de Strasbourg : Visualisation du parcours de mesure sous ArcView – Trajet IMPG - 1392 points de mesure



Sources : C. TURCK, LIV, 2003

Figure 198 : Visualisation des lancers de rayon : zoom - 360 lancers effectués pour chaque point de calcul



Sources : C. TURCK, LIV, 2003

Figure 199 : Visualisation des surfaces de visibilité : zoom – 360 lancers effectués pour chaque point de calcul

3.5.13.2 – Présentation des résultats numériques obtenus

Après élaboration, une application est nécessaire pour confronter les résultats liés à l'utilisation de données indirectes.

3.5.13.2.1 – Valeurs numériques obtenues pour les 9 indices de forme

Différentes étapes sont nécessaires pour appliquer les calculs à l'ensemble des points issus des deux campagnes de mesure sur Strasbourg. Un premier test est effectué pour étudier la conformité des données indirectes en tant qu'élément jugé nécessaire en modélisation spatiale et radioélectrique.

3.5.13.2.1.1 – Essai 1 : Valeurs des indices de Miller et Gravélius pour 9 points de calcul

Afin de tester l'exactitude des valeurs obtenues pour les indices de forme avec notre méthode basée sur le lancer de rayon, nous avons d'abord effectué un premier essai avec les 9 points que nous avons présenté précédemment (3.4.13.1.1). La figure 200 présente le tableau des résultats de calcul obtenus (fichier au format Excel ou Access « *.dbf »), les calculs ayant été effectués à l'aide du SIG ArcView 3 (scripts Avenue). Les résultats des calculs se présentent sous deux formes dans le SIG : d'une part une couche d'information géographique contenant les surfaces de visibilité et d'autre part une table attributaire pour ces surfaces libres (figure 200) qui contient les coordonnées des points du polygone délimitant la surface de visibilité ainsi que les calculs effectués par les scripts (aire, périmètre, longueur, largeur, indice de Miller, indice de Gravélius, etc.).

Les résultats obtenus sont conformes à ce que nous attendions (valeurs conformes aux valeurs habituelles prises par les différents indicateurs morphologiques), et le temps de calcul est correct (2 minutes par point). Nous avons alors appliqué les calculs d'indices morphologiques à l'ensemble de la Communauté Urbaine de Strasbourg (CUS).

Remarque : le système de projection employé pour l'ensemble des données géographiques utilisées sur la Communauté Urbaine de Strasbourg est le Lambert II.

Strasbourg Centre-ville

Points	X_Départ (origine du lancer de rayon)	Y_Départ (origine du lancer de rayon)	Aire (m ²)	Périmètre (m)	Indice de Miller	Indice de Gravélius
1	998757	1112400	14435.28	981.71	0.19	2.30
2	998731	1112330	18101.29	1801.08	0.07	3.78
3	998852	1112340	9833.73	1694.42	0.04	4.82
4	998606	1112300	5618.36	893.57	0.09	3.36
5	998518	1112320	5514.49	836.59	0.10	3.18
6	998905	1112270	9097.15	1626.16	0.04	4.81
7	998966	1112180	8968.56	1380.07	0.06	4.11
8	998431	1112320	6016.81	1148.66	0.06	4.18
9	998349	1112330	6496.28	1031.59	0.08	3.61

Sources : C. TURCK, LIV, 2003

Figure 200 : Extrait de la table attributaire sous SIG pour 9 points de calcul d'indices morphologiques

3.5.13.2.1.2 - Valeurs des indices de Forme pour la campagne de mesure STRASBOURG, trajet VOODLY

La figure 201 présente un extrait du tableau des résultats de calcul obtenus pour 10 points de mesure radio (fichier au format « *.dbf »), les calculs ayant été effectués à l'aide du SIG ArcView 3 (scripts Avenue). Les résultats des calculs se présentent sous deux formes dans le SIG : d'une part une couche d'information géographique contenant les surfaces de visibilité et d'autre part une table attributaire pour ces surfaces libres qui contient les coordonnées des points du polygone délimitant la surface de visibilité ainsi que les calculs effectués par les scripts (aire, périmètre, longueur, largeur, indice de Miller, indice de Gravélius, etc.).

Les résultats obtenus pour le trajet VOODLY sont corrects. 285 points de calculs ont été pris en compte.

N° Point	X	Y	Affaibli	Aire	Périmètre	Indice Miller	Indice Gravélius	Indice Aplatis	Indice Compacité	Indice Morton	Indice Elongation	Indice Elliptique	Indice Kostrubiec	Coef. Forme
1	998038	2411540	-87,5	9043	1586	0,05	4,71	0,01	0,00	0,01	0,08	195,16	861,68	0,02
2	998029	2411570	-85,41	10346	1491	0,06	4,14	0,01	0,00	0,02	0,09	153,48	663,02	0,03
3	998020	2411599	-84,88	10316	1441	0,06	4,00	0,01	0,00	0,02	0,09	165,15	620,15	0,02
4	998012	2411629	-86,88	12802	1504	0,07	3,75	0,01	0,01	0,02	0,09	144,90	542,69	0,03
5	998003	2411658	-84,39	15761	1713	0,07	3,85	0,01	0,01	0,02	0,10	125,66	572,76	0,03
6	997995	2411687	-83,97	18032	1754	0,07	3,69	0,01	0,01	0,02	0,10	121,08	524,01	0,03
7	997986	2411717	-83,41	25459	1898	0,09	3,36	0,01	0,01	0,03	0,12	90,62	432,23	0,04
8	997977	2411747	-80,79	30566	2152	0,08	3,47	0,03	0,01	0,03	0,12	82,23	463,61	0,05
9	997969	2411776	-77,2	47350	2961	0,07	3,84	0,05	0,02	0,04	0,15	57,32	569,15	0,07
10	997966	2411806	-75,91	92986	5678	0,04	5,25	0,04	0,04	0,08	0,20	32,33	1076,71	0,12

Sources : C. TURCK, LIV, 2003

Figure 201 : Extrait de la table attributaire sous SIG pour 10 points de calcul d'indices morphologiques Pour la campagne de mesure STRASBOURG, trajet VOODLY en milieu urbain dense – Strasbourg Centre-ville

Avec, comme unités : l'aire en mètres carrés, le périmètre en mètres, et l'affaiblissement en décibels. Les indices de formes n'ont par d'unité. Les intervalles de variation pour les 9 indices de forme : confère figure 182 page 312.

3.5.13.2.1.3 - Valeurs des 9 indices de Forme pour la campagne de mesure COST-CNET2, trajet IMPG

Nous avons choisi d'utiliser le parcours de mesure IMPG parce que le trajet traverse tous les types de milieux géographiques caractéristiques pour la zone de Strasbourg, sur laquelle nous allons effectuer par la suite les calculs d'affaiblissement radioélectrique avec le modèle de Okumura-Hata et de modèle COST-LD : le milieu rural, le milieu périurbain, le milieu urbain et le milieu urbain dense. Le trajet IMPG comprend 1392 points de calculs.

La figure 202 présente un extrait du tableau des résultats de calcul obtenus pour 10 points de mesure radio (fichier au format « *.dbf »), les calculs ayant été effectués à l'aide du SIG ArcView3.

Les résultats obtenus pour le trajet IMPG sont corrects.

N° Pt	X	Y	Affaibli	Aire	Périmètre	Indice Miller	Indice Gravélius	Indice Aplatis	Indice Compacité	Indice Morton	Indice Elongation	Indice Elliptique	Indice Kostrubiec	Coef. Forme
1	1000157	2411724	-32,16	62326	3619,24	0,06	4,09	0,02	0,03	0,06	0,17	45,15	647,69	0,09
2	1000161	2411738	-32,94	50016	2970,23	0,07	3,75	0,02	0,02	0,04	0,15	56,60	541,57	0,07
3	1000165	2411752	-31,43	42740	2510,56	0,09	3,43	0,02	0,02	0,04	0,14	65,86	450,72	0,06
4	1000169	2411767	-32,58	40549	2722,17	0,07	3,81	0,02	0,02	0,05	0,16	47,36	561,54	0,08
5	1000172	2411781	-34,07	27863	1871,63	0,10	3,16	0,02	0,02	0,04	0,14	68,92	382,40	0,06
6	1000176	2411795	-38,03	26561	1706,78	0,11	2,95	0,02	0,02	0,04	0,13	72,32	331,98	0,06
7	1000180	2411810	-38,01	31560	2462,59	0,07	3,91	0,02	0,02	0,04	0,14	60,89	591,10	0,07
8	1000183	2411824	-40,18	38106	2572,03	0,07	3,72	0,02	0,03	0,05	0,16	50,43	532,82	0,08
9	1000187	2411838	-42,30	27878	2400,68	0,06	4,06	0,02	0,02	0,04	0,14	68,91	636,88	0,06
10	1000191	2411853	-46,53	27026	2260,29	0,07	3,88	0,02	0,02	0,04	0,13	71,06	581,29	0,06

Sources : C. TURCK, LIV, 2003

Figure 202 : Extrait de la table attributaire sous SIG pour 10 points de calcul d'indices morphologiques Pour la campagne de mesure COST-CNET2, trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg

3.5.13.3 - Validation géographique et radioélectrique des résultats

Afin de valider l'utilisation des indices de forme en ingénierie radiomobile, nous allons analyser statistiquement les résultats numériques obtenus pour les 9 indicateurs morphologiques, et ceci pour un nombre suffisant de points de calcul, qui coïncident avec les points de mesure radio collectés lors de la campagne de mesure COST-CNET2, trajet IMPG.

Etude des corrélations entre indices morphologiques et affaiblissement radio mesuré

Afin de mettre en évidence le lien qui existe entre l'affaiblissement des ondes radioélectriques et le type de milieu géographique traversé par ces ondes, les corrélations entre les indicateurs morphologiques (qui correspondent à des mesures indirectes du milieu géographique traversé par les ondes radio) et l'affaiblissement radioélectrique mesuré sur une même zone géographique suffisamment vaste sont calculées.

L'étude statistique a été effectuée sur les valeurs d'affaiblissements sur 1392 points de mesures d'affaiblissement.

Indice (s)	Valeurs de corrélation
AIRE	.527
INDICE_MILLER	.767
INDICE_GRAVELIUS	-.604
INDICE_APLATISSEMENT	.780
INDICE_COMPACITE	.727
INDICE_MORTON	.723
INDICE_ELONGATION	.709
INDICE_ELLIPTIQUE	-.512
INDICE_KOSTRUBIEC	-.496
COEFFICIENT de FORME	.725

Sources : C.Turck, LIV, 2003.

Figure 203 : Corrélations de Bravais - Pearson entre l'affaiblissement radio et les indices de forme
Campagne COST-CNET2 _ Trajet IMPG

Les valeurs de corrélations entre l'affaiblissement radio mesuré et les indicateurs morphologiques calculées pour les points de mesure sont comprises entre 0,496 et 0,780.

Pour l'indice de Kostrubiec, la valeur de corrélation n'est que de 0,496, ce qui n'est pas suffisant pour pouvoir considérer cet indicateur morphologique comme significatif, il ne pourra pas être utilisé tels quel dans notre recherche. D'autres études plus approfondies, sur de plus vastes zones géographiques, seront nécessaires afin de valider l'utilisation de l'indice de Kostrubiec en analyse morphologique du milieu.

Pour l'aire des surfaces de visibilité, pour l'indice de Gravélius, ainsi que pour l'indice Elliptique, les valeurs de corrélations sont comprises entre 0,5 et 0,7 (-0,604 pour l'indice de Gravélius, -0,512 pour l'indice Elliptique et 0,527 pour l'aire), ces valeurs sont significatives ($>0,5$), mais elles restent quand même proches de 0,5. On peut donc les utiliser en analyse morphologique, mais ce ne sont pas les indicateurs les plus significatifs, les plus caractéristiques de la morphologie du milieu.

Enfin, les valeurs de corrélation obtenues pour l'indice de Miller (0,767), l'indice d'aplatissement (0,780), l'indice de compacité (0,727), l'indice de Morton (0,723), l'indice d'Elongation (0,709), et enfin le coefficient de forme (0,725) sont les plus significatives ($>0,7$).

Ces six indices de forme seront donc préférentiellement utilisés comme caractéristiques de la morphologie d'un espace géographique donné.

Matrice des corrélations (Bravais Pearson) :

Corrélations	AFFAIBLI	X	Y	AIRE	PERIMETR	IND_Miller	IND_Grav	IND_Apla	IND_Compa	Ind_Morton	IND_Elon	Ind_Ellip	IND_Kostru	COEF Form
AFFAIBLI	1,000	-,706	,424	,526	-,029	,767	-,604	,780	,727	,723	,709	-,512	-,496	,725
X	-,706	1,000	-,874	-,872	,195	-,905	,777	-,897	-,873	-,871	-,844	,584	,655	-,872
Y	,424	-,874	1,000	,904	-,243	,895	-,896	,854	,904	,905	,887	-,699	-,817	,906
AIRE	,526	-,872	,904	1,000	-,073	,891	-,918	,868	1,000	,999	,992	-,768	-,833	,999
PERIMETR	-,029	,195	-,243	-,073	1,000	-,388	,333	-,342	-,077	-,082	,017	-,317	,334	-,084
INDICE_Miller	,767	-,905	,895	,891	-,388	1,000	-,878	,983	,893	,892	,854	-,595	-,766	,894
INDICE_Grav	-,604	,777	-,896	-,918	,333	-,878	1,000	-,832	-,918	-,921	-,902	,683	,975	-,921
INDICE_Apla	,780	-,897	,854	,868	-,342	,983	-,832	1,000	,870	,869	,833	-,585	-,715	,871
INDICE_Compa	,727	-,873	,904	1,000	-,077	,893	-,918	,870	1,000	,999	,991	-,766	-,832	,999
Morton	,723	-,871	,905	,999	-,082	,892	-,921	,869	,999	1,000	,993	-,773	-,836	1,000
INDICE_Elong	,709	-,844	,887	,992	,017	,854	-,902	,833	,991	,993	1,000	-,834	-,825	,993
Elliptique	-,512	,584	-,699	-,768	-,317	-,595	,683	-,585	-,766	-,773	-,834	1,000	,639	-,772
INDICE_Kostru	-,496	,655	-,817	-,833	,334	-,766	,975	-,715	-,832	-,836	-,825	,639	1,000	-,836
COEF Form	,725	-,872	,906	,999	-,084	,894	-,921	,871	,999	1,000	,993	-,772	-,836	1,000

Sources : C.Turck, LIV, 2003.

Figure 204 : Matrice des corrélations de Pearson – Trajet IMPG

Les indices de forme peuvent ainsi être utilisés en ingénierie radio afin de caractériser la morphologie du milieu géographique en présence. On pourra utiliser les indicateurs morphologiques comme paramètres d'entrée des modèles de propagation d'ondes radio afin d'améliorer la qualité de la prédiction radioélectrique grâce à une meilleure prise en compte du milieu environnant, rendu possible par l'introduction de ces données géographiques indirectes dans la modélisation radio.

On peut remarquer que les corrélations entre l'affaiblissement mesuré et les indices de forme sont plus faibles pour les indices de forme pour lesquels les intervalles de variations sont très grands ($[0, +\infty]$ et $[1, +\infty]$), c'est-à-dire l'indice de Kostrubiec, l'indice Elliptique et l'indice de Gravélius.

Statistiques descriptives pour les indices morphologiques et l'affaiblissement radio mesuré

Afin d'analyser l'information contenue dans les tableaux de données (valeurs calculées pour les 9 indices, affaiblissements mesurés, etc.) nous allons utiliser les statistiques descriptives, qui permettent de résumer l'information contenue dans une courbe, dans un diagramme (par exemple la courbe de l'affaiblissement mesuré en fonction de la distance émetteur-récepteur, ou la courbe des valeurs de l'indice de Miller en fonction de la distance émetteur-récepteur, etc.) par quelques données numériques caractéristiques qui le décrivent quant à l'essentiel. On en distingue deux sortes :

- Les caractéristiques de position (ou de tendance centrale) qui sont principalement la moyenne, la médiane et le mode.
- Les caractéristiques de dispersion qui sont la variance et l'écart-type, l'écart moyen, l'écart probable et l'écart interquartile.

Dans notre étude nous nous sommes limités à l'utilisation de la moyenne comme descripteur de position et à l'écart-type comme caractéristique de dispersion.

	Moyenne	Ecart-type
AFFAIBLISSEMENT Mesuré	99,72 dB	13,567 dB
AIRE	501506 m ²	326372 m ²
PERIMETRE	3879 m	1527 m
INDICE_Miller	0,52	0,43
INDICE_Gravélius	2,34	1,56
INDICE_Aplatissement	0,50	0,45
INDICE_Compacité	0,20	0,13
INDICE_Morton	0,32	0,20
INDICE_Elongation	0,37	0,16
INDICE_Elliptique	28,01	41,19
INDICE_Kostrubiec	300,56	377,23
COEFFICIENT_Forme	0,51	0,32

Sources : C.Turck, LIV, 2003.

Figure 205 : Tableau des statistiques descriptives – Trajet IMPG

Pour le trajet IMPG, la moyenne de l'affaiblissement radio mesuré est de 99,7 décibels avec un écart-type de 13,5 décibels.

Pour le trajet IMPG l'aire des surfaces de visibilité est importante (501506 m²) car les calculs de visibilité ont en grande partie été effectués en milieu rural et périurbain. Or pour ces types de milieux géographiques, les distances de visibilité sont très importantes car il y a peu d'obstacles (bâti, bois, etc.).

La valeur moyenne pour l'indice de Miller est de 0,52, avec un écart type important de 0,43 (sachant que l'intervalle de variation pour l'indice de Miller est de [0,1]). Du point de vue morphologique, ceci traduit une prédominance de formes un peu étirées, voir circulaires, avec des contours peu indentés.

La valeur moyenne pour l'indice de Gravélius est de 2,34. L'intervalle de variation pour l'indice de Gravélius est compris entre 1 et $+\infty$. L'écart type n'est que de 1,56 ce qui est peu pour cet indice. Du point de vue morphologique, la valeur de 2,34 traduit une prédominance de formes étirées, semi-circulaires de grande surface, comme illustrée sur les figures 209 et 211 (points 270 et 552).

La valeur moyenne pour l'indice d'aplatissement est de 0,50. L'intervalle de variation pour l'indice d'aplatissement est compris entre 0 et 1. L'écart type n'est que de 0,45 ce qui est important pour cet indice (sachant que l'intervalle de variation pour l'indice d'aplatissement est de [0,1]). Du point de vue morphologique, ceci traduit une prédominance de formes un peu allongées, mais pas trop aplaties, comme par exemple une ellipse voir même un cercle, de grande surface, comme illustrée sur les figures 209 et 211 (point 900).

La valeur moyenne pour l'indice de compacité est de 0,20, avec un écart type très faible de 0,13 (l'intervalle de variation pour l'indice de compacité étant de $[0, +\infty[$). Du point de vue morphologique, ceci traduit une prédominance de formes très compactes, comme des cercles.

La valeur moyenne pour l'indice de Morton est de 0,32, avec un écart type de 0,20. L'intervalle de variation de l'indice de Morton est de [0,1]. Du point de vue morphologique, la valeur de 0,32 traduit la prédominance de formes assez allongées, comme des ellipses, semi-circulaires de grande surface, comme illustrée sur les figures 209 et 211 (points 552 et 780).

La valeur moyenne pour l'indice d'élongation est de 0,37, avec un écart type de 0,16. L'intervalle de variation pour l'indice d'élongation est de $[0, +0,5]$. La valeur de 0,37 traduit la présence de formes plutôt circulaires de grande surface, comme illustrée sur les figures 209 et 211 (points 270, 552, 780 et 900).

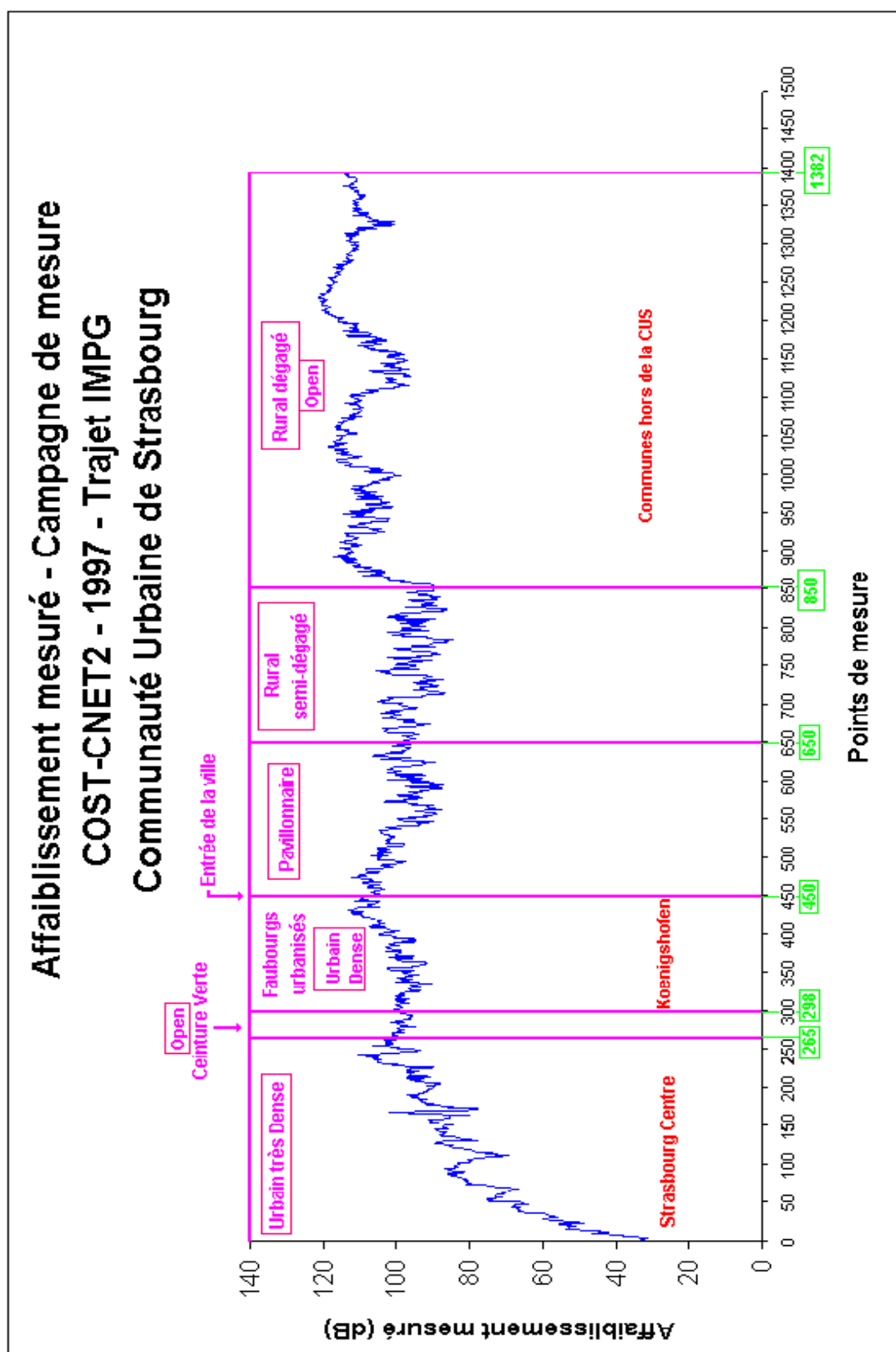
La valeur moyenne pour l'indice de Kostrubiec est de 300,56, et l'écart type de 377,23. L'intervalle de variation pour l'indice de Kostrubiec est de $[0, +\infty[$. La valeur de 300,56 traduit la présence de formes semi-circulaires de grande surface, comme illustrée sur les figures 209 et 211 (points 270 et 780).

La valeur moyenne pour le coefficient de forme est de 0,51, avec un écart type important de 0,32 compte tenu de l'intervalle de variation pour le coefficient de forme $([0, 1])$. La valeur de 0,51 traduit la présence de formes semi-circulaires de grande surface, comme illustrée sur les figures 209 et 211 (points 552 et 780).

Le parcours de mesure radio comprend 1382 points de mesure, pour lesquels nous avons calculé les surfaces de visibilité et les indicateurs de forme correspondant. Parmi l'ensemble de ces points, 415 points sont localisés en milieu urbain dense, 200 points en zones pavillonnaires, 200 points en zones périurbaines (milieu rural semi dégagé), 33 en espace libre, open (ceinture verte entourant le centre-ville), et enfin 530 points en milieu rural dégagé, open.

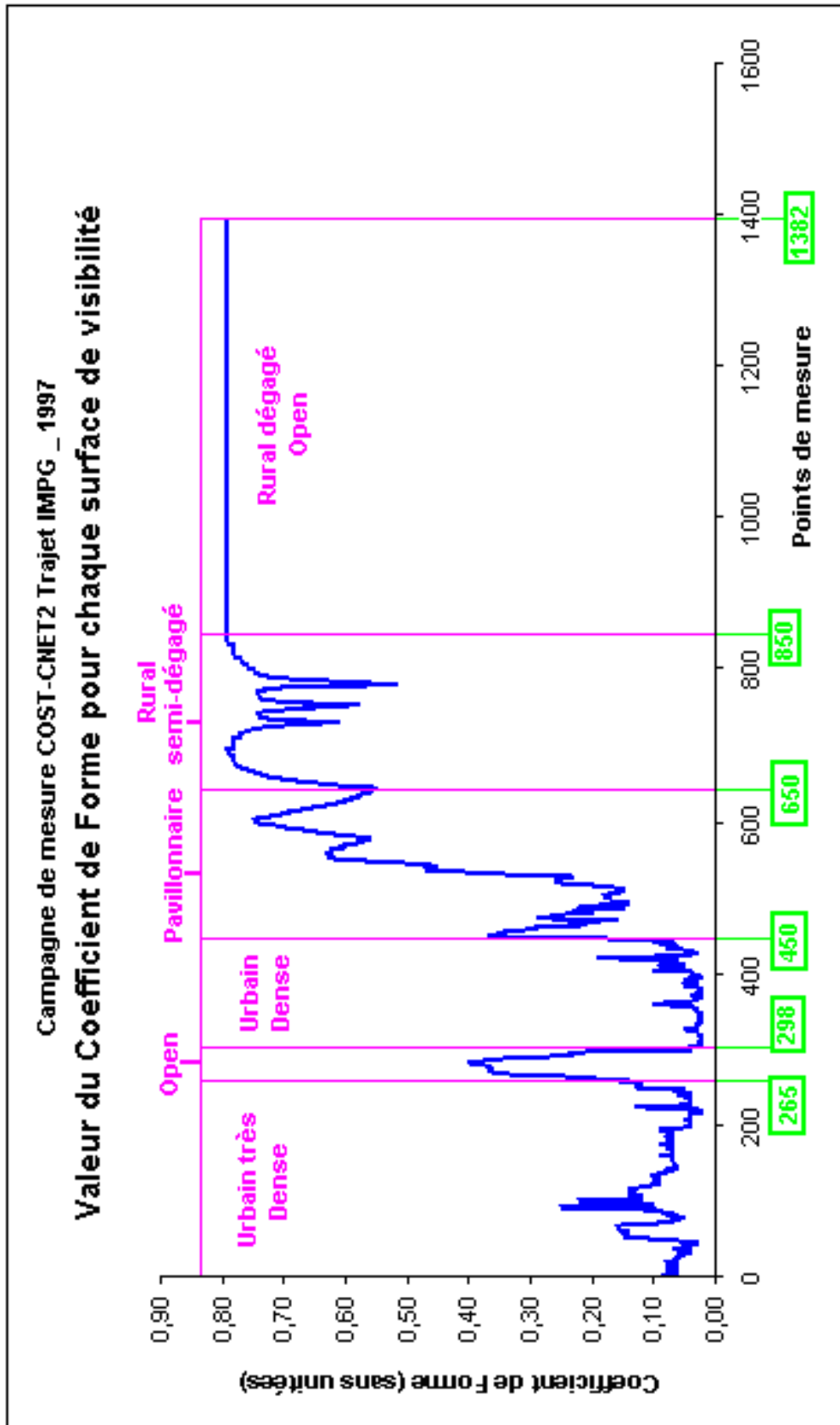
Les surfaces de visibilité en milieu urbain dense (415 points) sont petites, étroites et de formes très indentées (figure 209). En milieu pavillonnaire, périurbain et rural (960 points) les surfaces de visibilité sont de formes semi-circulaires ou circulaires, de grandes surfaces.

Pour le parcours de mesure, on a donc une prédominance de points de mesure situés en zone rurale et périurbaine, avec des surfaces de visibilité de formes circulaires, ce qui est confirmé par les valeurs des indicateurs morphologiques.



Sources : C.Turck, LIV, 2003.

Figure 206 : Courbe de l'affaiblissement mesuré – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg



Sources : C.Turck, LIV, 2003.

Figure 207 : Courbe du coefficient de forme – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg

Interprétation des résultats obtenus pour la campagne de mesure COST-CNET, trajet IMPG :

On obtient 12 courbes différentes (figures 206, 207 et annexes 4) : la courbe de l'affaiblissement moyen mesuré, la courbe de l'aire des surfaces de visibilité, la courbe du périmètre des surfaces de visibilité, ainsi que la courbe des valeurs numériques obtenues pour chacun des 9 indices de forme.

Lorsqu'on compare les différentes courbes entre elles, on voit qu'elles ne suivent pas la même loi mathématique, par contre ce qui est remarquable, c'est que les points d'inflexion se situent exactement au même endroit pour toutes ces courbes. A quoi correspondent ces brusques changements de pente de la courbe ?

Pour comprendre à quoi cela peut correspondre, une analyse spatiale peut nous éclairer : on affecte à chacun des 1392 points de mesure du trajet IMPG le type d'occupation du sol correspondant. Pour réaliser cela on effectue une fusion des deux couches d'informations à l'aide d'un SIG : la couche points de mesure et la couche type d'occupation du sol. On obtient alors une nouvelle couche d'information comportant le type d'occupation du sol (7 classes) pour chacun des 1392 points de mesures.

On obtient ainsi une nouvelle information concernant le type d'occupation du sol présent le long du parcours de mesure radio. La table attributaire associée à la couche d'information contient les valeurs des indices de formes obtenus pour chaque point de mesure. Après analyse des résultats obtenus [les 12 courbes, les couches d'informations (cartes d'occupation du sol, etc.), les statistiques], on observe que les limites géographiques des différentes classes d'occupation du sol coïncident avec les points d'inflexion des 12 courbes. Les limites géographiques des classes d'occupation du sol correspondent à des ruptures spatiales, comme par exemple la limite entre la zone bâtie et la ceinture verte (espace vide, *open*) entourant le centre-ville (point 265, figure 207), ou bien encore la limite entre le bâti dense (les anciens faubourgs à Koenigshoffen) et le bâti pavillonnaire en périphérie de la ville (point 450, figure 207).

Lorsqu'on observe en détail les 12 courbes et qu'on analyse les points d'inflexion dans la courbe, on s'aperçoit que ces points coïncident exactement avec les points de ruptures spatiales dans le type d'occupation du sol : limite espace vide / espace bâti, limite entre espace boisé / surface en herbe, limite entre espace bâti très dense / espace bâti pavillonnaire, etc.

Les corrélations statistiques obtenues entre l'affaiblissement radio, les indicateurs morphologiques et leur localisation spatiale (en X, Y) montre bien que pour une zone géographique donnée, il existe un lien entre le type d'occupation du sol, les indices de forme décrivant la morphologie de cet environnement, ainsi que la loi de propagation des ondes radio (affaiblissement calculé).

Les 9 indices de forme peuvent donc être utilisés pour améliorer la classification automatique d'environnement, car à chaque type d'occupation du sol peut être associé une valeur d'indice de forme particulière (figures 208, 209, 210).

Les 9 indices de forme peuvent également être introduits dans les modèles de propagation d'ondes radio, afin de décrire mathématiquement la morphologie du milieu en présence, et ainsi améliorer la qualité de prévision du modèle.

L'étude des corrélations entre affaiblissements radio mesurés et indicateurs morphologiques nous a permis de démontrer qu'il existait un lien entre ces deux types de données (corrélations significatives la plupart du temps). La relation qui relie la morphologie d'un lieu (grâce aux indicateurs morphologiques qui le caractérise) et son comportement radio (grâce à l'affaiblissement radio mesuré), et ceci indépendamment de la position de la station émettrice, peut être illustrée.

Ces indices de forme sont de réels révélateurs de la morphologie d'une zone géographique donnée, et par conséquent également de la structure de cette même zone géographique.

Or c'est la structuration du milieu, c'est-à-dire la disposition des différents objets géographiques dans l'espace (taille et agencement des places, orientation des rues, taille et forme des clusters bâtis, etc.) qui définit le comportement radio. Les valeurs numériques prises par les indices morphologiques peuvent ainsi être « associées » à un affaiblissement du signal radio bien précis (figures 209, 210). Elles reflètent indirectement le mode de propagation des ondes radio selon le type d'environnement morphologique en présence : elles caractérisent l'influence de la structure du sursol (bâti, bois, espaces libres, etc.) situé à proximité du récepteur sur la propagation radio.


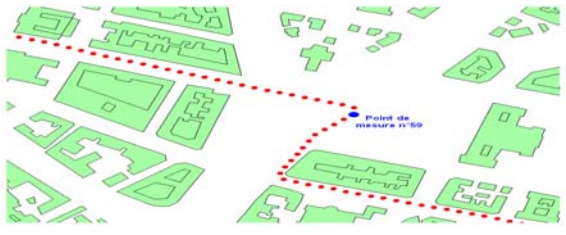




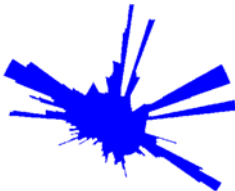
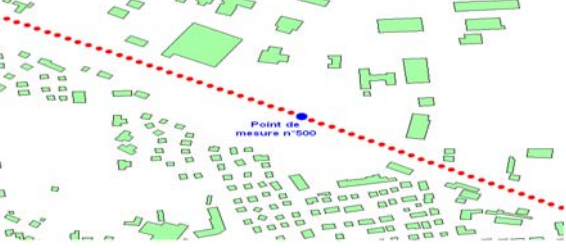

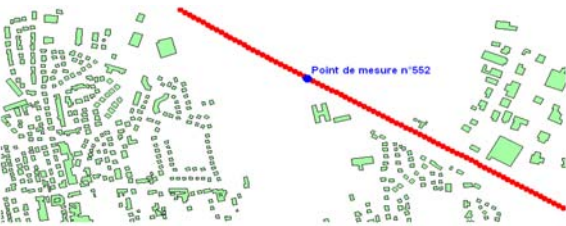

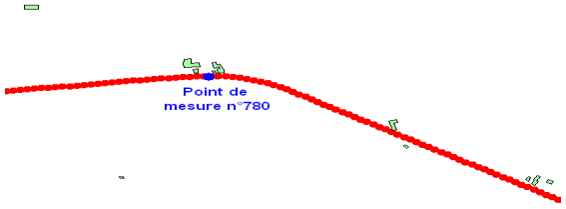

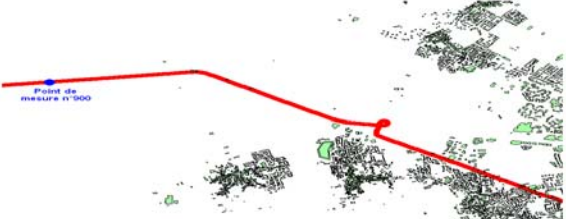
La comparaison des indices morphologiques obtenus pour chaque point de mesure radio pour les deux campagnes de mesure montre que la compacité est la plus élevée en environnement urbain très dense. L'élongation est plus forte pour les points de mesure situés dans des rues, ceci traduit bien l'effet de guides d'ondes que jouent les rues, en milieu urbain. La circularité est la plus élevée pour les places, les parkings, ce qui traduit bien la propagation en espace libre sans obstacle.

A chaque type d'environnement particulier (milieu rural, milieu périurbain, milieu urbain dense, milieu urbain très dense) correspond des surfaces de visibilité de formes et de tailles caractéristiques (figure 208).

Toutes ces données permettent ainsi de faire une classification selon le type de milieu en présence : les surfaces de visibilité sont caractéristiques de chaque type d'occupation du sol.

Les indices de forme permettent ainsi d'avoir une classification automatique du milieu géographique en présence. Ces données sont donc utiles en ingénierie radio.

Par exemple, dans le modèle de Okumura-Hata et le modèle COST-LD, le choix de l'équation de calcul de l'affaiblissement radio prédit (coefficients correcteurs) dépend du type de milieu en présence. Or l'utilisation de ces données morphologiques permet de connaître quasi-automatiquement le type de milieu en présence, et donc d'automatiser le calcul (choix du type d'équation) de l'affaiblissement radioélectrique par le modèle.

n° point	Type de milieu	Caractéristiques du tissu	Surface de visibilité	Visualisation du tissu
59	urbain très dense	Bâtiments denses, compacts, habitat jointif, peu d'espace libre	Forme très indentée, petite surface 	
270	open : ceinture verte	Espace ouvert (open) Très peu d'éléments bâtis	Forme semi-circulaire, grande surface 	
353	urbain dense	Bâtiments denses, jointifs, un peu moins compacts Plus d'espace libre (squares végétalisés, etc.)	Forme très indentée, petite surface, étroite 	
500	pavillonnaire	Bâtiments disjoints, bâti de plus petite taille (en surface et en volume) Beaucoup plus d'espace libre (jardins, rues larges, etc.)	Forme indentée, grande surface 	
552	pavillonnaire	Bâtiments disjoints, Bâti de plus petite taille (en surface, et en volume) Beaucoup plus d'espace libre	Forme semi-circulaire, grande surface 	
780	rural semi-dégagé	Espace ouvert (open) Très peu d'éléments bâtis	Forme semi-circulaire, grande surface 	
900	rural dégagé	Espace ouvert (open) Pas ou très rares présence d'éléments bâtis	Forme circulaire, surface maximale 	

Sources : C.Turck, LIV, 2005.

Figure 208 : Surfaces de visibilité et types de milieu géographique présent le long du trajet IMPG dans la CUS

n° point	Type de milieu	affaiblissement mesuré	Surface	Périmètre	Indice Miller	Indice Gravélius	Indice aplatissement	Indice compacité	Indice Morton	Indice élongation	Indice elliptique	Indice Kostrubiec	Coefficient Forme
1 à 265	urbain très dense	moy : 81,68 [min: 31,43 - Max : 110,29]	moy: 68450 [10752 - 218092]	moy: 3245 [1284 - 6788]	moy: 0,08 [0,03 - 0,15]	moy: 3,65 [2,59 - 5,56]	moy: 0,03 [0,01 - 0,17]	moy: 0,03 [0,01 - 0,09]	moy: 0,06 [0,01 - 0,16]	moy: 0,16 [0,08 - 0,28]	moy: 58,32 [15,69 - 180,26]	moy: 526,48 [251,95 - 1209,9]	moy: 0,09 [0,02 - 0,25]
266 à 298	open : ceinture verte	moy : 98,43 [94,72 - 101,42]	moy: 327674 [197879 - 395150]	moy: 6075 [4559 - 8505]	moy: 0,11 [0,06 - 0,16]	moy: 3,01 [2,51 - 4,10]	moy: 0,10 [0,01 - 0,22]	moy: 0,13 [0,08 - 0,16]	moy: 0,21 [0,13 - 0,25]	moy: 0,32 [0,25 - 0,35]	moy: 12,61 [10,12 - 20,20]	moy: 350,1 [236,11 - 650,21]	moy: 0,33 [0,20 - 0,40]
298 à 450	urbain dense	moy : 100,86 [90,29 - 113,18]	moy: 40123 [7309 - 325203]	moy: 3251 [1312 - 7453]	moy: 0,05 [0,02 - 0,11]	moy: 4,88 [3,02 - 6,86]	moy: 0,02 [0,01 - 0,06]	moy: 0,02 [0,01 - 0,13]	moy: 0,03 [0,01 - 0,23]	moy: 0,12 [0,07 - 0,34]	moy: 110,63 [10,95 - 231,22]	moy : 946,53 [348,37 - 1846,75]	moy: 0,05 [0,02 - 0,37]
451 à 649	pavillonnaire	moy : 99,54 [87,01 - 112,31]	moy: 448681 [141298 - 750799]	moy: 6596 [4212 - 10988]	moy: 0,17 [0,02 - 0,48]	moy: 3,21 [1,44 - 7,26]	moy: 0,21 [0,02 - 0,70]	moy: 0,18 [0,06 - 0,30]	moy: 0,29 [0,09 - 0,48]	moy: 0,37 [0,21 - 0,49]	moy: 11,81 [5,33 - 28,31]	moy: 480,94 [69,45 - 2068,76]	moy: 0,45 [0,14 - 0,75]
650 à 836	rural semi-dégagé	moy : 95,78 [84,72 - 105,45]	moy: 733692 [520494 - 785398]	moy: 4339 [3142 - 5251]	moy: 0,57 [0,28 - 1]	moy: 1,40 [1 - 1,89]	moy: 0,41 [0,01 - 1]	moy: 0,30 [0,21 - 0,32]	moy: 0,47 [0,33 - 0,50]	moy: 0,48 [0,41 - 0,50]	moy: 5,49 [5,09 - 7,69]	moy: 67,82 [21,91 - 128,53]	moy: 0,73 [0,52 - 0,79]
837 à 1382	rural dégagé	moy : 109,54 [88,20 - 121,40]	785398	3141,59	1	1	1	0,32	0,5	0,5	5,09	21,91	0,79

Sources : C.Turck, LIV, 2005.

Figure 209 : Synthèse : surfaces de visibilité et indicateurs morphologiques associés selon le type de milieu géographique présent le long du trajet IMPG dans la CUS

n° point	Type de milieu	Affaiblissement mesuré	Surface	Périmètre	Indice Miller	Indice Gravélius	Indice aplatissement	Indice compacité	Indice Morton	Indice élongation	Indice elliptique	Indice Kostrubiec	Coefficient Forme
59	urbain très dense	72,87	1423 10	5763	0,05	4,31	0,14	0,06	0,09	0,21	28,11	720,58	0,14
270	open : ceinture verte	100,63	3492 50	6078	0,12	2,9	0,07	0,14	0,22	0,33	11,45	319,74	0,35
353	urbain dense	99,81	2897 6	3140	0,04	5,2	0,03	0,01	0,02	0,1	136,1	1056,08	0,03
500	pavillonnaire	105,03	1660 54	7685	0,04	5,32	0,17	0,07	0,11	0,23	24,09	1104,77	0,17
552	pavillonnaire	96,56	5899 54	6721	0,16	2,47	0,15	0,24	0,38	0,43	6,78	227,95	0,59
780	rural semi-dégagé	91,02	5204 94	4800	0,28	1,88	0,02	0,21	0,33	0,41	7,69	126,47	0,52
900	rural dégagé	112,35	7853 98	3142	1	1	1	0,32	0,5	0,5	5,09	26,91	0,79

Sources : C.Turck, LIV, 2005.

Figure 210 : Surfaces de visibilité et indicateurs morphologiques associés selon le type de milieu géographique présent le long du trajet IMPG dans la CUS

3.5.13.4 - Intérêts et utilisation des indicateurs morphologiques en modélisation radioélectrique

Amélioration du modèle de propagation :

L'objectif de cette étude est l'amélioration de la qualité des modèles de propagation d'ondes radioélectriques, en terme de justesse de la prédiction de l'affaiblissement radioélectrique par le modèle par rapport aux mesures d'affaiblissement réel collectées sur le terrain.

Le but d'un modèle de propagation d'ondes radio est de pouvoir prédire l'intensité de l'affaiblissement que le signal radio va subir pour un espace géographique donné. L'équation de calcul de l'affaiblissement radio est l'élément central du modèle. Il existe trois modes de calcul de l'affaiblissement radio : par maille (la maille d'arrivée du signal radio, où est localisé le récepteur), par profil (la coupe de profil vertical entre l'émetteur et le récepteur), et par couverture (l'ensemble de la surface couverte par le signal radio émis depuis l'émetteur, c'est-à-dire la cellule du réseau radiomobile).

Il existe deux types de variables qui entrent en compte dans le calcul de l'affaiblissement du signal : les variables radioélectriques et les variables géographiques.

Les paragraphes précédents ont montré l'intérêt de compléter les données habituelles par des données géographiques indirectes (indicateurs morphologiques).

- Cas général : le calcul de l'affaiblissement radioélectrique par les modèles de propagation d'ondes radioélectriques :

L'affaiblissement des ondes radio calculé par les modèles est fonction de variables géographiques et de variables radioélectriques.

$$\left(Aff_{E-R} \right) = \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot Indicateurs\ Morpho_i \right) + \left(\sum_{i=1}^n \beta_i \cdot Variables\ Radio_i \right) + \left(\sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot Variables\ Géo\ directes_i \right) \quad (57)$$

L'utilisation de nouvelles variables géographiques (surfaces de visibilité, classes radio dépendantes, indicateurs morphologiques, etc.) va permettre de recentrer les modèles de propagation d'ondes selon le milieu en présence (milieu urbain dense, sub-urbain, rural, montagneux, côtier, etc.).

Elles vont également permettre d'améliorer et automatiser certains calculs effectués dans les modèles de propagation d'ondes radio : comparaison de couvertures de champ, calcul de trafic radio, calcul du type d'occupation du sol majoritaire par maille le long du profil E-R, etc.

L'utilisation d'un SIG et de variables géographiques variées va permettre d'automatiser et d'optimiser le choix du modèle de propagation le plus adapté en fonction des caractéristiques du milieu géographique en présence. Auparavant le choix du type de modèle à utiliser (macro, méso, micro ou pico cellulaire), ainsi que le choix du modèle de propagation lui-même, était effectué manuellement par un opérateur (technicien, ingénieur).

- Dans les modèles de propagation d'ondes radioélectriques dédiés au dimensionnement des réseaux radiomobiles :

Les variables géographiques vont permettre de corriger l'équation de calcul de l'affaiblissement radioélectrique dans les modèles de dimensionnement. Cette équation est couramment appelée « loi de dépendance » de l'affaiblissement radio en fonction de la distance émetteur-récepteur.

La loi de dépendance de l'affaiblissement en distance E-R est l'équation principale utilisée dans tout modèle de dimensionnement.

La loi de dépendance :

$$\boxed{\underset{\text{calculé}}{Aff} = a + b \cdot \log_{10} \underset{E-R}{\text{distance}}} \quad (58)$$

Avec :

Aff calculé : l'affaiblissement radioélectrique calculé par le modèle de propagation

a, b : coefficients de correction du modèle en fonction du milieu géographique.

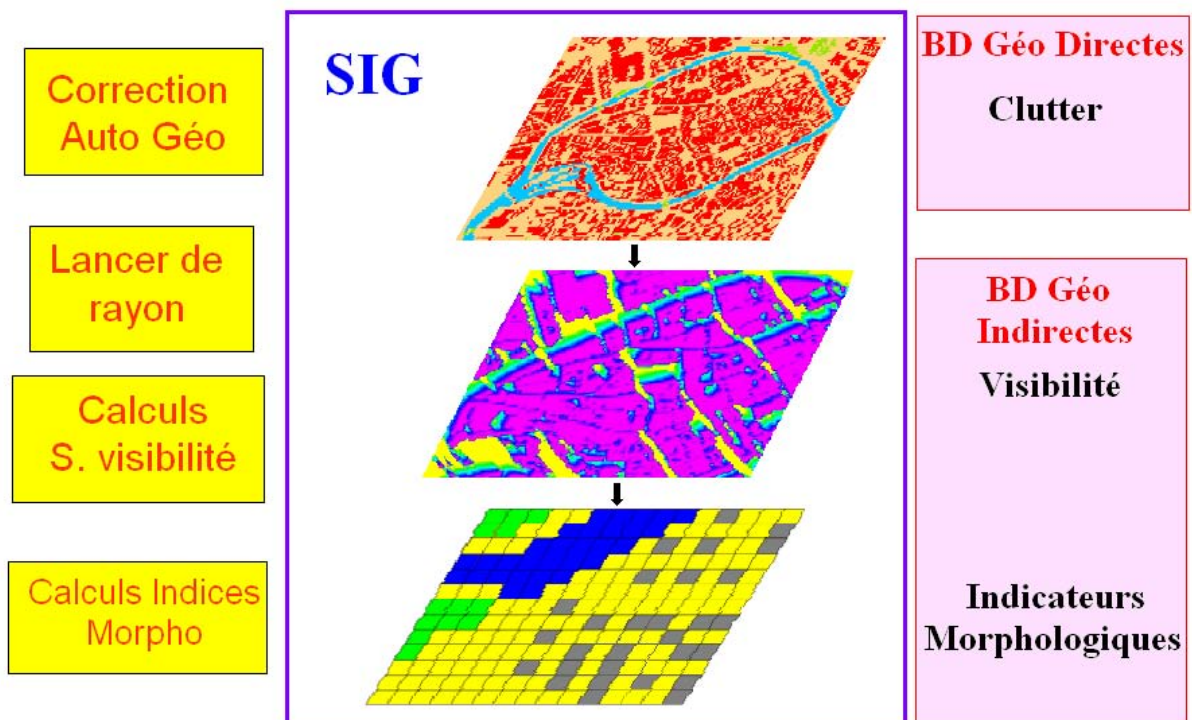
distance_{E-R} : distance (en mètres) qui sépare l'émetteur du récepteur mobile.

Dans les modèles de dimensionnement l'affaiblissement est fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur. Les coefficients *a* et *b* correspondent à des coefficients de correction du modèle de propagation d'ondes radio. Ils dépendent des caractéristiques du milieu géographique rencontrées le long du canal de propagation. Ils dépendent du type d'occupation du sol présent le long de la liaison radio.

Dans le chapitre 4, nous mettrons en évidence le lien mathématique qui relie l'affaiblissement radioélectrique et le type de milieu géographique traversé par les ondes dans un exemple concret : l'équation de calcul de l'affaiblissement radio par le modèle de propagation de Okumura-Hata et par le modèle COST-LD. Nous calculerons les coefficients de corrections du modèle en fonction du type d'environnement géographique présent dans la Communauté Urbaine de Strasbourg.

3.5.13.5 – Conclusion du troisième chapitre

L'analyse des résultats obtenus pour les indicateurs morphologiques dans différents types d'environnements (figures 208, 209, 210), nous a permis de mettre en évidence le fait que les valeurs numériques prises par les indices morphologiques peuvent être associées aux valeurs d'affaiblissements du signal radio mesurées sur ces mêmes zones. Les indices morphologiques reflètent indirectement le mode de propagation des ondes radio selon le type d'environnement morphologique en présence : ils caractérisent l'influence de la morphologie du sursol (bâti, bois, etc.) situé à proximité du récepteur sur la propagation radio.



Sources : C. Turck, LIV, 2005.

Figure 211: Récapitulatif de la démarche adoptée afin d'améliorer la qualité de l'Information Géographique utilisée dans les modèles et les outils d'ingénierie radiomobile.

Dans le deuxième et le troisième chapitre, nous avons proposés différentes solutions afin d'améliorer la qualité de l'information géographique qui sera utilisée en ingénierie radiomobile (figure 211). Ceci a permis d'améliorer la qualité de la prédiction radiomobile. Ces différentes solutions ont été implémentées à l'aide d'un SIG. Nous avons mis au point une application sous SIG, prénommée OpenMorph, afin de valider concrètement ces méthodes.

4 – Le modèle OpenMorph

Comme nous l'avons vu dans le troisième chapitre l'information spatiale utilisée dans les modèles de propagation possède ses limites intrinsèques (qualité des données géographiques, précision, sémantique, mises à jour, coût) ainsi que des limitations externes (nécessité d'une meilleure prise en compte du milieu géographique). Nous avons proposé un ensemble de solutions afin de dépasser ces limites et d'améliorer la qualité de la modélisation radio : correction des erreurs dans les données géographiques classiques utilisées par FTR&D, utilisation de nouvelles données géographiques directes (MNT 25 mètres, images THR, TIN, etc.), ainsi que l'utilisation de nouvelles variables géographiques indirectes, les indicateurs morphologiques, qui permettent de décrire plus efficacement l'environnement le long du canal de propagation radio, et d'améliorer ainsi la qualité de la prédiction du modèle.

Le quatrième chapitre présente la mise en application des variables géographiques indirectes et l'amélioration de la modélisation radioélectrique dans un modèle de propagation d'ondes radioélectriques : le modèle OpenMorph. Ce modèle a été implémenté sur le Système d'Information Géographique ArcView, qui est utilisé comme une plateforme d'ingénierie radiomobile.

Le modèle OpenMorph est composé de deux modules : un module d'analyse spatiale et un module de modélisation radioélectrique.

La première partie du chapitre présente l'optimisation d'un modèle de propagation d'ondes radio (Hata et COST-LD) par une meilleure prise en compte du milieu géographique (type d'occupation du sol).

La seconde partie du chapitre présente l'implémentation du modèle OpenMorph grâce au SIG. ArcView est utilisé comme plateforme d'ingénierie radio : calcul de couverture de champ radioélectrique, visualisation des données géographiques en 2D et 3D, visualisation des calculs radio, des calculs morphologiques (indicateurs morphologiques en 2D et 3D), optimisation et calibration automatique du modèle par rapport au milieu géographique en présence, etc.

Nos propositions afin d'optimiser les modèles de propagation d'ondes radio se résument de la manière suivante :

1. Introduction de nouvelles variables géographiques afin de mieux caractériser le milieu géographique dans lequel les ondes se propagent : les indicateurs morphologiques, qui fournissent des informations sur la morphologie (forme) et la structure des objets géographiques.
2. Acquisition et utilisation des données géographiques appropriées :
 - * Calcul des coefficients de correction des modèles selon le type d'occupation du sol ou d'autres données géographiques caractéristiques du milieu en présence.
 - * Utilisation des données géographiques pour requalifier le modèle de propagation, et choisir automatiquement (grâce au SIG) l'équation de calcul de l'affaiblissement radio la mieux adaptée au contexte géographique de la zone d'étude.

4.1 – Optimisation des modèles de propagation d’ondes radio

4.1.1 – Optimisation du modèle de propagation d’ondes radio de Okumura-Hata

4.1.1.1 – Introduction

En tant que géographe, nous nous sommes intéressés aux liens pouvant être dégagés entre la propagation des ondes radio et le milieu géographique traversé par ces ondes.

Cette partie présente l’intérêt d’une meilleure prise en compte de l’environnement pour la prédiction de l’affaiblissement radio par un modèle de propagation d’ondes radio.

Des liens entre l’affaiblissement radio mesuré sur le terrain et le type d’occupation du sol ont été mis en évidence. Des liens mathématiques (des coefficients de correction de l’équation de calcul de l’affaiblissement radio selon le type d’occupation du sol) ont été créés afin d’améliorer la qualité de la prédiction. Ainsi nous obtenons une optimisation de l’équation de calcul de l’affaiblissement radio selon le type d’occupation du sol traversé par les ondes. Les calculs sont appliqués au modèle de propagation de Okumura-Hata, qui est souvent utilisé pour le dimensionnement d’un réseau radiomobile.

Dans un premier temps nous allons présenter la méthode de calcul de l’affaiblissement radio par le modèle de propagation d’ondes radio de Okumura-Hata.

Puis nous présenterons le type de milieu géographique qui fut pris en compte par Okumura et Hata pour mettre au point leur modèle de propagation d’ondes radio.

Nous présenterons ensuite les aspects informatiques : les programmes développés ainsi que l’implémentation du modèle de propagation à l’aide d’un Système d’Information Géographique.

Ensuite sera présentée la démarche méthodologique mise en œuvre afin d’améliorer le modèle de Hata (affectation d’un type d’occupation du sol à un affaiblissement radio donné, calcul des coefficients de correction de l’équation de calcul de l’affaiblissement selon le milieu géographique traversé).

Enfin, nous présenterons les résultats obtenus sur la Communauté Urbaine de Strasbourg pour chaque classe d’occupation du sol radio dépendante : les coefficients de correction à rajouter pour améliorer le calcul de l’affaiblissement radio par le modèle de Hata.

4.1.1.2 - Présentation du modèle de propagation de Okumura-Hata

Un modèle empirique est basé sur l'analyse statistique d'un grand nombre de mesures expérimentales réalisées en fonction de différents paramètres tels que la fréquence d'émission, la distance émetteur-récepteur, la hauteur de l'antenne émettrice et la hauteur du mobile, etc.

Le modèle de Okumura-Hata est le modèle empirique de référence en propagation radio. De nombreux auteurs y font références dans leurs publications comme par exemple X. Lagrange¹⁷⁸ (LAGRANGE, 1999), H. Sizun¹⁷⁹ (SIZUN, 2003).

Le modèle de Okumura-Hata¹⁸⁰ s'utilise en environnement macro cellulaire, il s'applique donc pour des tailles de cellules relativement grandes (de rayon supérieur ou égal à 1 Km), et surtout lorsque l'antenne de la station de base est située au-dessus du niveau des toits avoisinants. Le modèle s'applique aux fréquences comprises entre 150 et 1500 MHz.

Le modèle de propagation, qui fut créé à l'origine par Yoshihisa Okumura, est basé sur l'analyse statistique d'un grand nombre de mesures expérimentales réalisées à l'intérieur et à proximité de la ville de Tokyo en fonction de différents paramètres tels que la fréquence d'émission, la distance émetteur-récepteur, etc.

Dans son article de 1968, Okumura¹⁸¹ présente ses résultats sous forme graphique. Il exprime la valeur médiane de l'affaiblissement radio en milieu urbain A_{50} , sur sol plane ou régulier, sous la forme d'une somme de termes :

$$A_{50} = A_F + A_m + H_B + H_M \quad (59)$$

Avec:

A_{50} : l'affaiblissement des ondes radio calculé par le modèle de Okumura (en décibels),

A_F : l'affaiblissement du signal radio en espace libre (en décibels),

A_m : la médiane de l'affaiblissement du signal pour une hauteur d'antenne Z_{Hb} de référence égale à 200 mètres et une hauteur de mobile Z_{Hm} de référence égale à 3 mètres (en décibels),

$H_B(Z_{Hb}, d)$: terme correctif à utiliser lorsque la hauteur de l'antenne émettrice de la station de base n'est pas égale à la hauteur de référence (200 mètres),

$H_M(Z_{Hm}, d)$: terme correctif à utiliser lorsque la hauteur du récepteur mobile n'est pas égale à la hauteur de référence (3 mètres).

Tandis que l'affaiblissement radio en espace libre A_F est calculé par la formule classique, les autres termes sont donnés sous forme de courbes pour une fréquence f allant de 100 à 3000 MHz et une distance émetteur-récepteur d comprise entre 1 et 100 kilomètres. Des termes correctifs supplémentaires sont également donnés sous forme graphique pour tenir compte de l'orientation des rues, du type d'environnement lorsqu'il n'est pas urbain (environnement suburbain ou rural) et de l'irrégularité du terrain.

¹⁷⁸ LAGRANGE X., GODLEWSKI P., TABBANE S., 1999, *Réseaux GSM-DCS*, éd. Hermès, coll. Réseaux et Télécommunications, Paris, 479 pages.

¹⁷⁹ SIZUN H., 2003, *La propagation des ondes radioélectriques*, éd. Springer, Col. Technique et Scientifique des Télécommunications, Paris, 355 pages.

¹⁸⁰ HATA M., 1980, *Empirical formula for propagation path loss in land mobile radio services*, IEEE Trans. Veh. Tech., vol. 29, n°3, pages 317-325.

¹⁸¹ OKUMURA Y. *et al.*, 1968, Field Strength and its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Radio Service, *Review of the Electrical Communication Laboratory*, Vol. 16, Numbers 9-10, septembre-octobre 1968.

La difficulté d'emploi de la méthode de Yoshihisa Okumura résulte essentiellement de sa présentation sous forme de réseaux de courbes, qui se prêtent difficilement à un emploi automatique.

C'est pourquoi Masaharu Hata a proposé une optimisation du modèle de Y. Okumura. M. Hata a beaucoup contribué à rendre populaires les résultats de Okumura en publiant des formules mathématiques d'ajustement relativement simples d'emploi dans son article de 1980.

L'équation générale de calcul de l'affaiblissement radioélectrique en milieu urbain par le modèle de Okumura-Hata est donnée par la relation mathématique suivante :

$$Aff = 69.55 + 26.16 \text{ Log } f - 13.82 \text{ Log } Z_{Hb} + (44.9 - 6.55 \text{ Log } Z_{Hb}) \text{ Log } d_{E-R} - a(Z_{Hm}) \quad (60)$$

Avec :

Aff : l'affaiblissement des ondes radio calculé par le modèle de Okumura-Hata, donné en décibels,

f : la fréquence d'émission en décibels, comprise entre 150 et 1500 mégahertz,

Z_{Hb} : la hauteur de l'antenne émettrice de la station de base, hauteur comprise entre 30 et 200 mètres,

Z_{Hm} : la hauteur du récepteur mobile, hauteur comprise entre 1 et 10 mètres,

d_{E-R} : la distance séparant l'émetteur du récepteur, distance comprise entre 1 et 20 kilomètres,

$a(Z_{Hm})$: un coefficient correctif lié au type de milieu géographique traversé par les ondes (grande ville, ville de petite et moyenne taille, milieu périurbain et milieu rural).

Le tableau ci-dessous présente les formules de calcul de l'affaiblissement radioélectrique total par le modèle de OKUMURA-HATA et son extension à la bande des fréquences 1500-2000 MHz dans le cadre des travaux du COST 231 (le modèle COST231-HATA) en fonction de la fréquence d'émission et du type de milieu géographique traversé :

Calcul de l'affaiblissement radioélectrique total par le modèle de Okumura-Hata
<p>Equation générale</p> <p>- Si $f < 1500$ MHz</p> $Aff = 69,55 + 26,16 \text{ Log } f - 13,82 \text{ Log } Z_{Hb} + (44,9 - 6,55 \text{ Log } Z_{Hb}) \text{ Log } d_{E-R} - a(Z_{Hm}) \quad (61)$ <p>- Si $2000 \text{ MHz} > f > 1500 \text{ MHz}$</p> $Aff = 46,3 + 33,9 \text{ Log } f - 13,82 \text{ Log } Z_{Hb} + (44,9 - 6,55 \text{ Log } Z_{Hb}) \text{ Log } d_{E-R} - a(Z_{Hm}) \quad (62)$ <p>- Avec :</p> $a(Z_{Hm}) = [1,1 \text{ Log } f - 0,7].Z_{Hm} - [1,56 \text{ Log } f - 0,8] \quad (63)$
<p><u>Milieu urbain</u></p> <p>L'équation de propagation reste la même, seul le paramètre $a(Z_{Hm})$ change :</p> <p>Pour les grandes villes (Tokyo, Strasbourg centre) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pour $200 \text{ MHz} < f$ $a(Z_{Hm}) = 8,29[\text{Log}(1,54.Z_{Hm})]^2 - 1,1 \quad (64)$ • Pour $400 \text{ MHz} < f < 1500 \text{ MHz}$ $a(Z_{Hm}) = 3,2[\text{Log}(11,75.Z_{Hm})]^2 - 4,97 \quad (65)$ <p>Pour les villes de taille moyenne et les petites villes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pour $400 \text{ MHz} < f < 1500 \text{ MHz}$ $a(Z_{Hm}) = [1,1 \text{ Log } f - 0,7].Z_{Hm} - [1,56 \text{ Log } f - 0,8] \quad (66)$ • Pour $2000 \text{ MHz} > f > 1500 \text{ MHz}$ $Aff = 46,3 + 33,9 \text{ Log } f - 13,82 \text{ Log } Z_{Hb} + (44,9 - 6,55 \text{ Log } Z_{Hb}) \text{ Log } d_{E-R} - a(Z_{Hm}) + C_m \quad (67)$ <p>Où:</p> <p>$a(Z_{Hm})$ est identique à l'expression (63)</p> <ul style="list-style-type: none"> • $C_m = 0$ décibel pour les petites villes et les villes de taille moyenne, • $C_m = 3$ décibels pour les grandes villes.

Milieu périurbain

L'affaiblissement Aff_{su} exprimé en dB est donné en appliquant la formule du milieu urbain affectée d'une correction :

$$Aff_{su} = Aff - 2[\text{Log}(f/28)]^2 - 5,4 \quad (68)$$

Milieu rural

On distingue le cas où l'environnement est totalement dégagé comme dans un désert (affaiblissement Aff_{ro}) ce qui rejoint le Modèle de propagation en espace libre ; et le cas où l'environnement est semi dégagé comme une campagne (Aff_{rqo}).

- Pour un milieu rural dégagé :

$$Aff_{ro} = Aff - 4,78[\text{Log}(f)]^2 + 18,33\text{Log}(f) - 40,94 \quad (69)$$

- Pour un milieu rural semi dégagé :

$$Aff_{rqo} = Aff - 4,78[\text{Log}(f)]^2 + 18,33\text{Log}(f) - 35,94 \quad (70)$$

Sources : C.Turck, FTR&D, 2002, d'après M. Hata, 1980.

Figure 212 : Equations de calcul de l'affaiblissement radioélectrique par le modèle de propagation de Okumura-Hata selon le type de milieu géographique

Les formules (61), (63), (64), (65), (66), (68), (69) et (70) sont celles déterminées par M. Hata en 1980. Les formules (62) et (67) sont une optimisation du modèle, le modèle COST231-HATA, figurant dans le rapport final du projet européen COST Action 231¹⁸².

¹⁸² COST 231, 1999, *Evolution of land mobile radio (including personal) communications*, Final report "Information, Technologies and Sciences", European Commission.

4.1.1.3 – Typologie du milieu géographique pris en compte par Okumura et Hata pour mettre au point leur modèle de propagation d’ondes radio

Il est important de signaler que le modèle de Hata a été publié en 1980 et que les mesures radio ayant servies à établir le premier modèle, celui de Okumura, ont été faites dans les années 60. Le modèle statistique, élaboré à partir de ces mesures radio collectées dans l’agglomération et la région de Tokyo, fut présenté par Yoshihisa Okumura dans son article publié en 1968.

Dans le paragraphe ci-dessous, nous présentons les quatre milieux géographiques typiques ayant été pris en compte dans le modèle de propagation de Okumura dans les années 60, pour l’agglomération de Tokyo et ses environs. Nous décrivons rapidement les caractéristiques environnementales de ces quatre types de tissus ayant été pris en compte par Okumura et Hata dans leur modèle de propagation d’ondes radio.

Pourquoi est-ce si important de connaître la typologie du bâti de Tokyo à cette époque ? Le type de sursol (bâtiments, espaces vides, végétation, etc.) joue un rôle important sur la propagation des ondes radio : le sursol joue le rôle d’obstacle à la propagation des ondes radio. C’est pourquoi on peut différencier l’environnement selon le comportement des ondes radio qui le traverse. Okumura a effectué des mesures d’affaiblissement radioélectrique des ondes pour quatre types d’environnements géographiques, qu’il a considéré comme étant caractéristiques du point de vue propagation du signal radio : milieu rural, milieu urbain de type « très grande ville », milieu urbain de type « ville de taille moyenne », et enfin milieu urbain de type « petite ville ». Mais un quartier composé de petits immeubles de béton et bois à Tokyo peut-il être considéré comme ayant le même impact sur la propagation des ondes radio qu’un quartier urbain composé de petits immeubles à Strasbourg ? Si oui, l’équation de calcul de l’affaiblissement radio par le modèle de Okumura-Hata peut être appliquée sans corrections : on utilise les coefficients fournis par le modèle de Okumura-Hata pour chaque type de milieu géographique traversé (grande ville, ville de taille moyenne, petite ville et milieu rural). Mais la réalité est toute autre, les études menées dans le cadre du projet européen COST Action 231 en 1999 (COST 231, 1999) ainsi que les études menées au CNET par Jean-Claude Bic (BIC, 1995) ont montrées que l’atténuation du signal radioélectrique dans une ville européenne n’est pas la même que celle mesurée dans une ville asiatique par exemple, et même parfois entre une ville du sud de l’Europe et une ville du nord de l’Europe. La différence de comportement des ondes radioélectriques dépend fortement de la typologie du tissu urbain traversé, en terme de forme des éléments bâtis, de leur structure, de leur composition (matériaux de construction), de leur hauteur, etc.

Tout ceci nous a amené à étudier la conformité (du point de vue environnement traversé par les ondes radio) du modèle de Okumura-Hata pour une ville européenne, en l’occurrence la ville de Strasbourg. Nous avons comparé les calculs d’affaiblissements radio obtenus avec le modèle de propagation radio de Okumura-Hata pour les quatre types de milieux géographiques pris en compte par le modèle, avec l’affaiblissement radio réel mesuré sur le terrain pour les mêmes zones géographiques. Ceci nous a permis de tester la validité du modèle pour Strasbourg, et de calculer des coefficients de correction selon le milieu géographique en présence.

Le tissu urbain du type « très grande ville » : la ville centrale de Tokyo

La ville de Tokyo a été pratiquement entièrement détruite pendant la seconde Guerre Mondiale. Après guerre, des immeubles à 1 ou 2 étages en bois à vocation résidentielle, commerciale, ainsi que des immeubles de bureaux ont été construits. Ainsi dans les années 60, lorsque les mesures radioélectriques ont été faites, la ville de Tokyo était composée principalement d'immeubles en bois de petite taille (1 voir 5 étages maximum, ce qui correspond à une hauteur de 20 mètres maximum).

Dans les années 60, la ville de Tokyo était déjà très différente des villes européennes, comme Strasbourg, du point de vue de sa structure bâtie : la ville de Tokyo était composée principalement de petites immeubles à 2 étages, en bois, alors que la ville de Strasbourg était constituée d'immeubles de 5 à 10 étages, en pierre et béton.

En 1965, il n'y a guère que dans les quartiers centraux de Tokyo que la structure bâtie était proche de la typologie des centres-villes européens, composés de petits immeubles de 5 à 10 étages en béton et pierre.

La typologie du bâti de l'agglomération de Tokyo a évolué en 30 ans. A partir des années 70, les entrepreneurs ont commencé à construire des buildings dans le quartier des affaires, entièrement réaménagé d'autres quartiers, etc. Néanmoins, la ville de Tokyo a quand même gardé une structure bâtie plutôt horizontale, donc très différente des villes américaines aux rues rectilignes et grands buildings. Mais de nos jours, en ce début de XXI^{ème} siècle, la ville de Tokyo évolue rapidement : de nombreux projets de construction de buildings de 40 voir 50 étages (jusqu'à 200 mètres de haut) voient le jour au centre-ville. La ville se transforme progressivement. Mais Tokyo reste quand même plutôt une « ville horizontale » et non « verticale » comme l'écrit le journaliste Philippe Pons¹⁸³ dans un article¹⁸⁴ paru dans le journal *Le Monde* du 10 mai 2002.

La question de l'étude de la typologie du milieu géographique selon le pays concerné est nécessaire, mais le constat d'une nécessaire adaptation du modèle de propagation est une évidence.

¹⁸³ Philippe Pons est journaliste, correspondant permanent pour le journal *Le Monde* à Tokyo au Japon.

¹⁸⁴ Philippe Pons, *Tokyo, une ville à l'assaut du ciel*, in *Le Monde*, 11 mai 2002, Paris, France.

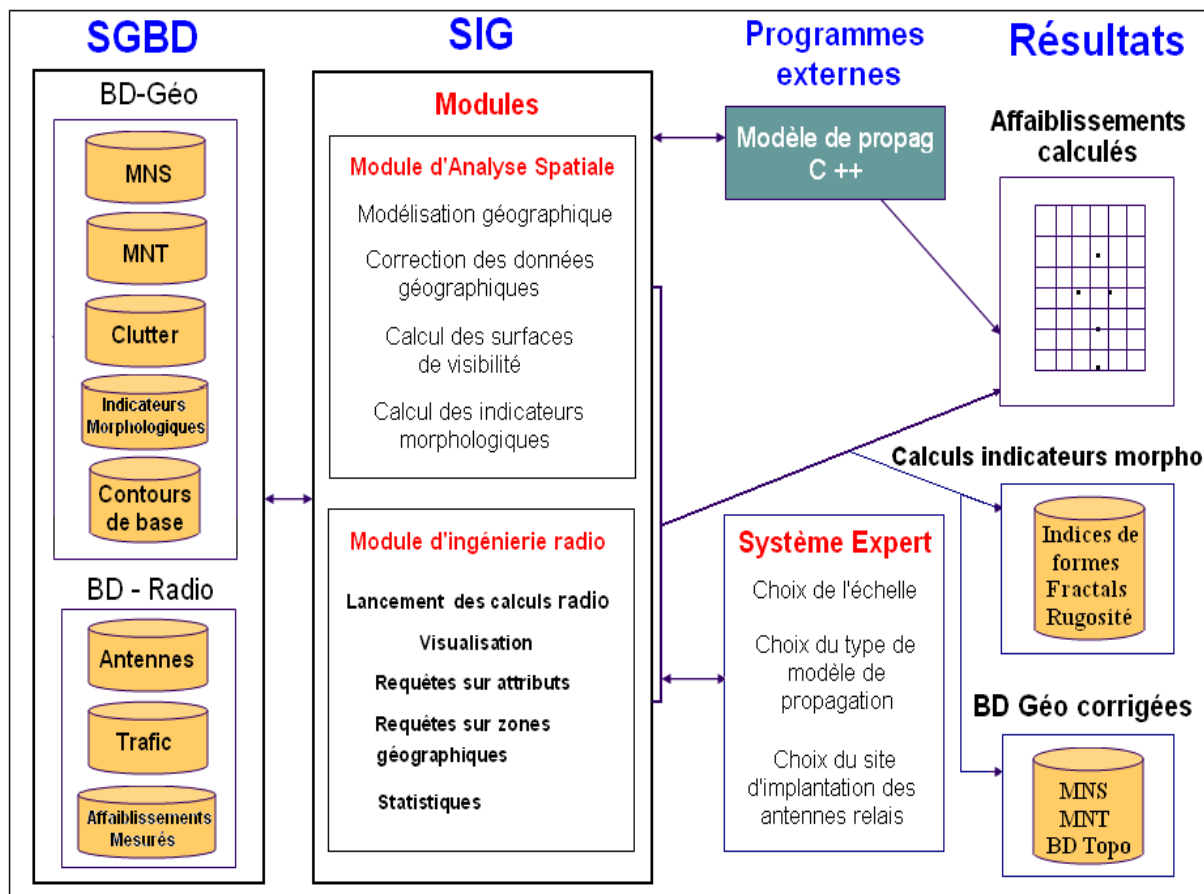
4.1.1.4 – Implémentation du modèle de propagation à l'aide du Système d'Information Géographique

Après avoir analysé tous les éléments à prendre en compte dans le modèle (données disponibles, paramètres en entrée du modèle, équations mathématiques, résultats attendus, etc.), le modèle de propagation de Okumura-Hata a été programmé dans un langage orienté objet (Langage C++) à l'aide du logiciel Visual C++. Le programme de Hata a été développé sous forme de module indépendant, afin de pouvoir être interfacé sous Windows avec le Système d'Information Géographique ArcGIS (ArcView 8, ArcInfo 8). L'interfaçage est facilité par l'utilisation des ArcObjets d'ArcInfo, qui ont été conçus de manière à pouvoir être utilisés avec des modules ou des logiciels extérieurs au SIG.

Les composants logiciels utilisés, ainsi que les modules développés (figure 213), permettent de calculer l'affaiblissement radioélectrique par le modèle de Okumura-Hata dans le SIG. Les données géographiques et radioélectriques sont stockées dans un SGBDR, tel que Access ou Oracle.

Le modèle OpenMorph est composé de deux modules qui sont interfacés l'un avec l'autre : un module d'ingénierie radiomobile et un module d'analyse spatiale (figure 213).

Le module de calcul radio de Okumura-Hata fait partie du module d'ingénierie radiomobile.



Sources : C.Turck, LIV, Strasbourg, 2002.

Figure 213 : Configuration logicielle d'OpenMorph pour le calcul de l'affaiblissement radio par le modèle de Okumura-Hata sous ArcInfo 8

4.1.1.5 – La démarche méthodologique mise en œuvre

4.1.1.5.1 - Présentation de la démarche méthodologique

La démarche mise en œuvre afin de réajuster le modèle de propagation en fonction du type d'occupation du sol présent dans la CUS, a été implémentée dans le module d'Analyse Spatiale d'OpenMorph.

Il s'agit de décrire mathématiquement (grâce aux statistiques) l'évolution de l'affaiblissement de propagation mesuré et de l'affaiblissement prédit par le modèle de Okumura-Hata en fonction du type de milieu géographique présent le long du profil émetteur-récepteur (donc en fonction de la distance émetteur-récepteur).

On désigne par « **classe radio dépendante** » (figure 214) une surface géographique présentant un type homogène d'occupation du sol (la même classe d'occupation du sol majoritaire : urbain très dense, urbain dense, périurbain ou rural) et tels que les affaiblissements radio mesurés sur le terrain pour cette surface suivent la même loi mathématique de calcul de l'affaiblissement.

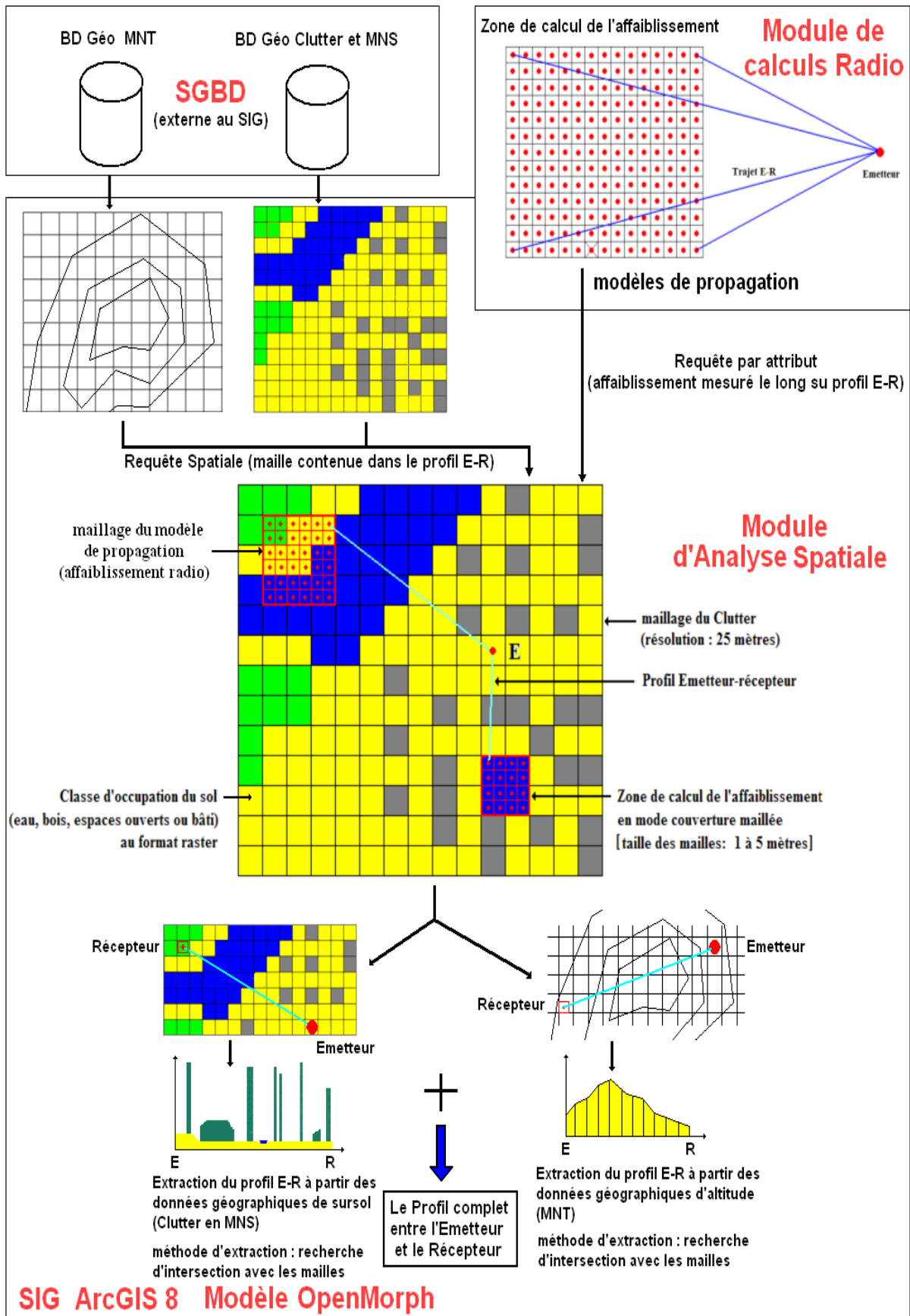
La figure 214 présente schématiquement la méthode d'extraction des classes d'occupations du sol radio dépendantes à partir des données géographiques (MNT, MNS et Clutter) et des données radioélectriques (affaiblissements radioélectriques).

La mise en évidence de l'association entre un type d'occupation du sol et une loi mathématique de dépendance en distance E-R pour l'affaiblissement radio (équation de calcul de l'affaiblissement radio en fonction de la distance E-R) nécessite de définir d'une part le principe d'affectation d'une liaison émetteur-récepteur à un type de classe radio dépendante, et d'autre part la définition de la loi mathématique de dépendance en distance de l'affaiblissement prédit par le modèle pour cette classe d'occupation du sol.

Quatre classes radio dépendantes sont étudiées : urbain très dense, urbain dense, périurbain, et rural.

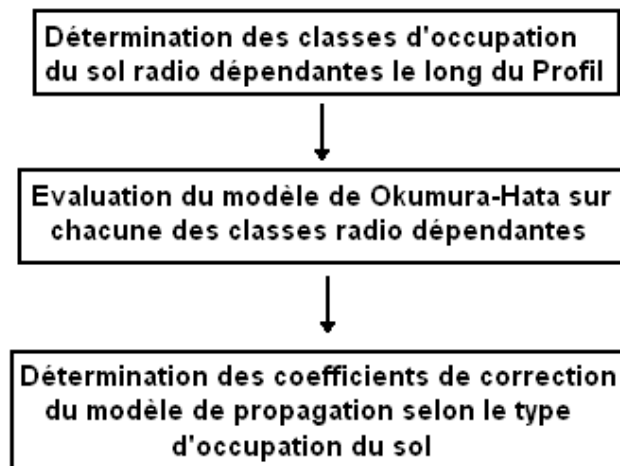
La finalité de cette étude est d'améliorer les performances du modèle de Okumura-Hata en terme de qualité de la prédiction de l'affaiblissement radio par le modèle (diminuer l'erreur moyenne et l'écart-type entre l'affaiblissement mesuré sur le terrain et l'affaiblissement prédit par le modèle).

Le but final est de mettre au point des coefficients de correction de l'affaiblissement prédit par le modèle, selon le type d'occupation du sol présent le long du canal de propagation radio (profil E-R).



Sources : C.Turck, FTR&D, 2002.

Figure 214 : Principe d'extraction des classes d'occupation du sol radio dépendantes dans le module d'Analyse Spatiale du modèle OpenMorph (sous le SIG ArcGIS 8)



Sources : C.Turck, FTR&D, 2002.

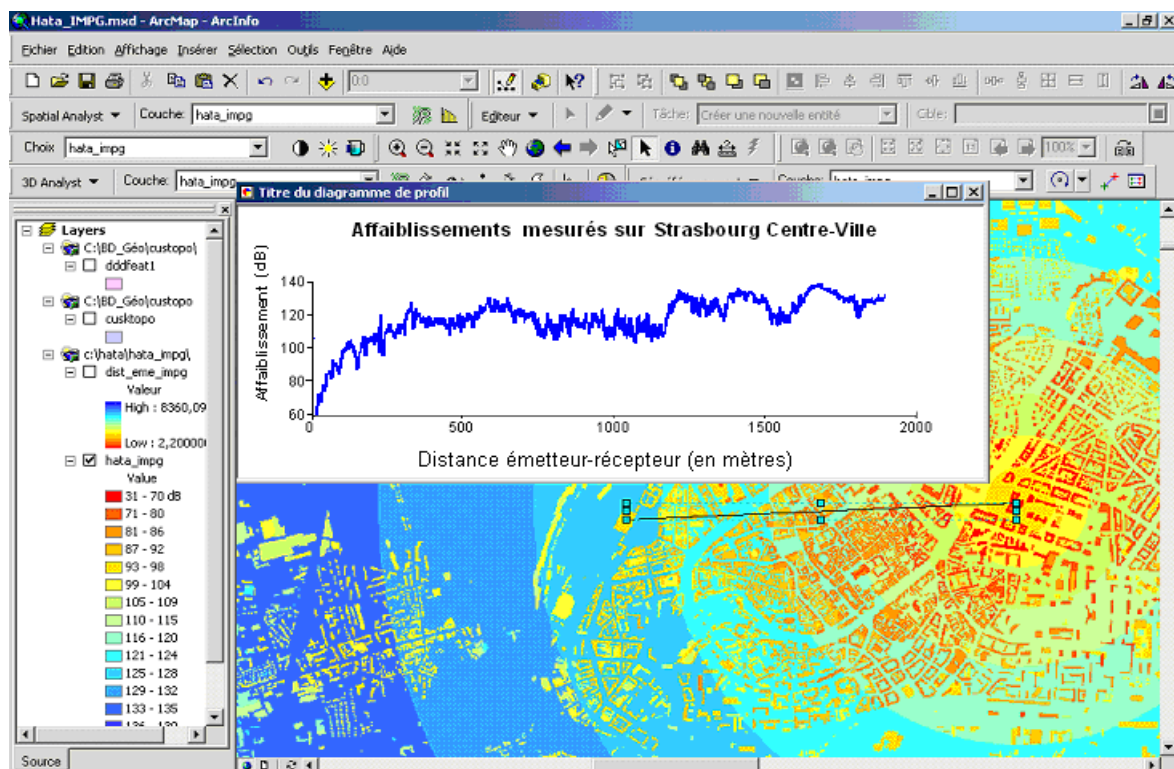
Figure 215 : La démarche méthodologique radiomobile mise en œuvre : Procédé d'attribution d'une classes d'occupation du sol radio dépendante - Calcul des coefficients de correction du modèle de Okumura-Hata

4.1.1.5.2 - Principe d'affectation d'une classe d'occupation du sol radio dépendante

Quatre types d'occupation du sol sont pris en compte dans la démarche d'affectation : urbain très dense, urbain dense, périurbain et rural. La zone géographique prise en compte pour le calcul correspond à la ville de Strasbourg pour les classes d'occupation du sol « urbain très dense », « urbain dense », et aux communes de la Communauté Urbaine de Strasbourg pour les classes d'occupation du sol « périurbain » et « rural ».

La méthode d'affectation d'un type d'occupation du sol est appliquée à deux modes de calcul de l'affaiblissement radio : d'abord en mode maillé, c'est-à-dire pour la maille d'arrivée (la maille dans laquelle est localisé le récepteur), puis la méthode est généralisée au mode profil c'est-à-dire que l'affectation des classes radio dépendantes s'effectue le long des coupes de profil émetteur-récepteur. Les données géographiques raster prises en compte pour les calculs correspondent à un Modèle Numérique de Terrain au pas de 100 mètres et à un Modèle Numérique de Surface au pas de 25 mètres.

La coupe de profil de la liaison émetteur-récepteur est échantillonnée avec un pas de 100 mètres en partant de l'émetteur. Par exemple pour une liaison E-R mesurant un kilomètre, on aura 10 points d'échantillonnage. Pour chaque échantillon on affectera à la classe radio dépendante le type d'occupation du sol majoritaire dans la maille. Au final, on obtient un certain nombre de classes d'occupation du sol relevées tous les 100 mètres le long du profil E-R. On fait la somme des différents types d'occupations du sol, relevés tous les 100 mètres, et on retient ensuite le type d'occupation du sol majoritaire pour ce profil parmi les quatre types d'occupation du sol pris en compte dans notre étude (urbain très dense, urbain dense, périurbain et rural). On obtient alors le type d'occupation du sol majoritaire pour la liaison E-R.

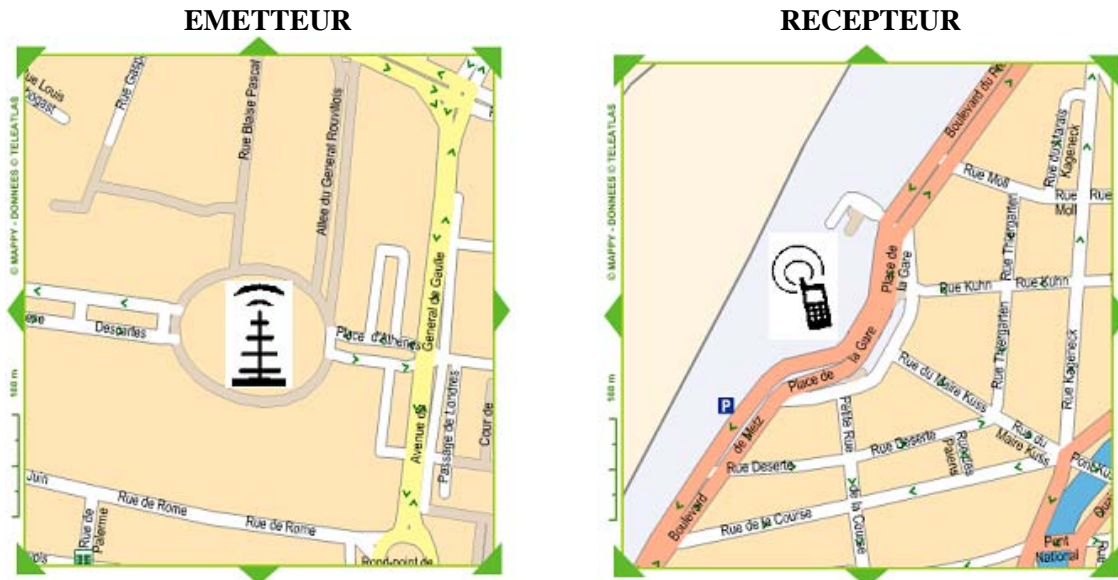


Sources : C.Turck, LIV, Strasbourg, 2002.

Figure 216 : Couverture de champ radio calculée par le modèle de Okumura-Hata sous ArcInfo 8
Strasbourg Centre-ville - Milieu urbain dense

Pour la couverture de champ radio calculée pour la figure 216, l'antenne relais est localisée sur le toit de la faculté d'Histoire (figure 217).

Chaque cercle correspond à une valeur d'affaiblissement du signal radioélectrique. L'affaiblissement du signal radio est calculé par le modèle de Okumura-Hata, pour Strasbourg centre, à une fréquence d'émission de 900 mégahertz. L'affaiblissement calculé (ASYS) est compris entre 31 décibels et 139 décibels.



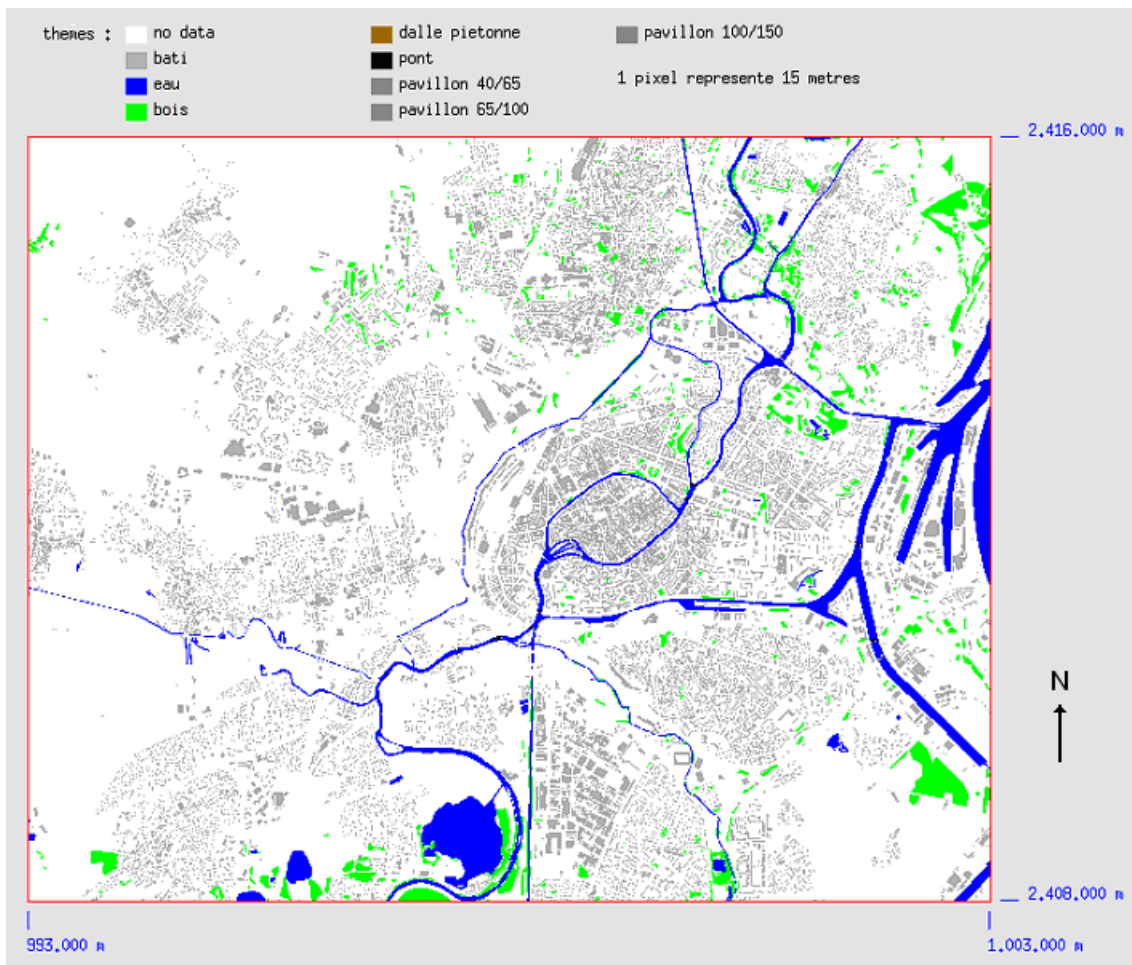
Sources : C. TURCK, LIV, 2003
Logiciel : Mappy, Données géo : TéléAtlas

Figure 217 : Profil : Localisation de l'Émetteur et du Récepteur
Campagne de mesure COST-CNET2 Trajet IMPG _ Strasbourg 1997

Pour chaque profil, on a une valeur d'affaiblissement radio mesurée au niveau du récepteur (figure 216). En croisant les résultats grâce au SIG (affaiblissement mesuré et type d'occupation du sol majoritaire le long du profil), on obtient alors une classification de l'affaiblissement radio mesuré selon le type d'occupation du sol majoritaire. Afin de voir s'il y a réellement un lien entre l'affaiblissement mesuré et le type d'occupation du sol, nous avons effectué des calculs statistiques : les corrélations entre l'affaiblissement radio mesuré sur le terrain et le type d'occupation du sol majoritaire donnent des valeurs comprises entre 0,8 et 0,95. Il existe donc bien un lien entre le type d'occupation du sol et l'affaiblissement radioélectrique mesuré. La méthode d'affectation d'un type d'occupation du sol à l'affaiblissement radio mesuré est donc valide. La validité de l'affectation a d'abord été évaluée sur quelques échantillons test, avant d'être généralisée à l'affectation sur l'ensemble d'une liaison radio E-R.

Présentation de la zone d'étude

La zone géographique utilisée pour l'établissement des classes radio dépendantes et l'optimisation du modèle de Okumura-Hata correspond à la Communauté Urbaine de Strasbourg (figure 218). La CUS comprend la ville de Strasbourg ainsi que 26 communes périphériques. Certaines communes font partie des faubourgs de la ville, alors que d'autres sont situées en zones rurales. Quatre types d'occupation du sol sont présents dans la CUS : le milieu urbain très dense (Strasbourg centre-ville), le milieu urbain dense, le milieu périurbain et le milieu rural.



Sources : C.Turck, Laboratoire Image et Ville, 2002.

Figure 218 : Visualisation de la zone d'étude : la Communauté Urbaine de Strasbourg

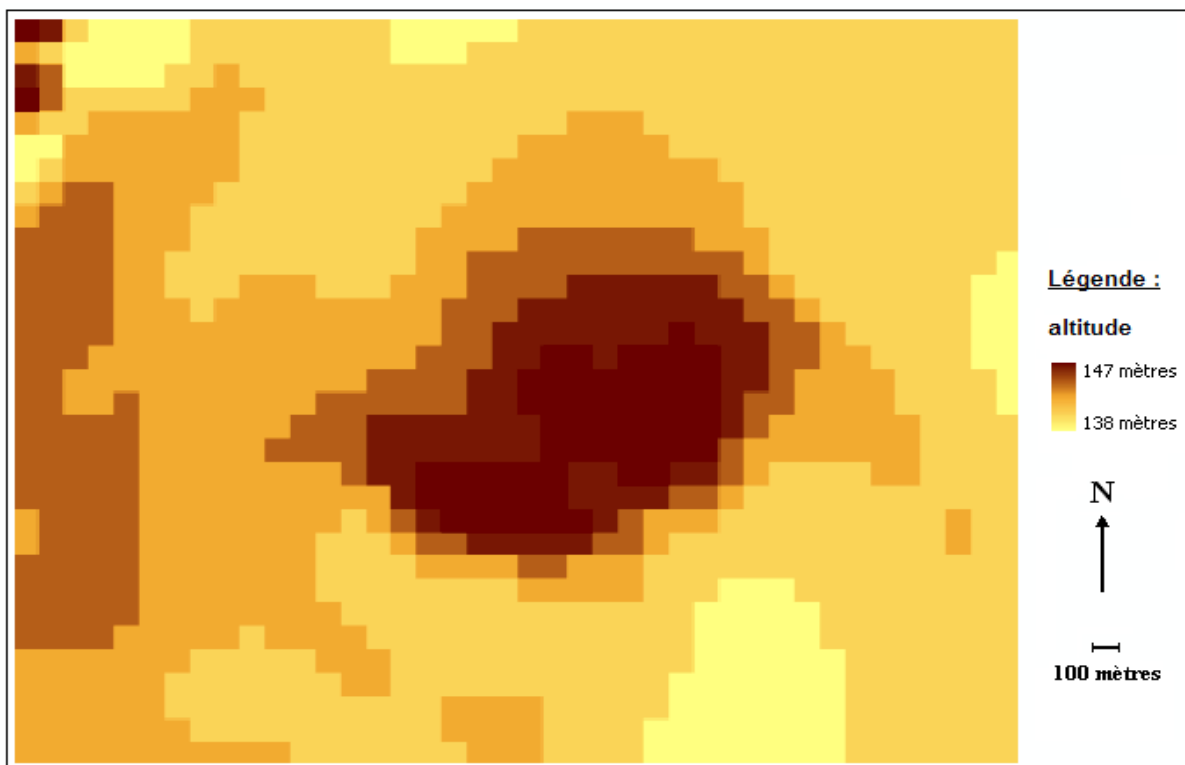
4.1.1.6 - Présentation des résultats obtenus pour chaque classe d'occupation du sol radio dépendante

Du fait de l'importance des variables géographiques pour valider les résultats de calculs des coefficients de correction, une expérimentation s'est faite sur Strasbourg. L'analyse empirique, statistique, s'est faite par classe de distance émetteur-récepteur tous les 100 mètres. La fréquence d'émission de l'antenne relais est de 900 MHz.

Les résultats seront détaillés pour chacune des quatre classes d'occupation du sol prises en compte dans l'analyse.

Les parcours de mesures, sur Strasbourg et la Communauté Urbaine de Strasbourg (CUS), ayant participé à l'étude sont d'abord présentés. Puis le scénario de propagation radio est détaillé. Par scénario de propagation, on entend le contexte dans lequel la mesure d'affaiblissement a été réalisée : la répartition du nombre de points de mesures par classe de distance E-R, la fréquence émettrice, etc.

L'altitude du sol dans la CUS variant très peu (figure 219), la variation de l'altitude, et donc par conséquence la variation de la hauteur entre l'émetteur-récepteur (l'antenne émettrice est fixe, et le mobile est localisé au niveau du sol) sont insignifiantes pour cette étude sur Strasbourg. Ces deux paramètres d'altitude n'ont donc pas été pris en compte dans l'analyse statistique. L'altitude est presque constante pour la Communauté Urbaine de Strasbourg, et n'est pas un élément très influant dans l'atténuation du signal radio.



Sources : C.Turck, Laboratoire Image et Ville, Strasbourg, 2003.

Figure 219 : Visualisation d'un modèle numérique de Terrain avec une résolution de 100 mètres.
Zone de Strasbourg Centre-ville.

Nous allons présenter les résultats pour chaque classe d'occupation du sol : analyse des affaiblissements mesurés et des affaiblissements calculés par le modèle de Okumura-Hata sur la zone géographique étudiée.

Les variations de l'affaiblissement mesuré (AMES : affaiblissement radio mesuré sur le terrain) et de l'affaiblissement calculé (ASYS : affaiblissement radio calculé par le modèle) par le modèle de Okumura-Hata, sont tracées par classe de distance émetteur-récepteur sous forme de graphiques (figures 222, 228, 234, 240). Les performances du modèle sont ensuite proposées en terme d'erreur moyenne et de l'écart-type de l'erreur par classe de distance. Finalement, un tableau récapitule les principaux éléments de l'étude à retenir par classe de distance E-R :

- Le nombre de points de mesures par classe de distances E-R,
- L'affaiblissement moyen mesuré sur le terrain,
- L'affaiblissement médian prédit par le modèle,
- Les performances du modèle de Okumura-Hata en erreur moyenne et écart-type,
- L'écart-type de la mesure de l'affaiblissement sur le terrain.

4.1.1.6.1 - Modélisation en milieu Urbain Très Dense (Centre-ville)

Présentation de la zone d'étude :

La zone d'étude prise en compte pour ce type de milieu géographique correspond à Strasbourg Centre-ville (figure 220) : le tissu urbain est très dense, avec un réseau étroit de petites parcelles, le réseau routier est fin. Les parcours de mesures (en rouge) ont été effectués à l'aide d'une voiture de mesure équipée d'une antenne de réception et d'un ordinateur portable pour l'enregistrement des mesures collectées. Les mesures de champ radioélectriques ont été faites uniquement sur des parcours routiers, donc le long de places et d'axes de rues.

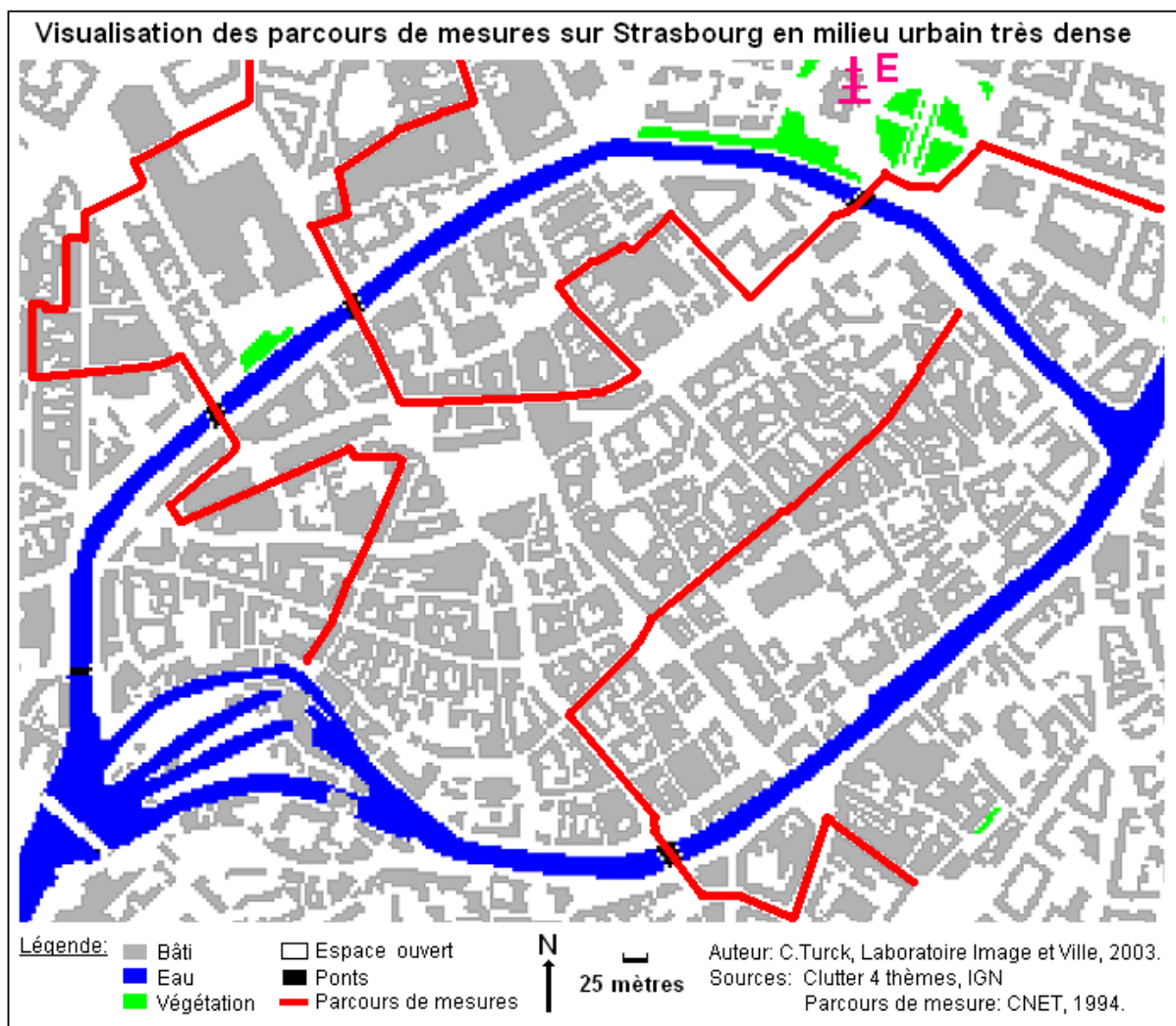
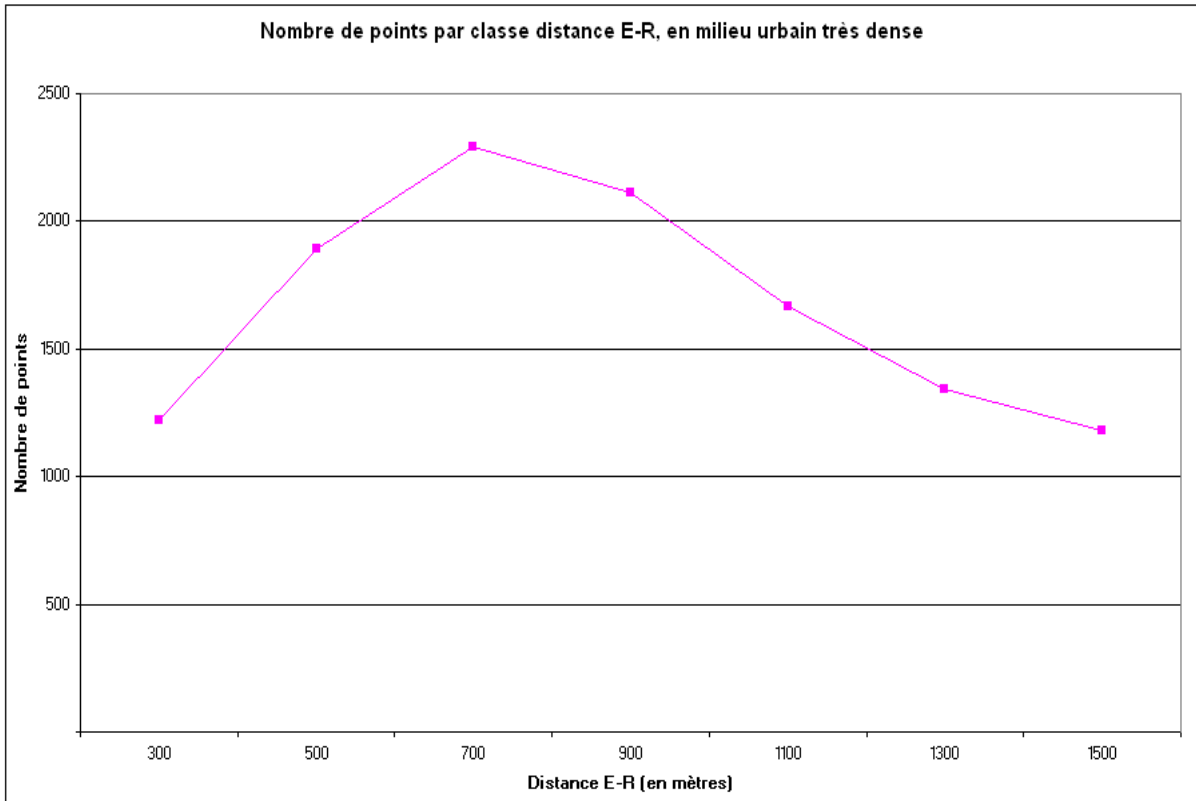


Figure 220 : Visualisation des parcours de mesure en milieu urbain très dense – Strasbourg Centre-ville

L'étude a porté sur les 1500 premiers mètres de la liaison radio E-R. La figure 221 présente la répartition des points de mesures pris en compte pour les calculs d'affectation des classes d'occupation radio dépendantes et des coefficients de correction du modèle de propagation, selon la distance entre l'émetteur et le récepteur.

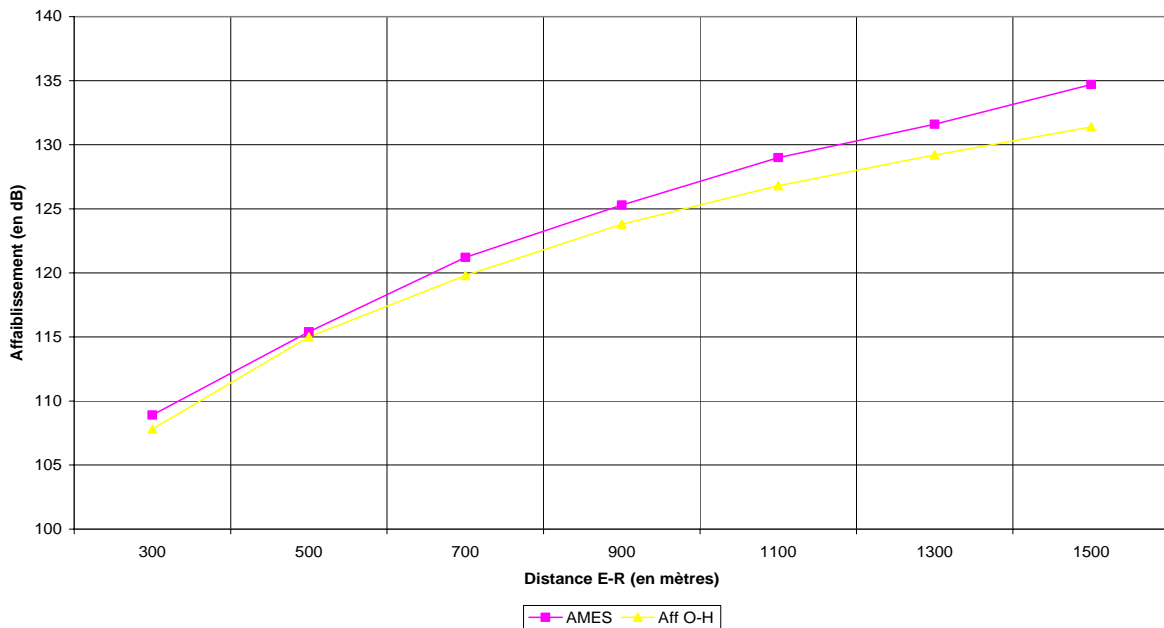


Sources : C.Turck, FTR&D, 2002.

Figure 221 : Nombre de points de mesures pris en compte en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur

La figure 222 présente l'évolution simultanée de l'affaiblissement prédit par le modèle de Okumura-Hata (Aff O-H) et de l'affaiblissement mesuré sur le terrain (AMES). Nous remarquons que les deux courbes suivent la même tendance, ce qui reflète une cohérence entre les valeurs calculées par le modèle et les valeurs mesurées sur le terrain.

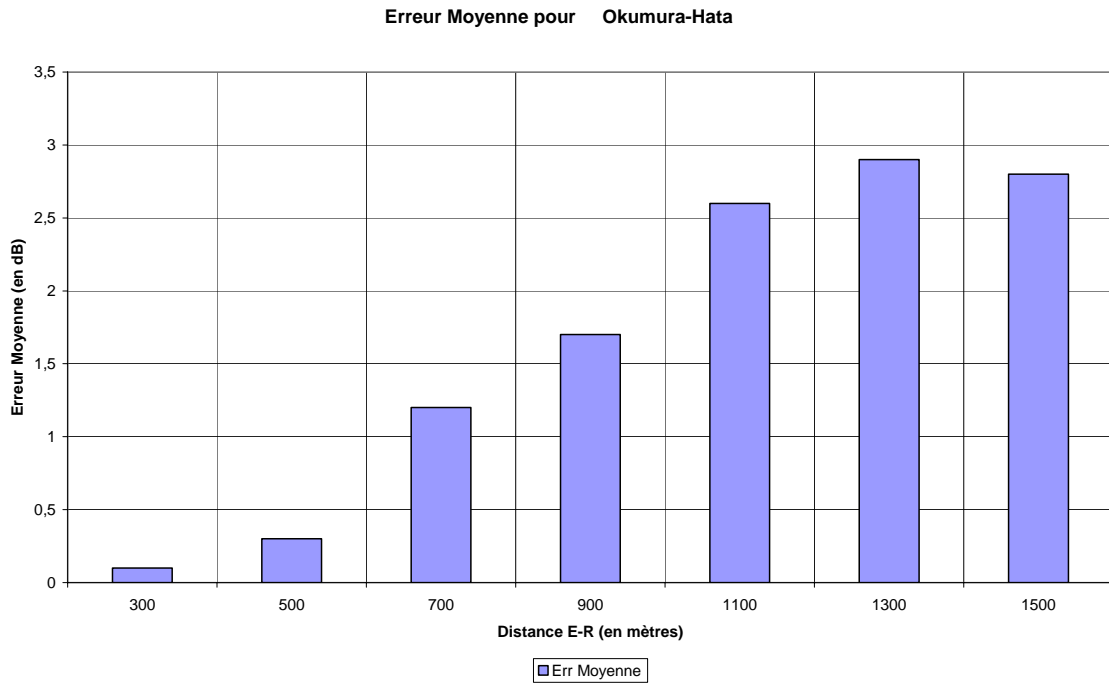
Comparaison AMES avec Aff prédit par Okumura-Hata



Sources : C.Turck, FTR&D, 2002.

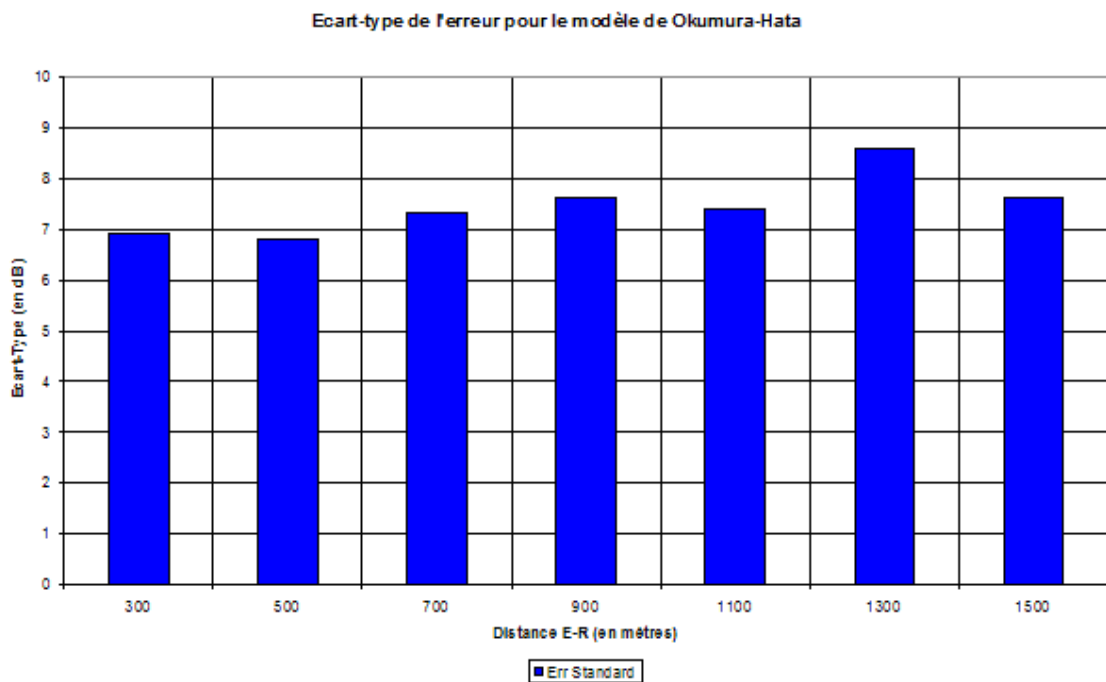
Figure 222 : Evolution de l'affaiblissement mesuré (AMES) et de l'affaiblissement prédit par le modèle de Okumura-Hata (Aff O-H) en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur

Les figures 223 et 224 présentent les performances du modèle de propagation en fonction de la distance. Les performances du modèle sont évaluées grâce à l'erreur moyenne et à l'écart-type de l'affaiblissement radio. On constate que l'erreur moyenne est faible à proximité de l'émetteur et croit de plus en plus quand on s'en éloigne. Le modèle est de Hata donc plus performant sur les 1000 premiers mètres.



Sources : C.Turck, FTR&D, 2002.

Figure 223 : Variation de l'erreur moyenne entre l'affaiblissement radio calculé par le modèle de Okumura-Hata par rapport à l'affaiblissement mesuré sur le terrain



Sources : C.Turck, FTR&D, 2002.

Figure 224 : Variation de l'écart-type de l'erreur entre l'affaiblissement radio calculé par le modèle de Okumura-Hata par rapport aux mesures d'affaiblissement collectées sur le terrain

Distance (en mètres)	Erreur moyenne (en décibels)	Ecart-type (en décibels)
300	0,2	7
500	0,35	6,9
700	1,65	7,2
900	1,85	7,5
1100	2,55	7,2
1300	2,95	8,55
1500	2,90	7,55
	1,5	7,5

Sources : C.Turck, FTR&D, 2002.

Figure 225 : Tableau récapitulatif des résultats des performances du modèle de Okumura-Hata en milieu urbain très dense (Strasbourg Centre-ville)

La figure 225 récapitule les performances du modèle de Okumura-Hata en milieu urbain très dense.

L'erreur moyenne globale obtenue pour l'ensemble des calculs en milieu urbain très dense, est de 1,5 décibels, ce qui est peu. L'écart-type global entre loi empirique et mesure est de 7,5 décibels.

Afin d'améliorer encore la qualité de la prédiction du modèle en milieu urbain très dense, l'équation de calcul de l'affaiblissement radioélectrique par le modèle de Hata sera affectée d'un coefficient de correction de 1,5 décibels (qui correspond à l'erreur moyenne globale).

Du point de vue ingénierie radiomobile, ce que l'on peut en retenir, c'est que l'on constate un très bon accord entre loi empirique et mesure pour le milieu urbain très dense sur Strasbourg.

Du point de vue géographique, ce que l'on peut en retenir, c'est que l'on constate une bonne adéquation entre type d'occupation du sol et type de comportement radioélectrique : en présence d'un tissu urbain très dense du type immeubles d'habitation hauts et campus universitaire l'affaiblissement est très important, alors que pour le tissu urbain très dense du type faubourgs anciens et vieille ville (maisons à colombages) l'atténuation du signal radio est plus faible.

4.1.1.6.2 - Modélisation en milieu Urbain Dense

Présentation de la zone d'étude :

La zone d'étude prise en compte pour l'affectation des classes d'occupation du sol radio dépendantes en milieu urbain dense, correspond à la zone géographique représentée sur la figure 226. Elle correspond au tissu de l'agglomération strasbourgeoise : tissu composé d'un noyau ancien, ainsi que de zones de développements pavillonnaires.

Ce type d'occupation du sol se rencontre typiquement dans les faubourgs des centres urbains des grandes villes comme c'est le cas à Strasbourg, ou dans les villes de taille moyenne comme Colmar.

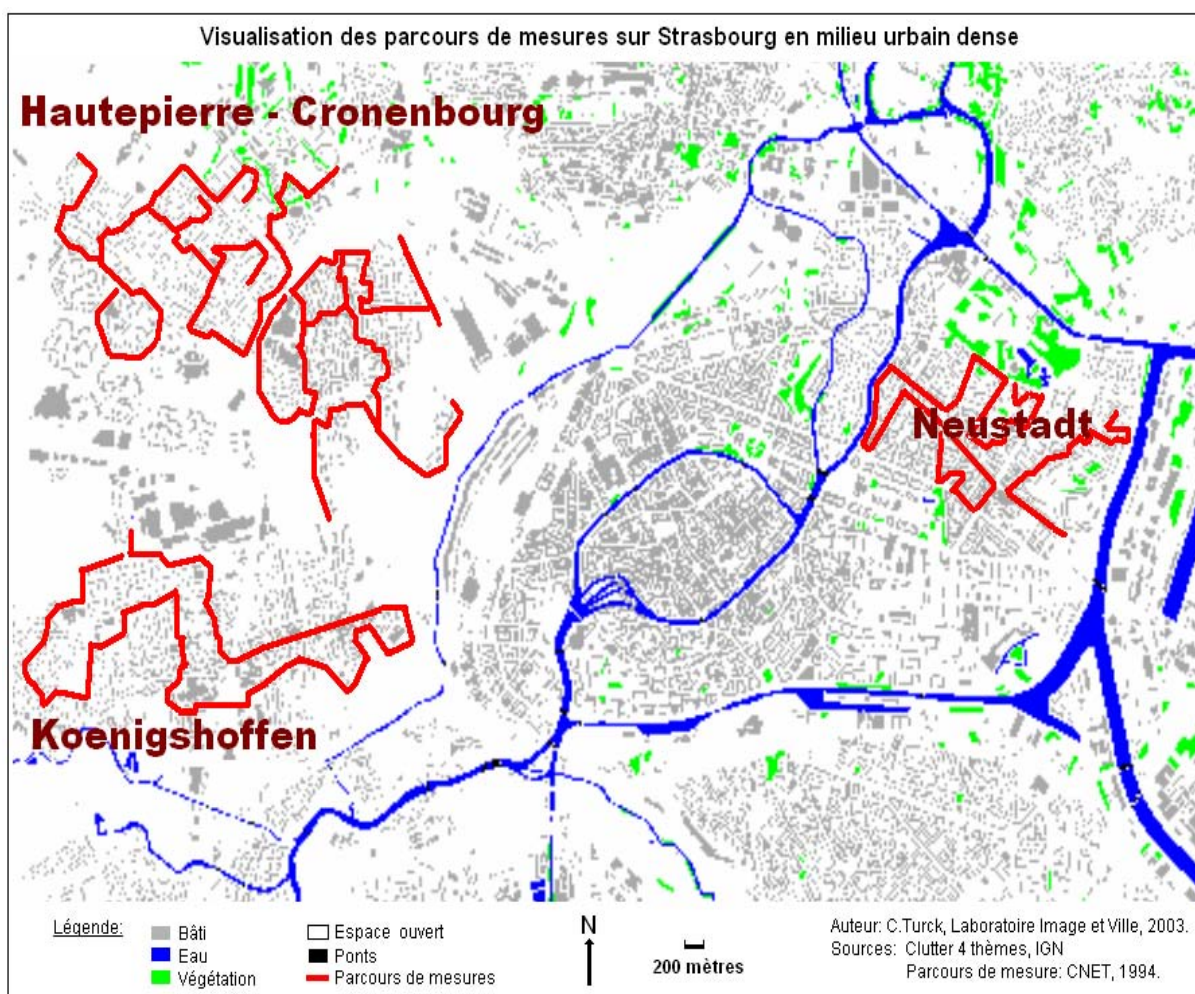
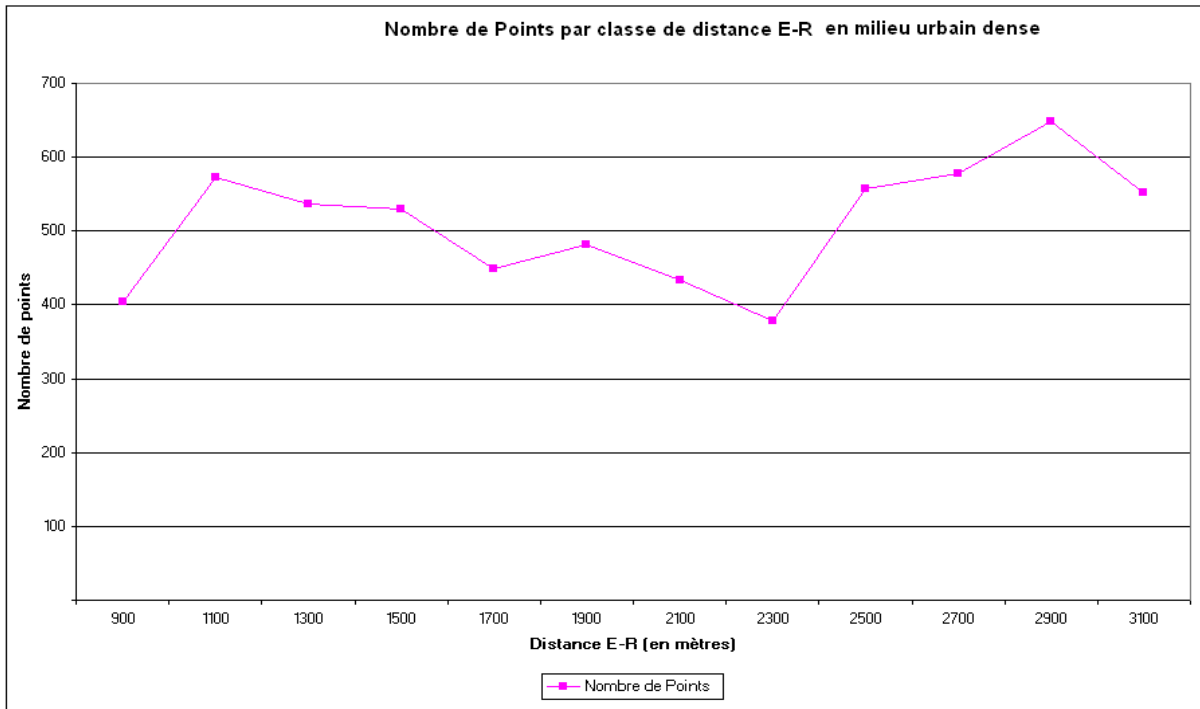


Figure 226 : Visualisation des parcours de mesure en milieu urbain dense – Agglomération de Strasbourg

L'étude a porté sur les 3500 premiers mètres de la liaison radio E-R. La figure 227 présente la répartition des points de mesures pris en compte pour les calculs d'affectation des classes d'occupation radio dépendantes et des coefficients de correction du modèle de propagation, selon la distance entre l'émetteur et le récepteur.

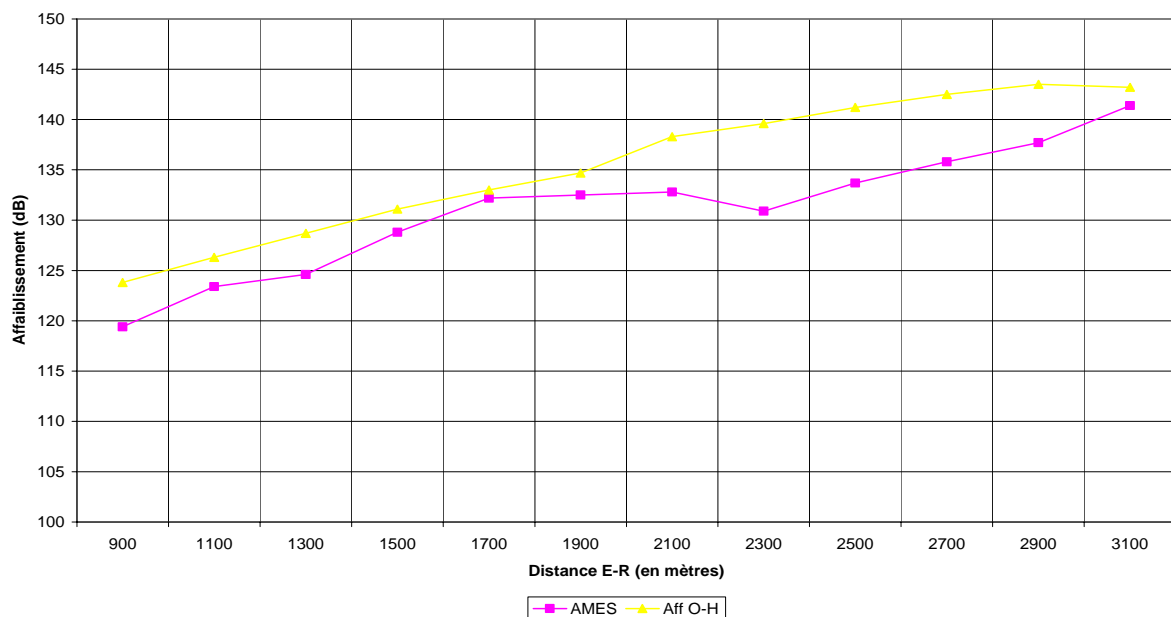


Sources : C.Turck, FTR&D, 2002.

Figure 227 : Nombre de points de mesures pris en compte en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur

La figure 228 présente l'évolution simultanée de l'affaiblissement prédit par le modèle de Okumura-Hata et de l'affaiblissement mesuré sur le terrain. Nous remarquons que les deux courbes ne suivent pas toujours la même tendance, ce qui reflète un écart de cohérence entre les valeurs calculées par le modèle et les valeurs mesurées sur le terrain. Nous constatons que le modèle de Hata est plus pessimiste en milieu urbain dense, il surestime l'affaiblissement subi par les ondes radio en milieu urbain dense par rapport à la réalité.

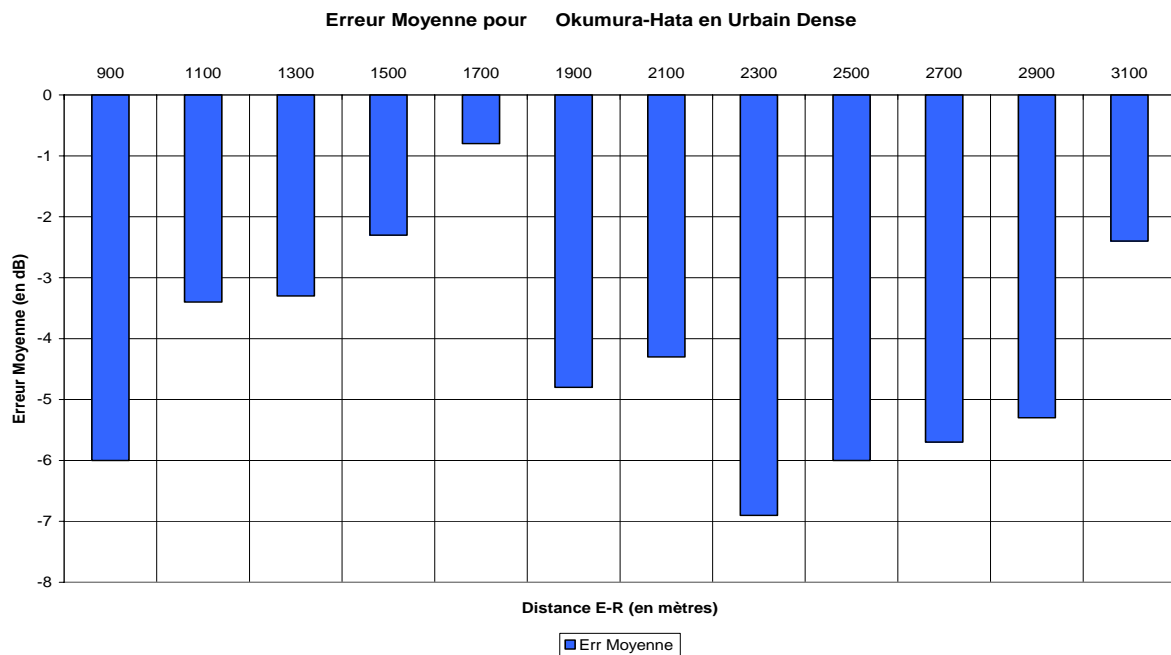
Comparaison AMES avec Aff prédit par Okumura-Hata



Sources : C.Turck, FTR&D, 2002.

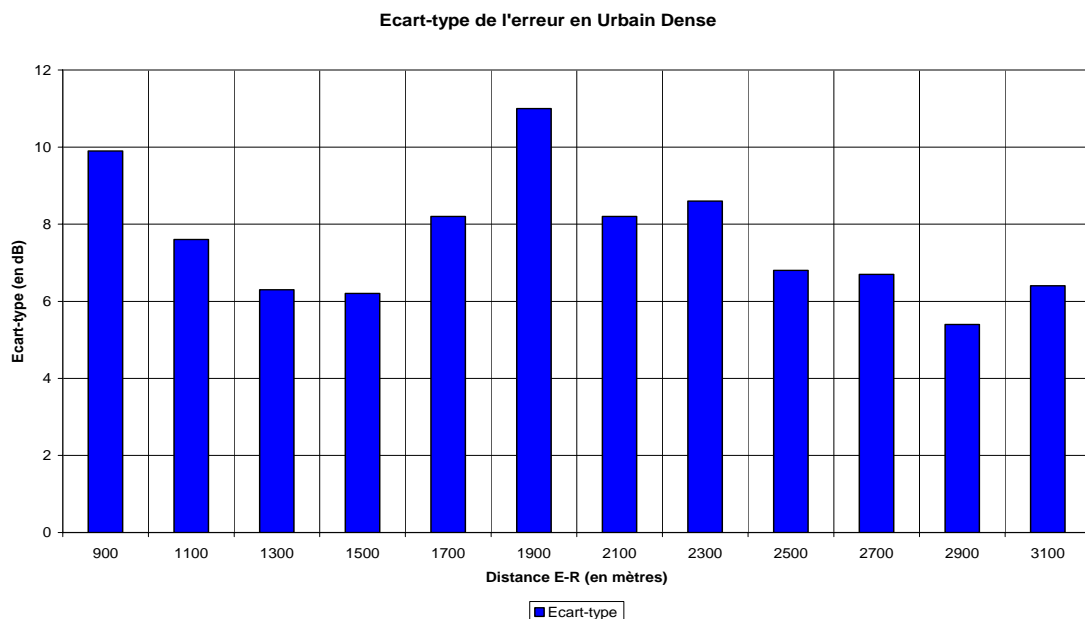
Figure 228 : Evolution de l'affaiblissement mesuré (AMES) et de l'affaiblissement prédit par le modèle de Okumura-Hata (Aff O-H) en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur

Les figures 229 et 230 présentent les performances du modèle de propagation en fonction de la distance E-R. Les performances du modèle sont évaluées grâce à l'erreur moyenne (qui permet d'évaluer la dépendance de l'affaiblissement en fonction de la distance émetteur-récepteur), et de l'écart-type (qui permet d'expliquer la dispersion de la mesure de l'affaiblissement radio). On constate que l'erreur moyenne est comprise entre -6,9 et -0,9 décibels en milieu urbain dense. L'erreur moyenne est minimale à mi-parcours (1700 mètres) mais augmente à nouveau rapidement (200 mètres plus loin), elle est maximale à 2300 mètres. Globalement, l'erreur moyenne est correcte, avec une valeur globale de -4 décibels.



Sources : C.Turck, FTR&D, 2002.

Figure 229 : Variation de l'erreur moyenne de l'affaiblissement radio calculé par le modèle de Okumura-Hata par rapport aux mesures d'affaiblissement collectées sur le terrain



Sources : C.Turck, FTR&D, 2002.

Figure 230 : Variation de l'écart-type de l'erreur pour l'affaiblissement radio calculé par le modèle de Okumura-Hata par rapport aux mesures d'affaiblissement collectées sur le terrain

Distance (en mètres)	Erreur moyenne (en décibels)	Ecart-type (en décibels)
900	-6	10
1300	-3,5	6,3
1700	-0,9	8,1
2100	-4,3	8,1
2500	-6	7
2900	-5,3	5,5
3100	-2,5	6,3
	-4	8

Sources : C.Turck, FTR&D, 2002.

Figure 231 : Tableau récapitulatif des résultats des performances du modèle de Okumura-Hata en milieu urbain dense (faubourgs de Strasbourg)

La figure 231 récapitule les performances du modèle de Okumura-Hata en milieu urbain dense.

On constate un accord raisonnable entre loi empirique et mesure en milieu urbain dense pour l'agglomération de Strasbourg.

L'erreur moyenne globale obtenue pour l'ensemble des calculs en milieu urbain dense est de 4 décibels, ce qui représente une valeur correcte. L'écart-type global entre loi empirique (Hata) et mesure est de 8 décibels.

Afin d'améliorer la qualité de la prédiction du modèle en milieu urbain dense, l'équation de calcul de l'affaiblissement radioélectrique par le modèle de Okumura-Hata sera affectée d'un coefficient de correction de - 4 décibels.

L'adjonction du coefficient de correction pour le milieu urbain dense (-4 db) dans l'équation de calcul de l'affaiblissement par le modèle, permettra ainsi d'améliorer encore les performances du modèle de Hata en milieu urbain dense.

4.1.1.6.3 - Modélisation en milieu périurbain

Présentation de la zone d'étude :

La zone d'étude prise en compte pour l'affectation des classes d'occupation du sol radio dépendantes en milieu périurbain et la mise au point des coefficients de correction de l'équation de calcul de l'affaiblissement radio de Okumura-Hata pour ce type de milieu géographique, correspond à la zone géographique représentée sur la figure 232, c'est-à-dire la Communauté Urbaine de Strasbourg.

Ce type d'occupation du sol se rencontre typiquement dans les zones de banlieues en périphérie des grandes villes comme c'est le cas pour la Communauté Urbaine de Strasbourg, ou bien dans les villes de taille moyenne comme Belfort.

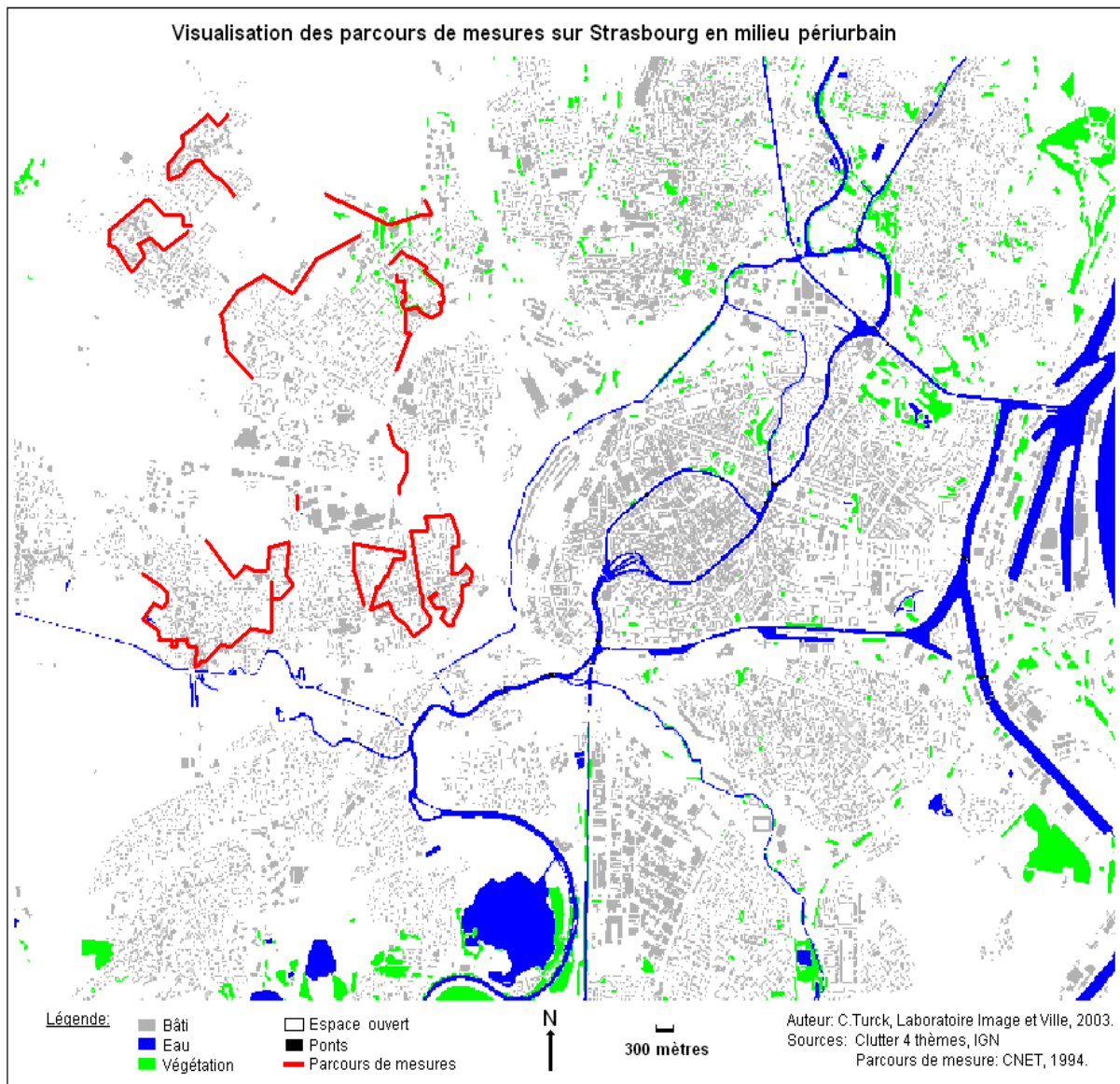
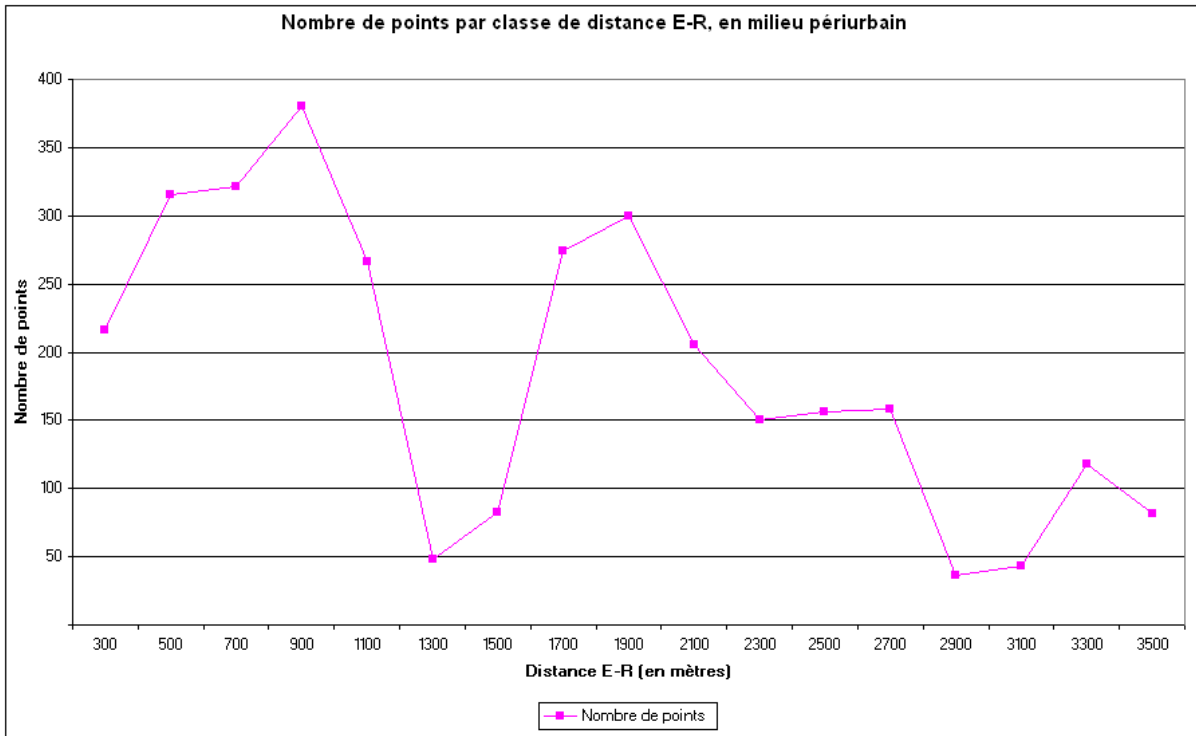


Figure 232 : Visualisation des parcours de mesure en milieu périurbain – Communauté Urbaine de Strasbourg

L'étude a porté sur les 3500 premiers mètres de la liaison radio E-R. La figure 233 présente la répartition géographique des points de mesures pris en compte pour les calculs d'affectation des classes d'occupation radio dépendantes et des coefficients de corrections du modèle de propagation, selon la distance entre l'émetteur et le récepteur.

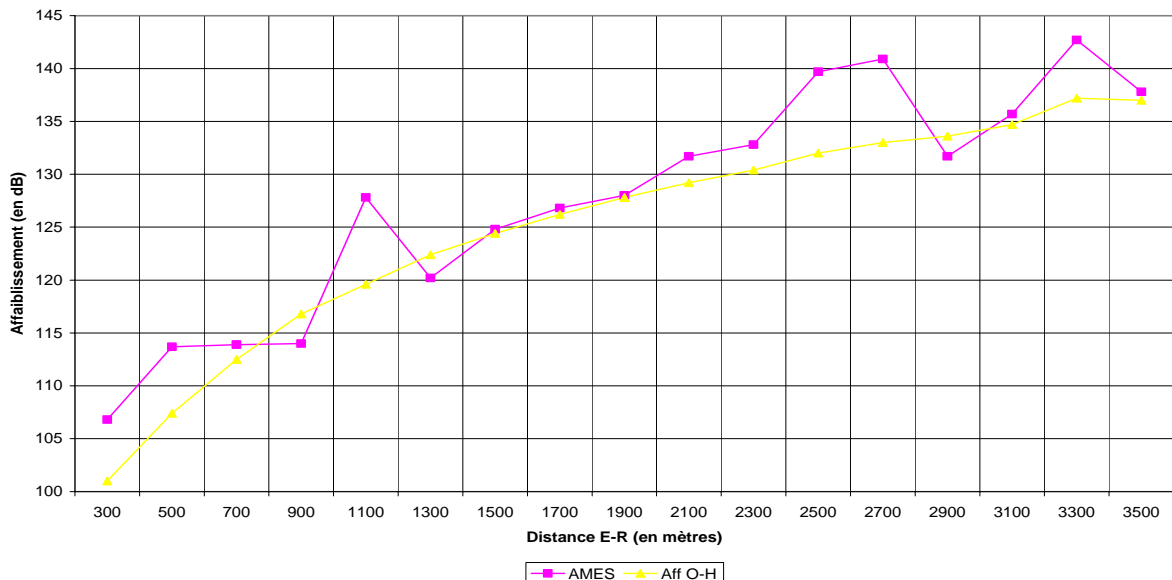


Sources : C.Turck, FTR&D, 2002.

Figure 233 : Nombre de points de mesures pris en compte en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur

La figure 234 présente l'évolution simultanée de l'affaiblissement prédit par le modèle de Okumura-Hata et de l'affaiblissement mesuré sur le terrain. Nous remarquons que les deux courbes ne suivent pas toujours la même tendance, ce qui reflète un écart de cohérence entre les valeurs calculées par le modèle et les valeurs mesurées sur le terrain. Nous constatons que le modèle de Hata est souvent trop optimiste en milieu périurbain, il sous-estime (figure 234) l'affaiblissement subi par les ondes radio en milieu périurbain par rapport à la réalité.

Comparaison AMES avec Aff prédit en milieu périurbain



Sources : C.Turck, FTR&D, 2002.

Figure 234: Evolution de l'affaiblissement mesuré (AMES) et de l'affaiblissement prédit par le modèle de Okumura-Hata (Aff O-H) en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur

Les figures 235 et 236 présentent les performances du modèle de propagation en fonction de la distance. On constate que pour le milieu périurbain, l'erreur moyenne varie fortement selon la distance E-R, elle est comprise entre -3 et +8 décibels. Mais globalement l'erreur moyenne globale pour l'ensemble du milieu périurbain, pris en compte dans cette étude *in situ*, est de +2 décibels, ce qui est une valeur tout à fait correcte.

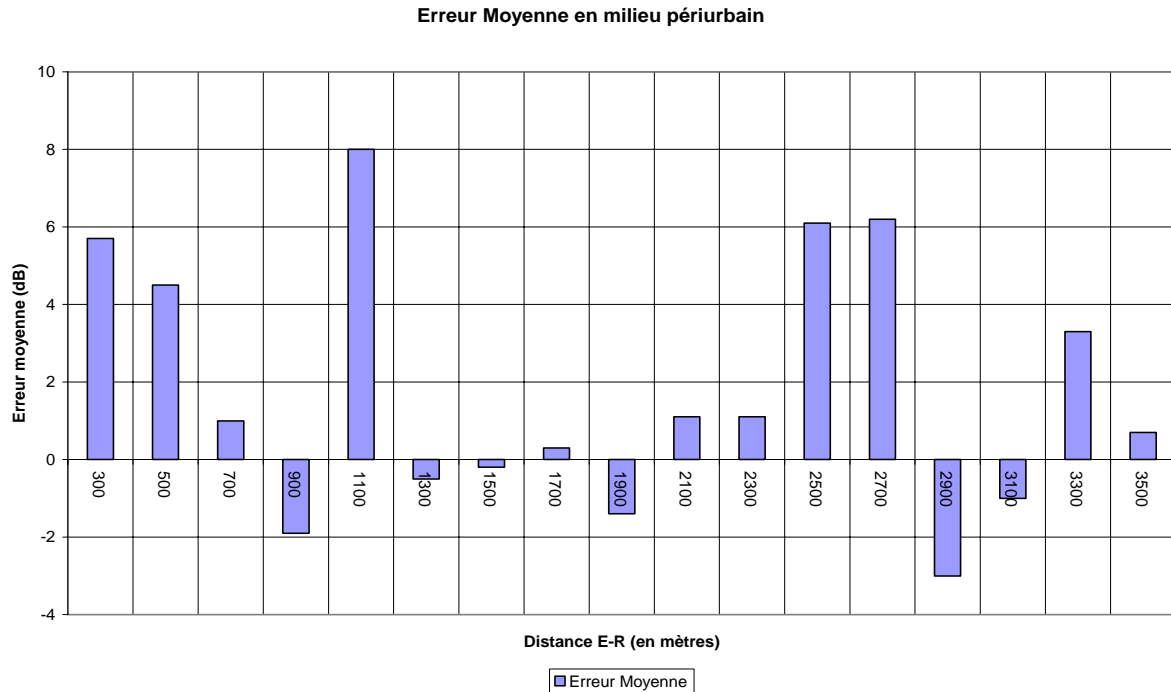


Figure 235 : Variation de l'erreur moyenne de l'affaiblissement radio calculé par le modèle de Okumura-Hata par rapport aux mesures d'affaiblissement collectées sur le terrain

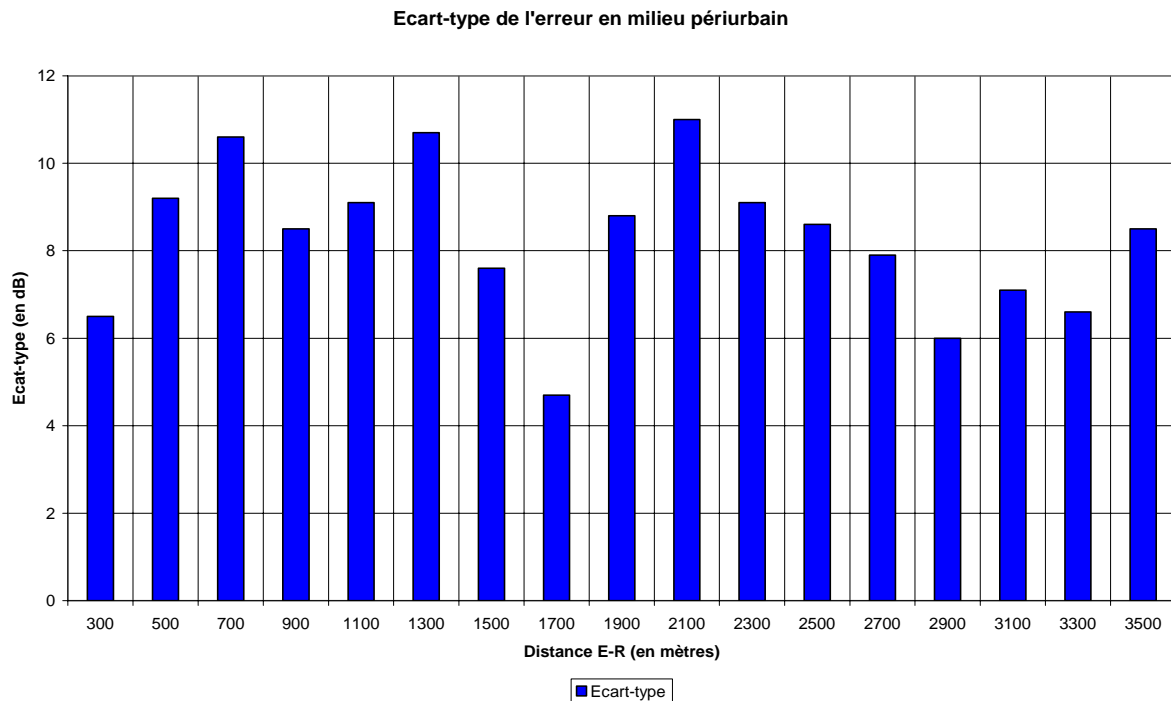


Figure 236 : Variation de l'écart-type de l'erreur pour l'affaiblissement radio calculé par le modèle de Okumura-Hata par rapport aux mesures d'affaiblissement collectées sur le terrain

Distance (en mètres)	Erreur moyenne (en décibels)	Ecart-type (en décibels)
300	5,9	6,4
700	1	10,5
900	-2	8,5
1300	-0,5	10,7
1700	0,2	4,6
2100	1	11,1
2500	6	8,5
2900	-3	6
3300	3,4	6,5
3500	0,8	8,5
	2	9

Sources : C.Turck, FTR&D, 2002.

Figure 237 : Tableau récapitulatif des résultats des performances du modèle de Okumura-Hata en milieu urbain dense (faubourgs de Strasbourg)

La figure 237 récapitule les performances du modèle de Okumura-Hata en milieu périurbain.

L'erreur moyenne globale obtenue pour l'ensemble des calculs en milieu périurbain est de 2 décibels, ce qui est peu. L'écart-type global entre affaiblissements mesurés et affaiblissements calculés est de 9 décibels, ce qui est correct par rapport à la norme de qualité d'un modèle de propagation (écart-type maximal acceptable : 10 dB).

Nous constatons que l'équation de calcul de l'affaiblissement radioélectrique par le modèle doit être affectée d'un coefficient de correction de 2 décibels afin d'améliorer la qualité de la prédiction du modèle en milieu périurbain.

Après analyse des résultats, nous pouvons en conclure qu'il existe un accord raisonnable entre loi empirique (équation de Okumura-Hata) et mesure en milieu périurbain pour l'agglomération de Strasbourg.

4.1.1.6.4 - Modélisation en milieu rural

Présentation de la zone d'étude :

La zone d'étude prise en compte pour l'affectation des classes d'occupation du sol radio dépendantes en milieu rural, correspond à la zone géographique représentée sur la figure 238, c'est-à-dire la Communauté Urbaine de Strasbourg.

Ce type d'occupation du sol se rencontre typiquement dans les zones de banlieues vertes en périphérie des villes comme c'est le cas dans la Communauté Urbaine de Strasbourg, ou bien dans les campagnes.

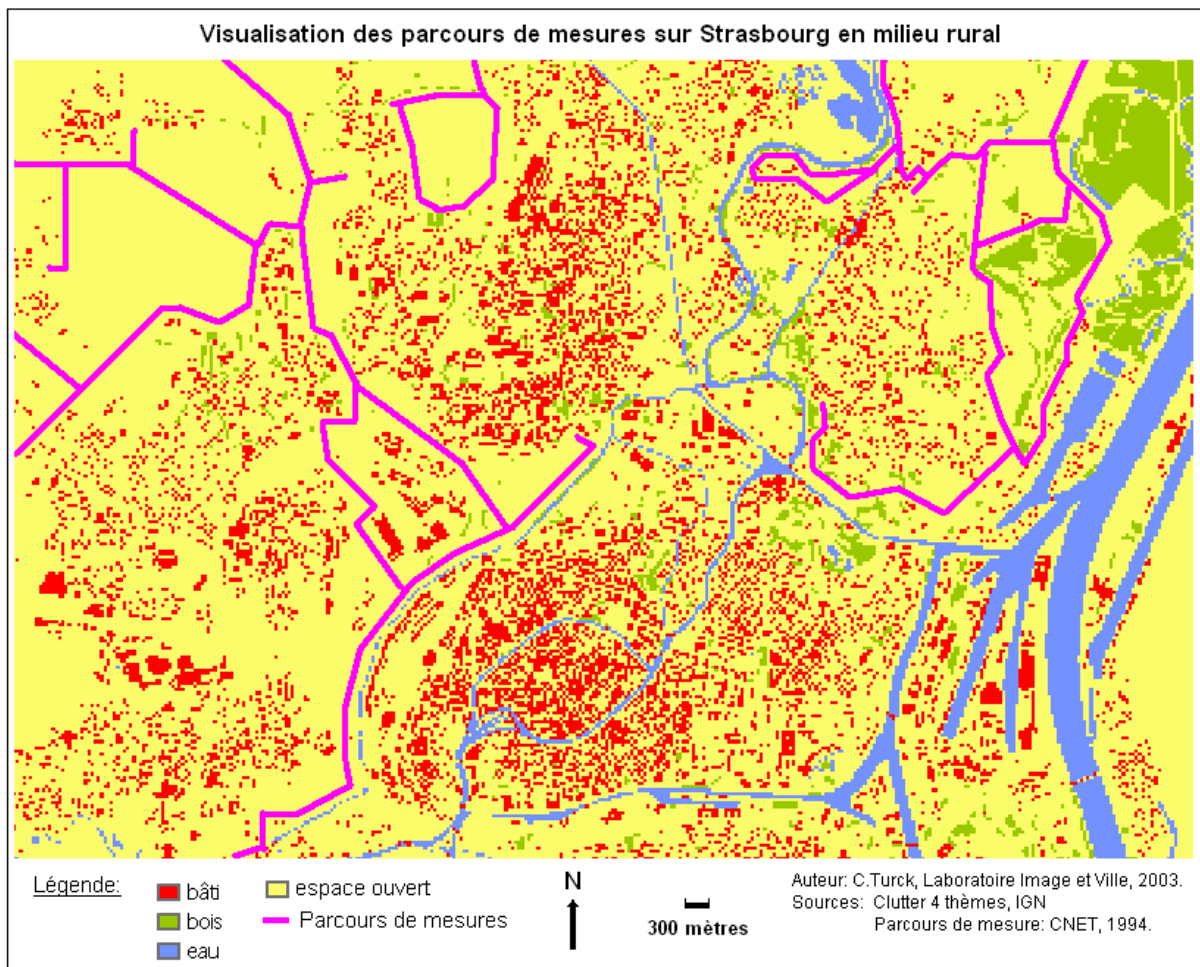
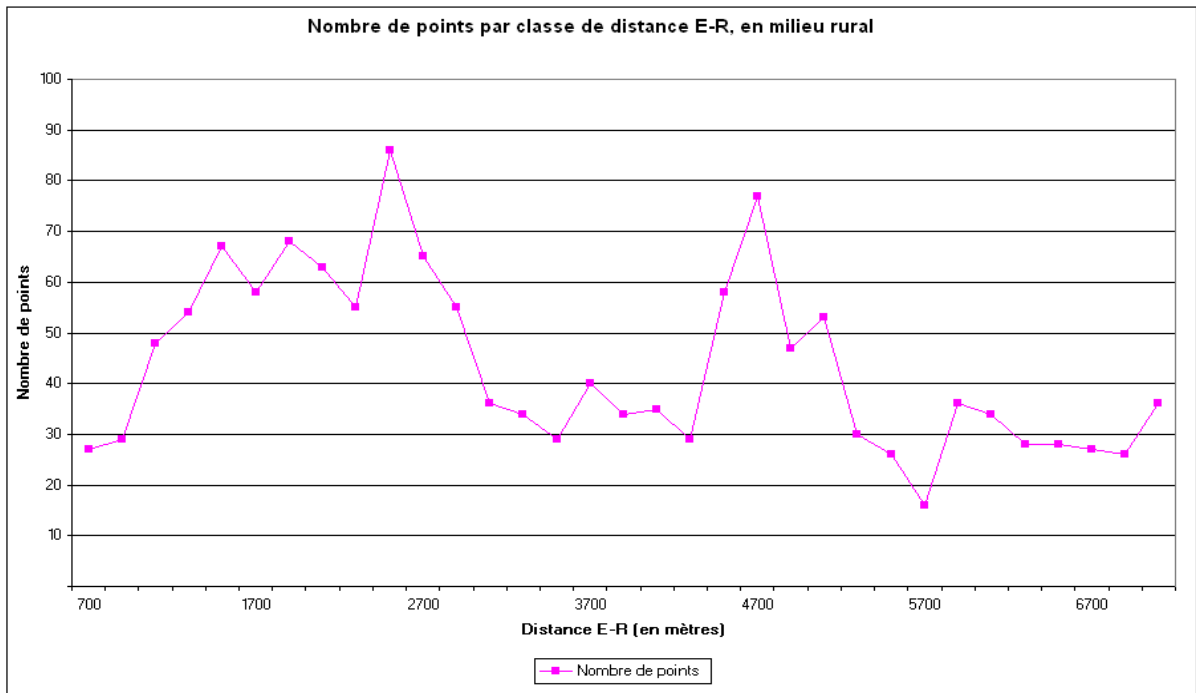


Figure 238 : Visualisation des parcours de mesure en milieu périurbain – Communauté Urbaine de Strasbourg

L'étude a porté sur les 7500 premiers mètres de la liaison radio E-R. La figure 239 présente la répartition des points de mesures pris en compte pour les calculs d'affectation des classes d'occupation radio dépendantes et des coefficients de corrections du modèle de propagation, selon la distance entre l'émetteur et le récepteur.

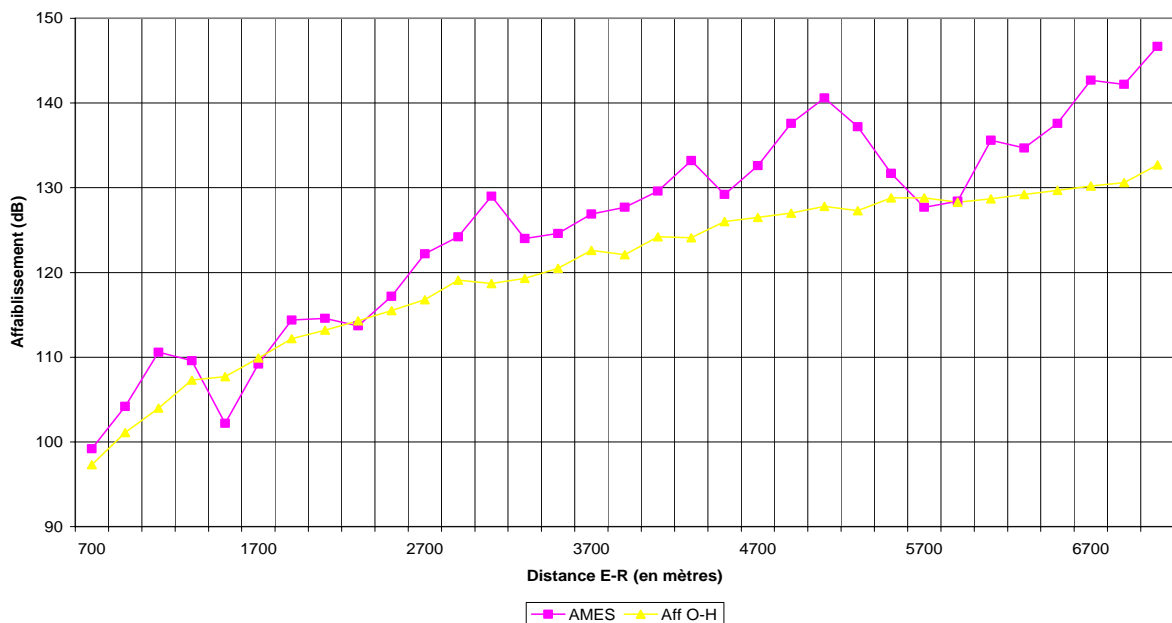


Sources : C.Turck, FTR&D, 2002.

Figure 239 : Nombre de points de mesures pris en compte en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur

La figure 240 présente l'évolution simultanée de l'affaiblissement prédit par le modèle de Okumura-Hata et de l'affaiblissement mesuré sur le terrain. Nous remarquons que les deux courbes ne suivent pas la même tendance, ce qui reflète un écart de cohérence entre les valeurs calculées par le modèle et les valeurs mesurées sur le terrain. Nous constatons que le modèle de Hata est trop optimiste en milieu rural, il sous-estime l'affaiblissement subi par les ondes radio en milieu rural par rapport à la réalité.

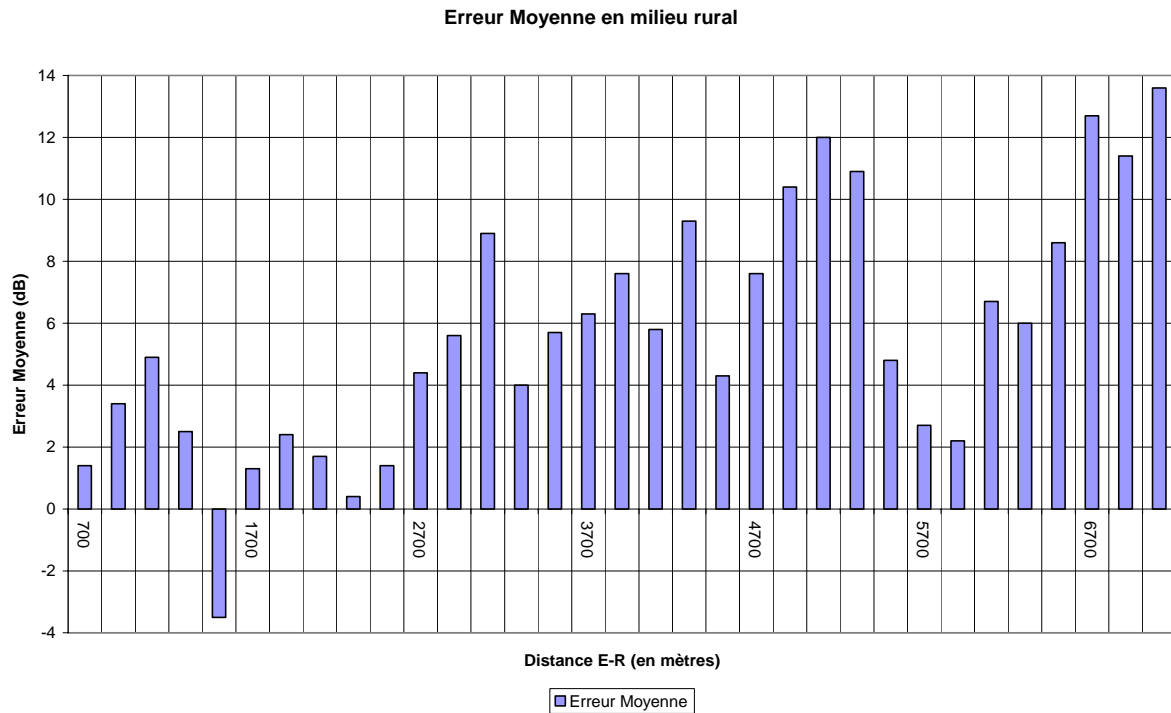
Comparaison AMES et Aff prédit en milieu rural



Sources : C.Turck, FTR&D, 2002.

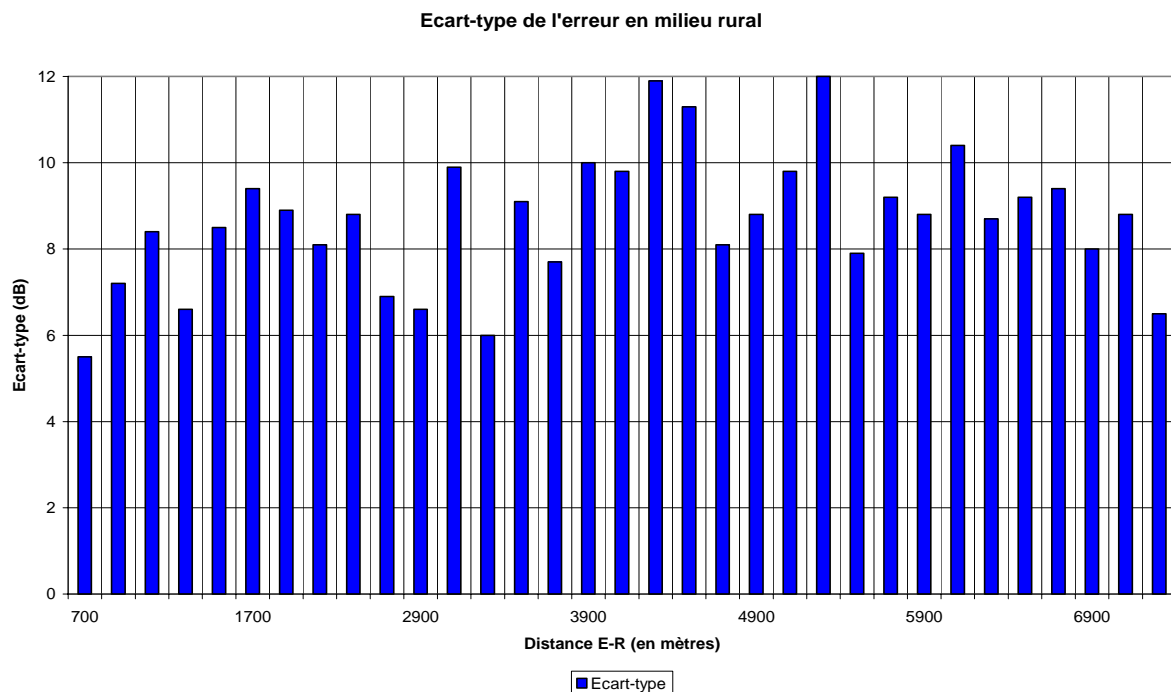
Figure 240 : Evolution de l'affaiblissement mesuré (AMES) et de l'affaiblissement prédit par le modèle de Okumura-Hata (Aff O-H) en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur

Les figures 241 et 242 présentent les performances du modèle de propagation en fonction de la distance. On constate que l'erreur moyenne est comprise entre -3,5 et + 13,5 décibels en milieu rural. Mais globalement l'erreur moyenne est correcte, avec une valeur globale de + 5 décibels.



Sources : C.Turck, FTR&D, 2002.

Figure 241 : Variation de l'erreur moyenne de l'affaiblissement radio calculé par le modèle de Okumura-Hata par rapport aux mesures d'affaiblissement collectées sur le terrain



Sources : C.Turck, FTR&D, 2002.

Figure 242 : Variation de l'écart-type de l'erreur pour l'affaiblissement radio calculé par le modèle de Okumura-Hata par rapport aux mesures d'affaiblissement collectées sur le terrain

Distance (en mètres)	Erreur moyenne (en décibels)	Ecart-type (en décibels)
700	1,7	5,5
1100	5	8,4
1500	-3,5	8,4
1900	2,35	9
2300	0,4	9
2700	4,4	7
3100	9	10
3500	5,8	9
3900	7,8	10
4300	9,2	12
4700	7,8	8
5100	12	9,9
5500	5	8
5900	2,1	8,85
6300	6	8,8
6700	12,7	9,35
7100	13,5	8,9
	5	9,5

Sources : C. Turck, FTR&D, 2002.

Figure 243 : Tableau récapitulatif des résultats des performances du modèle de Okumura-Hata en milieu rural (Communauté Urbaine de Strasbourg)

La figure 243 récapitule les performances du modèle de Okumura-Hata en milieu rural.

L'erreur moyenne globale pour l'ensemble des calculs en milieu rural dans la CUS, est de 5 décibels, ce qui est un résultat correct. L'écart-type global entre affaiblissements mesurés et affaiblissements calculés est de 9,5 décibels, ce qui est également un résultat correct.

Nous en déduisons que l'équation de calcul de l'affaiblissement radioélectrique par le modèle doit être affectée d'un coefficient de correction de 5 décibels afin d'améliorer la qualité de la prédiction du modèle en milieu rural.

Du point de vue ingénierie radiomobile, ce que l'on peut en retenir, c'est que l'on constate un accord raisonnable entre loi empirique et mesure pour le milieu rural dans la Communauté Urbaine de Strasbourg.

4.1.1.7 – Synthèse des résultats : coefficients de correction à ajouter au modèle de Hata selon le milieu géographique et gain en performances

- Ainsi nous obtenus le tableau de valeurs suivantes, à ajouter au modèle :

Type de milieu géographique	Constante à rajouter à l'équation de calcul de l'affaiblissement radio
Urbain dense	1,5
Urbain	- 4
Périurbain	2
Rural	5

Sources : C. Turck, FTR&D, 2002.

Figure 244 : Tableau récapitulatif des coefficients de correction à rajouter à l'équation de calcul de l'affaiblissement radioélectrique pour recentrer le modèle de Okumura-Hata selon le type de milieu géographique

Nous avons dans un premier temps mis au point des méthodes d'optimisation permettant une meilleure prise en compte de l'environnement dans un modèle, en utilisant un modèle simple suite à une demande explicite de France Télécom : le modèle de Okumura-Hata. Nous avons alors implémenté le modèle de Hata sur SIG, évalué la qualité du modèle de propagation pour l'agglomération de Strasbourg selon le type d'occupation du sol, ceci nous a permis d'améliorer le modèle de Hata en recentrant le modèle, grâce à des coefficients de correction, qui dépendent du type de milieu géographique en présence.

- Les performances du modèle de Okumura-Hata avec et sans les optimisations sont les suivantes :

Type de milieu géographique	Ecart-type (en dB) avant optimisation	Ecart-type (en dB) après optimisation
Urbain dense	7,5	6
Urbain	8	4
Périurbain	9	7
Rural	9,5	5,5
Global	8,5	5,6

Sources : C. Turck, FTR&D, 2002.

Figure 245 : Tableau récapitulatif des performances du modèles de Okumura-Hata à 900 Mhz avant et après optimisation par les coefficients de correction.

Pour le modèle de Hata, on obtient un gain en performances de **2,9 décibels** grâce aux coefficients de correction.

- **Généralisation** : Les équations de calcul de l'affaiblissement radioélectrique pour l'agglomération strasbourgeoise, et plus généralement, pour l'espace géographique français, sont les suivantes :

L'étude porte uniquement sur le cas des fréquences pour le système GSM 900 MHz.

Calcul de l'affaiblissement radioélectrique total par le modèle de Okumura-Hata
<p>Equation générale</p> <p>- Si $f < 1500$ MHz</p> $Aff = 69,55 + 26,16 \text{ Log } f - 13,82 \text{ Log } Z_{Hb} + (44,9 - 6,55 \text{ Log } Z_{Hb}) \text{ Log } d_{E-R} - a(Z_{Hm})$ <p style="text-align: center;">(73)</p>
<p>Milieu urbain</p> <p>L'équation de propagation reste la même, seul le paramètre $a(Z_{Hm})$ change :</p> <p>En milieu urbain dense (Strasbourg centre) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pour $400 \text{ MHz} < f < 1500 \text{ MHz}$: $a(Z_{Hm}) = 3,2[\text{Log}(11,75 \cdot Z_{Hm})]^2 - 4,9 + 1,5$ <p style="text-align: right;">(74)</p> <p>En milieu urbain :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pour $400 \text{ MHz} < f < 1500 \text{ MHz}$ $a(Z_{Hm}) = [1,1 \text{ Log } f - 0,7] \cdot Z_{Hm} - [1,56 \text{ Log } f - 0,8] - 4$ <p style="text-align: right;">(75)</p>
<p>Milieu périurbain</p> <p>L'affaiblissement Aff_{su} exprimé en dB est donné en appliquant la formule du milieu urbain affectée d'une correction :</p> $Aff_{su} = Aff - 2[\text{Log}(f/28)]^2 - 5,4 + 2$ <p style="text-align: right;">(76)</p>
<p>Milieu rural</p> <p>- Pour un milieu rural:</p> $Aff_{rqo} = Aff - 4,78[\text{Log}(f)]^2 + 18,33 \text{ Log}(f) - 35,94 + 5$ <p style="text-align: right;">(77)</p>

Figure 246 : Equations générales de calcul de l'affaiblissement radioélectrique par le modèle de propagation de Okumura-Hata optimisé selon le type de milieu géographique présent sur le territoire français.

4.1.1.8 – Conclusions pour le modèle de Hata

Quatre coefficients de correction du modèle de Okumura-Hata ont été créés afin d'adapter le modèle au type d'occupation du sol en France. Un lien a été mis en évidence, de manière empirique, entre l'espace géographique et la propagation des ondes radioélectriques décimétriques (ondes UHF à 900 MHz) à travers cet espace. Ainsi, une meilleure prise en compte de l'environnement, en terme d'occupation du sol, permet d'améliorer la qualité du modèle.

Cependant, afin de généraliser l'utilisation de cette méthode de classification de l'occupation du sol radio dépendante, différents points restent à étudier :

1 - Par rapport à la modélisation de la propagation des ondes radio :

1. La prise en compte de l'altitude du sol (le MNT) dans le calcul de l'affaiblissement,
2. La prise en compte de l'altitude du mobile et de l'émetteur dans le calcul de l'affaiblissement,
3. Le calcul des coefficients de corrections et son application à d'autres milieux géographiques, comme par exemple le milieu boisé, le milieu urbain dense en tenant compte de la hauteur du bâti (MNS), le milieu maritime, le milieu montagneux, l'indoor, etc. Ceci permettrait de mettre au point des coefficients de corrections pour des classes d'occupations du sol plus variées et plus représentatives de la grande variabilité des objets géographiques.

2 - Par rapport à la méthode de classification de l'occupation du sol radio dépendante selon :

1. des fréquences d'émission différentes : 1800 MHz, 400 MHz, etc.
2. des résolutions différentes, à des échelles différentes : 5 mètres, 10 mètres, 50 mètres, etc. Ceci permettrait d'avoir des coefficients de corrections selon l'échelle.
3. d'autres modèles de propagation des ondes radio, comme le modèle COST par exemple. On obtiendrait ainsi de nouveaux coefficients de correction à rajouter dans les équations de calcul de l'affaiblissement pour ces modèles.
4. d'autres zones géographiques, d'autres villes, à différentes échelles. Par exemple, étudier le cas d'une très grande ville (Paris), le cas d'une ville du sud de la France d'architecture différente de celle de Strasbourg (type de bâti, type de matériaux de constructions, etc.), étudier le cas d'une ville de taille moyenne (Saverne par exemple), et le cas d'une petite ville (Rosheim par exemple). On pourra alors comparer les mesures de terrain avec les résultats de calculs de l'affaiblissement par le modèle de Okumura-Hata pour une grande ville, une ville de taille moyenne et une petite ville. Ceci nous permettra d'appliquer notre méthode d'analyse à d'autres types d'espaces urbains, et de généraliser notre démarche scientifique.

4.1.2 – Optimisation et validation d'un autre modèle de propagation d'ondes radio : le modèle COST-LD

Parmi les points soulevés précédemment, la validation parallèlement à un autre modèle s'avérait nécessaire, c'est pourquoi un modèle de propagation plus complexe a été testé.

4.1.2.1 – Introduction

Après avoir testé la méthode d'optimisation d'un modèle de propagation d'ondes radio et la validité des résultats obtenus avec le modèle de Okumura-Hata, nous avons appliqué cette méthode à un modèle de propagation d'ondes plus complexe, qui a été développé par le CNET (le CNET correspond maintenant à FTR&D). Nous avons choisi le modèle COST-LD, qui est un modèle composé de deux parties : LD et COST. Ces deux modèles ont d'abord été développés séparément, puis ont été regroupés dans un même modèle de propagation (COST-LD) dédié à la prédiction de la propagation en milieu urbain et périurbain.

Le Modèle COST-LD est plus réaliste, plus proche de la réalité rencontrée sur le terrain, car il intègre des formes d'urbanisation diverses en un seul modèle.

Le modèle COST-LD est un modèle de propagation développé par le CNET. La partie LD est dédiée au calcul de l'affaiblissement en milieu rural à une échelle macro cellulaire. Pour LD le profil E-R comprend le bois, l'eau, le sol. Les bases de données géographiques utilisées correspondent dans notre cas au MNS à 100 mètres de résolution.

La partie COST est dédiée au calcul de l'affaiblissement radio en milieu urbain dense, urbain et périurbain, à une échelle micro cellulaire. Pour COST, le profil E-R comprend, en plus du bois, le bâti. Les Bases de données géographiques utilisées sont à résolution plus fines : MNT pointé à 25 mètres, BD Topo IGN, etc.

4.1.2.2 – Présentation du modèle de propagation COST-LD

4.1.2.2.1 - Le modèle macro cellulaire CNET-UHF (également appelé modèle LD)

Le modèle CNET-UHF a été développé par le CNET (France Télécom R&D). Il traite de la propagation des ondes radio pour des fréquences de 400, 900 et 1800 MHz. Il est utilisable en milieu rural, en milieu urbain, en milieu maritime.

Le modèle CNET-UHF, également appelé modèle LD (en référence aux données géographiques « Localisées » 100 mètres et « Délocalisées » 400 mètres qui sont utilisées dans le modèle), prend en compte les phénomènes suivants pour le calcul de l'affaiblissement radio total :

- la propagation en espace libre,
- la diffraction sur arêtes multiples (méthode de Deygout),
- l'affaiblissement du au sursol,
- des termes correctifs (affaiblissements supplémentaires) afin de tenir compte de la hauteur effective de l'antenne, du dénivelé, du nombre de points présents dans l'ellipsoïde de Fresnel, etc.

Il s'appuie sur des bases de données géographiques de type maillées pour le sursol (Clutter 4 thèmes, et hauteur de sursol) ainsi que sur un Modèle Numérique de Terrain (100 mètres de résolution).

Pour les données géographiques de sursol le modèle CNET-UHF utilise deux fichiers de données géographiques maillées spécifiques, dans un format propriétaire de France Télécom.

En terme de performances le modèle est centré (valeur moyenne nulle entre affaiblissements mesurés et affaiblissements prédits) et l'écart-type est proche de 7 dB.

- Equation de calcul de l'affaiblissement radio total par le modèle LD :

$$L_{total} = L_0 + L_{msd} + L_{sol} + L_{suppl} + L_{dir}$$

(78)

Avec :

L_{total} : affaiblissement total,

L_0 : affaiblissement d'espace libre,

L_{msd} : affaiblissement de diffraction sur arêtes multiples (méthode de Deygout),

L_{sol} : affaiblissement du au sursol,

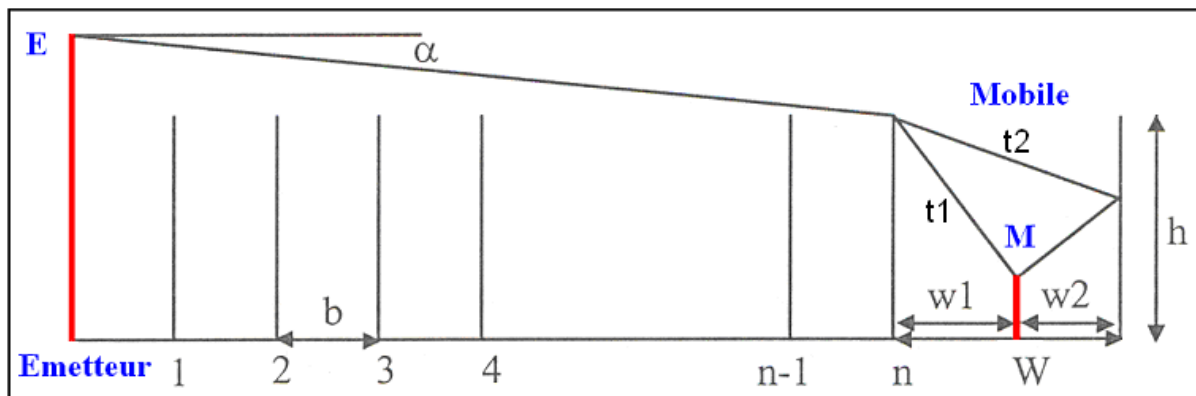
L_{suppl} : affaiblissements supplémentaires, correctifs, afin de tenir compte de la hauteur effective de l'antenne, de la dénivellation, du nombre de points présents dans l'ellipsoïde de Fresnel,

L_{dir} : affaiblissement de directivité 3D de l'antenne émettrice.

4.1.2.2.2 - Le modèle micro cellulaire COST-CNET

L'amélioration des modèles de propagation pour les petites cellules en milieu périurbain et urbain est obtenue par l'intégration du mode profil et de différents algorithmes de diffraction multiple sur une succession d'arêtes.

Le modèle COST-CNET est un modèle semi empirique en 2D qui a été développé pour modéliser le signal radio pour les petites cellules (méso cellules) d'un réseau radiomobile. Il convient plus particulièrement à l'ingénierie du GSM à 900 MHz et du DECT¹⁸⁵ à 1800 MHz, avec une émission de 5 à 15 mètres au-dessus des toits. Il a été élaboré par FTR&D dans le cadre du programme européen COST 231. Il correspond en fait à la synthèse de deux approches célèbres dans la modélisation radio en milieu urbain, celle de Walfisch-Bertoni pour le calcul de la diffraction multiple (WALFISH, 1988), et celle d'Ikegami pour le calcul de la diffraction sur la dernière arête et la réflexion sur la façade de l'immeuble situé en face dans la rue où est localisé le mobile (IKEGAMI, 1984).



Sources : CNET, 1996.

Figure 247 : Profil E-R considéré par le modèle COST-CNET

Avec :

$n = (1, \dots, n-1)$ bâtiments,

h : hauteur des bâtiments,

b : distance entre les bâtiments,

W : largeur de la rue dans laquelle est localisé le mobile,

$w1$: distance entre le mobile et le bâtiment sur lequel l'onde radio est diffractée,

$w2$: distance entre le mobile et le bâtiment sur lequel l'onde radio est réfléchie,

n : arêtes des bâtiments (façades, coins de bâtiment),

$t1$: trajet de l'onde diffractée par la dernière arête au niveau du toit,

$t2$: trajet de l'onde réfléchi sur la façade de l'immeuble opposé,

α : angle formé entre l'horizontale et la direction de propagation de l'onde radio émise depuis l'émetteur,

M : le mobile,

E : l'émetteur.

Le profil considéré comme idéal par le modèle COST-CNET suppose que tous les bâtiments sont de la même hauteur h et sont espacés de la même distance b . Dans la rue où est localisé le mobile, rue de largeur W , on suppose que l'on reçoit le trajet diffracté seul (trajet 1) ainsi que

¹⁸⁵ DECT: *Digital European Cordless Telephone*. Norme européenne de téléphone sans fil, sur la bande 1880-1900 MHz. Numérique et utilisant la compression, elle est de meilleure qualité que les systèmes analogiques précédents, et assure en plus la confidentialité des communications car les canaux ne se recouvrent plus.

la composante réfléchi sur la façade de l'immeuble opposé (trajet 2). Les formules de calcul permettent alors de calculer l'affaiblissement total de la liaison qui est en fait la somme de 3 composantes :

$$L_{total} = L_0 + L_{msd} + L_{rts} + L_{deg} \quad (79)$$

Avec:

L_{total} : affaiblissement total,

L_0 : affaiblissement d'espace libre,

L_{msd} : affaiblissement de diffraction multiple sur les n-1 arêtes,

L_{rts} : affaiblissement dans la rue du mobile (superposition du trajet 1 et du trajet 2),

L_{deg} : affaiblissement lié à la diffraction sur l'arête principale.

Le problème principal du modèle COST-CNET est bien entendu de savoir comment passer d'un environnement réel (le profil réel), tel qu'il est extrait des bases de données géographiques vectorielles (contours de bases des bâtiments : BD Topo© de l'IGN) et d'un MNT au pas de 25 mètres, au profil idéalisé (figure 249) d'où sont extraits les paramètres nécessaires pour le calcul de l'affaiblissement radioélectrique par le modèle COST-CNET. De ce profil théorique sont alors extraites les variables morphologiques (largeur moyenne des rues, largeur de la rue où se trouve le mobile, hauteur des bâtiments, etc.) mais aussi des variables qualitatives (récepteur en visibilité ou non de l'émetteur, présence de végétation, zone de bâti dense, zone pavillonnaire, etc.) caractéristiques du milieu géographique en présence.

De plus, le domaine de validité de ce modèle est très strict et il doit être également corrigé à partir des mesures par régression linéaire sur un certain nombre de variables pour améliorer la prédiction. Afin d'adapter le modèle à des configurations réelles et améliorer ses performances, il est en fait construit de manière semi statistique, l'affaiblissement total prédit par le modèle COST-CNET s'exprimant alors sous la forme mathématique suivante :

Equation de calcul de l'affaiblissement radio total par le modèle COST :

$$L_{total} = L_0 + \alpha L_{msd} + \beta L_{rts} + \gamma L_{deg} + \sum c_i P_i \quad (80)$$

Avec :

L_{total} : affaiblissement total,

L_0 : affaiblissement d'espace libre,

L_{msd} : affaiblissement de diffraction multiple sur les n-1 arêtes,

L_{rts} : affaiblissement dans la rue du mobile (superposition du trajet 1 et du trajet 2),

L_{deg} : affaiblissement lié à la diffraction sur l'arête principale,

P_i : variables géométriques utilisées,

$\alpha, \beta, \gamma, c_i$: coefficients obtenus par régression linéaire sur un ensemble de mesures donné.

Au niveau des performances, les algorithmes développés pour calculer le profil idéal à partir des données vectorielles et des corrections statistiques effectuées à partir d'un grand nombre de mesures en urbain permettent d'obtenir un modèle centré avec un écart-type de l'ordre de 6 dB.

Nous avons introduit les variables géographiques présentées précédemment, puis analysé les performances obtenues.

4.1.2.3 - Synthèse des résultats : coefficients de correction à ajouter au modèle COST-LD selon le milieu géographique et gain en performances

Les coefficients sont rajoutés aux équations de calculs de l'affaiblissement radio dans le modèle COST-LD, comme nous l'avons fait avec le modèle de Hata.

Type de milieu géographique	Coefficients de correction à rajouter aux équations de calcul de l'affaiblissement radio		
	LD	LD (MNS400)	COST
Urbain dense	-1	X	-1,5
Urbain	-2	X	-3
Périurbain	-2	X	-1,5
Rural	X	-1,5	X

Sources : C. Turck, FTR&D, 2002.

Figure 248 : Tableau récapitulatif des coefficients de correction à rajouter à l'équation de calcul de l'affaiblissement radio pour recentrer le modèle COST-LD selon le type de milieu géographique.

X : aucune donnée

Les performances (en décibels) du modèle COST-LD avec et sans les optimisations sont les suivantes :

Milieu géographique	Ecart-type avant optimisation	Ecart-type avant optimisation	Ecart-type avant optimisation	Ecart-type après optimisation	Ecart-type après optimisation	Ecart-type après optimisation
	LD	LD (MNS400)	COST	LD	LD (MNS400)	COST
Urbain dense	7,2	X	5,6	6	X	4
Urbain	6,6	X	5,7	4,5	X	3
Périurbain	7,6	X	7,4	5,5	X	6
Rural	X	7,9	X	X	6,5	X
Global	7	7,9	6	5	6,5	4

Sources : C. Turck, FTR&D, 2002.

Figure 249: Récapitulatif des performances du modèle COST-LD à 900 Mhz avant et après optimisation à l'aide des coefficients de correction.

Pour le modèle de COST-LD, on obtient un gain en performances de **2 décibels** grâce aux coefficients de correction.

Quantiles (en %)	Q ₅₀	Q ₇₀	Q ₉₀
	4,2	6,5	10,6

Sources : C. Turck, FTR&D, 2002.

Figure 250 : Récapitulatif des performances du modèle COST-LD optimisé, sur Strasbourg, en quantiles (%)

Généralisation : Les équations de calcul de l'affaiblissement radioélectrique pour l'agglomération strasbourgeoise, et plus généralement, pour l'espace géographique français, sont les suivantes :

L'étude porte uniquement sur le cas des fréquences pour le système GSM 900 MHz.

Calcul de l'affaiblissement radioélectrique total par le modèle COST-LD	
Equation générale :	
<u>Partie LD :</u>	
$L_{total} = L_0 + L_{msd} + L_{sol} + L_{suppl} + L_{morpho} + L_{dir} + Coef\ Correction \quad (81)$	
<u>Partie COST :</u>	
$L_{total} = L_0 + \alpha L_{msd} + \beta L_{rts} + \gamma L_{deg} + L_{morpho} + \sum c_i P_i + Coef\ Correction \quad (82)$	
<u>Avec :</u>	
L_{morpho} : affaiblissement lié à la morphologie (surfaces de visibilité, indicateurs morphologiques associés),	
$Coef\ Correction$: coefficients de correction, calculés selon le type de milieu géographique.	
<u>Milieu urbain dense</u> (Strasbourg centre) :	
<u>Partie LD :</u>	
$L_{total} = L_0 + L_{msd} + L_{sol} + L_{suppl} + L_{morpho} + L_{dir} - 1 \quad (83)$	
<u>Partie COST :</u>	
$L_{total} = L_0 + \alpha L_{msd} + \beta L_{rts} + \gamma L_{deg} + L_{morpho} + \sum c_i P_i - 1,5 \quad (84)$	
<u>Milieu urbain :</u>	
<u>Partie LD :</u>	
$L_{total} = L_0 + L_{msd} + L_{sol} + L_{suppl} + L_{morpho} + L_{dir} - 2 \quad (85)$	
<u>Partie COST :</u>	
$L_{total} = L_0 + \alpha L_{msd} + \beta L_{rts} + \gamma L_{deg} + L_{morpho} + \sum c_i P_i - 3 \quad (86)$	
<u>Milieu périurbain</u>	
<u>Partie LD :</u>	
$L_{total} = L_0 + L_{msd} + L_{sol} + L_{suppl} + L_{morpho} + L_{dir} - 2 \quad (87)$	
<u>Partie COST :</u>	
$L_{total} = L_0 + \alpha L_{msd} + \beta L_{rts} + \gamma L_{deg} + L_{morpho} + \sum c_i P_i - 1,5 \quad (88)$	
<u>Milieu rural</u>	
<u>Partie LD (MNS400) :</u>	
$L_{total} = L_0 + L_{msd} + L_{sol} + L_{suppl} + L_{morpho} + L_{dir} - 1,5 \quad (89)$	

Sources : C. Turck, FTR&D, 2003.

Figure 251 : Equations générales de calcul de l'affaiblissement radioélectrique par le modèle de propagation de COST-LD optimisé selon le type de milieu géographique présent sur le territoire français.

4.1.3 – Résultats numériques obtenus : Comparaison des résultats de calcul de l'affaiblissement radio pour les deux modèles de propagation d'ondes radio par rapport aux mesures d'affaiblissement sur le terrain

4.1.3.1 - En Milieu Urbain Dense

		AMES	ASYS	ASYS	ASYS	Err LD	Err LD	Err Cost	Err Cost	Err O-H	Err O-H
Distance	NbPts		LD	COST	O-H	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std
300	1290	108.9	103.3	108.9	107.8	2.2	7.9	-1.4	5.3	0.1	6.9
500	1900	115.4	117.7	116.3	115	-2.5	6.8	-1	5.5	0.3	6.8
700	2300	121.2	122.5	122.3	119.8	-2.1	7	-1.2	5.7	1.2	7.3
900	2110	125.3	126.7	127.2	123.8	-2.1	7	-2.2	5.8	1.7	7.6
1100	1700	129	129.5	130.1	126.8	-0.6	6.2	-1.5	5.1	2.6	7.4
1300	1300	131.6	131.4	132.9	129.2	0.4	7.3	-1.5	5.9	2.9	8.6
1500	1200	134.7	134.3	134.7	131.4	0.3	7.1	-1.3	5.6	2.8	7.6
Global	11800					-1.0	7.2	-1.5	5.6	1.5	7.5

Sources : C. Turck, FTR&D, 2002.

Figure 252 : Récapitulatif des principaux résultats des performances du modèle COST-LD et du modèle de Okumura-Hata en milieu urbain dense.

En l'état il faut corriger le modèle LD de - 1 dB pour l'urbain dense et la formule de Okumura-Hata en urbain dense de 1.5 dB. Le modèle COST est pessimiste de - 1.5 dB. Afin d'améliorer la qualité de la prédiction des modèles, on affecte un coefficient de correction dans l'équation de calcul de l'affaiblissement radio, qui correspond à une valeur de -1 pour le modèle LD, -1.5 pour le modèle COST et +1.5 pour le modèle de Hata.

Ceci permet un gain en performances des modèles en milieu urbain dense compris entre 1 et 3 décibels.

4.1.3.2 - En Milieu Urbain

		AMES	ASYS	ASYS	ASYS	Err LD	Err LD	Err Cost	Err Cost	Err O-H	Err O-H
Distance	NbPts		LD	COST	O-H	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std
900	400	119.4	119.8	120.9	123.8	-2.3	7.9	-2.4	5.5	-6	9.9
1100	600	123.4	123.7	123.9	126.3	-1	5.9	-2.3	5.5	-3.4	7.6
1300	500	124.6	126.8	126.9	128.7	-2.1	6.6	-2.6	5.7	-3.3	6.3
1500	500	128.8	129.5	130.8	131.1	-1.1	6	-2.4	5.7	-2.3	6.2
1700	450	132.2	133.8	135.3	133	-1.8	6.4	-2.5	5.3	-0.8	8.2
1900	500	132.5	133.4	134.1	134.7	-3.4	7.4	-3.9	5.8	-4.8	11
2100	400	132.8	133.4	135.7	138.3	-2.6	4.8	-4	4.6	-4.3	8.2
2300	400	130.9	134.2	137.6	139.6	-5	6.5	-6.1	5.4	-6.9	8.6
2500	550	133.7	134.8	136.9	141.2	-2.2	5.4	-3.1	5.5	-6	6.8
2700	600	135.8	136.8	137.3	142.5	-2.6	5.9	-3.2	5.9	-5.7	6.7
2900	650	137.7	136.8	138.8	143.5	-0.9	6.9	-2.5	5.6	-5.3	5.4
3100	550	141.4	141.4	143	143.2	-0.8	7.9	-2.8	7	-2.4	6.4
Global	6100					-2	6.6	-3	5.7	-4	7.8

Sources : C. Turck, FTR&D, 2002.

Figure 253 : Récapitulatif des principaux résultats des performances du modèle COST-LD et du modèle de Okumura-Hata en milieu urbain

En l'état il faut corriger le modèle LD de - 2 dB pour l'urbain et la formule de Okumura-Hata en urbain dense de - 4 dB. Le modèle COST est pessimiste de - 3 dB.

Afin d'améliorer la qualité de la prédiction des modèles, on affecte un coefficient de correction dans l'équation de calcul de l'affaiblissement radio, qui correspond à une valeur de -2 pour le modèle LD, - 3 pour le modèle COST et - 4 pour le modèle de Hata.

Ceci permet un gain en performances des modèles en milieu urbain compris entre 2 et 5 décibels.

4.1.3.3 - En Milieu Périurbain

		AMES (dB)	ASYS (dB)	ASYS (dB)	ASYS (dB)	Err LD	Err LD	Err Cost	Err Cost	Err O-H	Err O-H
Distance	NbPts		LD	COST	O-H	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std
300 m	200	106.8	103.8	106.3	101	-0.5	6	-0.4	4.9	5.7	6.5
500	300	113.7	114.8	113.6	107.4	-2.7	8	-1.1	6.1	4.5	9.2
700	300	113.9	117.2	115.4	112.5	-3.9	8.8	-2.4	6.9	1	10.6
900	380	114	119.6	115.4	116.8	-5.2	6	-1.5	6.4	-1.9	8.5
1100	250	127.8	127.5	125.3	119.6	0	5.9	1.5	7.1	8	9.1
1300	50	120.2	127.1	126.9	122.4	-4.5	9.1	-4.3	9.1	-0.5	10.7
1500	80	124.8	128.3	127.8	124.4	-3.5	6.7	-2	7.4	-0.2	7.6
1700	275	126.8	129.5	127.2	126.2	-2.5	5.1	-0.6	6.8	0.3	4.7
1900	300	128	130.5	129.5	127.8	-4	8.2	-2.5	9	-1.4	8.8
2100	200	131.7	130.9	132.7	129.2	-1.8	9.7	-1.6	8.2	1.1	11
2300	150	132.8	133	134.3	130.4	-1.5	9.1	-3	9.1	1.1	9.1
2500	150	139.7	137.5	137.7	132	1.3	7.4	0.5	7.9	6.1	8.6
2700	150	140.9	137.3	139.6	133	1.8	6	0.2	6.8	6.2	7.9
2900	35	131.7	136.4	138.4	133.6	-5.4	6.3	-8.3	7.9	-3	6
3100	45	135.7	137.3	138.7	134.7	-3.4	6.4	-5.7	6.8	-1	7.1
3300	120	142.1	138.6	144.9	137.2	1.7	6.7	-2.4	7.6	3.3	6.6
3500	80	137.8	138.2	142.7	137	-0.2	7.9	-4.4	7.1	0.7	8.5
Global	3065					-2	7.6	-1.5	7.4	2	9.2

Sources : C. Turck, FTR&D, 2002.

Figure 254 : Récapitulatif des principaux résultats des performances du modèle COST-LD et du modèle de Okumura-Hata en milieu périurbain

En l'état il faut corriger le modèle LD de - 2 dB pour le milieu périurbain et la formule de Okumura-Hata en périurbain de +2 dB. Le modèle COST est pessimiste de - 1.5 dB.

Afin d'améliorer la qualité de la prédiction des modèles, on affecte un coefficient de correction dans l'équation de calcul de l'affaiblissement radio, qui correspond à une valeur de - 2 pour le modèle LD, -1.5 pour le modèle COST et + 2 pour le modèle de Hata.

Ceci permet un gain en performances des modèles en milieu périurbain compris entre 1 et 3 décibels.

4.1.3.4 - En Milieu Rural

		AMES	ASYS	ASYS	Err LD	Err LD	Err O-H	Err O-H
Distance	NbPts		LD	O-H	Mean	Std	Mean	Std
700	25	99.2	106.2	97.3	-8.1	4.8	1.4	5.5
900	30	104.2	109	101.1	-5.5	6.7	3.4	7.2
1100	50	110.6	111.5	104	-2.8	7.6	4.9	8.4
1300	55	109.6	113.1	107.3	-4.1	6.2	2.5	6.6
1500	65	102.2	112.1	107.7	-8.6	7.7	-3.5	8.5
1700	60	109.2	114.7	109.9	-4.1	6.9	1.3	9.4
1900	70	114.4	116.4	112.2	-2.3	8.3	2.4	8.9
2100	65	114.6	117.2	113.2	-2.5	8.3	1.7	8.1
2300	55	113.7	117.3	114.3	-4.4	8.5	0.4	8.8
2500	85	117.2	119.3	115.5	-3.4	6.3	1.4	6.5
2700	65	122.2	124.3	116.8	-2.8	6.4	4.4	6.9
2900	55	124.2	125.6	119.1	-1.3	6.3	5.6	6.6
3100	35	129	126.9	118.7	1	9.6	8.9	9.9
3300	35	124	127.4	119.3	-3.6	5.1	4	6
3500	30	124.6	128.3	120.5	-1.6	8.6	5.7	9.1
3700	40	126.9	129.7	122.6	-1.7	6.4	6.3	7.7
3900	35	127.7	130.6	122.1	-0.4	7.5	7.6	10
4100	35	129.6	130.9	124.2	-1.5	6.5	5.8	9.8
4300	30	133.2	133.2	124.1	1.6	9.2	9.3	11.9
4500	60	129.2	129.4	126	-0.2	9	4.3	11.3
4700	80	132.6	132.2	126.5	1.6	7.5	7.6	8.1
4900	50	137.6	134	127	2.5	6.2	10.4	8.8
5100	55	140.6	136.1	127.8	3.3	6.5	12	9.8
5300	30	137.2	134.6	127.3	2.9	8.4	10.9	12
5500	25	131.7	134.1	128.8	-2.4	4.7	4.8	7.9
5700	15	127.7	136.6	128.8	-4	6.6	2.7	9.2
5900	35	128.4	131.4	128.3	-2.6	5.6	2.2	8.8
6100	35	135.6	134.7	128.7	0.5	7	6.7	10.4
6300	30	134.7	134.7	129.2	1.5	6	6	8.7
6500	30	137.6	135.5	129.7	3.4	6.8	8.6	9.2
6700	30	142.7	137	130.2	7.2	6.9	12.7	9.4
6900	25	142.2	138.3	130.6	5.3	5.1	11.4	8
7100	35	146.7	140.6	132.7	6.1	6.5	13.6	8.8
Global	1455				-1.5	7.9	5	9.5

Sources : C. Turck, FTR&D, 2002.

Figure 255 : Récapitulatif des principaux résultats des performances du modèle COST-LD et du modèle de Okumura-Hata en milieu rural

En l'état il faut corriger le modèle LD de - 1.5 dB pour le milieu rural et la formule de Okumura-Hata en rural de +5 dB.

Afin d'améliorer la qualité de la prédiction des modèles, on affecte un coefficient de correction dans l'équation de calcul de l'affaiblissement radio, qui correspond à une valeur de -1.5 pour le modèle LD et de +5 pour le modèle de Hata.

Ceci permet un gain en performances des modèles en milieu rural compris entre 1 et 5 décibels.

4.2 – Le modèle OpenMorph

La demande en communications radiomobiles étant surtout concentrée en milieux urbanisés, la localisation des antennes devient plus complexe du fait de l'influence des formes urbaines et des types d'occupation du sol associés.

L'importance des éléments géographiques (leur nature, leur agencement) ainsi que le rôle du niveau d'observation (l'échelle) qui leur est associé, sont déterminants pour une utilisation optimum des modèles de propagation radioélectrique, c'est-à-dire conciliant la précision des données géographiques, les traitements et le coût de ces opérations.

La planification des réseaux de télécommunications cellulaires impose de connaître l'étendue de la couverture radioélectrique pour chaque antenne émettrice. A chaque station relais, comportant un ou plusieurs émetteurs, correspond *a priori* une certaine surface géographique à couvrir. On peut calculer puis visualiser sur une carte la simulation de la couverture de champ radioélectrique obtenue pour une ou plusieurs stations de base. La figure 261 représente une telle carte de couverture de champ radio : au premier plan nous voyons une seule antenne émettrice omnidirectionnelle couvrant une certaine surface correspondant à une cellule du réseau, au second plan, nous avons une deuxième station relais comportant quatre antennes directionnelles couvrant chacune 90 degrés.

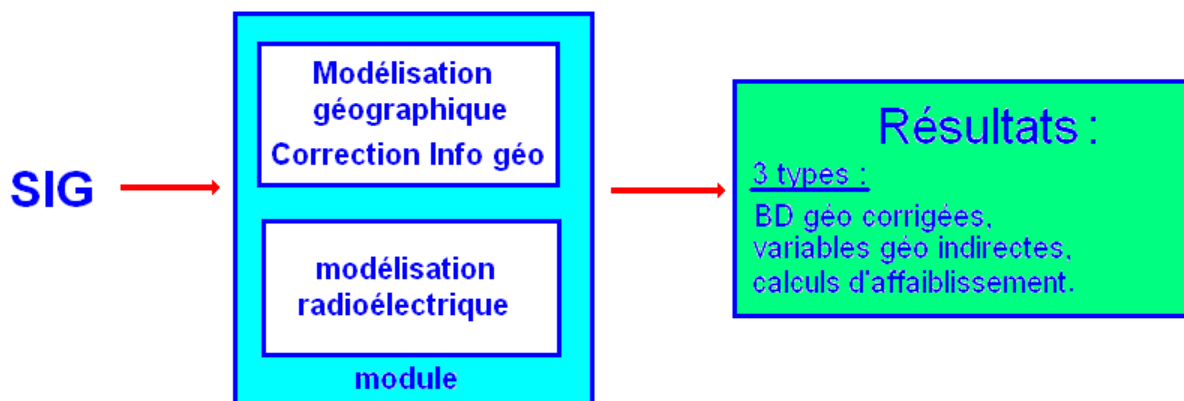
L'analyse spatiale et l'intégration possible de données pertinentes dans ce contexte au sein d'un SIG a permis d'appréhender l'influence des données géographiques sur la réalisation des modèles de propagation en ce qui concerne l'occupation du sol (échelle, qualité, typologie, nature des éléments...) et d'identifier les algorithmes de calcul de la couverture de champ radioélectrique les plus adaptés à une optimisation des traitements.

Pour intégrer ces données et faciliter l'optimisation, le SIG peut être utilisée de différente manière en ingénierie radio :

- Le SIG peut être utilisé en tant que **plateforme** d'ingénierie radiomobile, de la même manière que la plateforme Parcell (développée par France Télécom), NetAct Planer (développée par Nokia), Planet, etc. Une plateforme d'ingénierie radio correspond au logiciel qui permet d'effectuer l'ensemble des études d'ingénierie radiomobile. Elle comporte une interface homme machine (IHM) permettant d'accéder aux différents modules, ou sous-programmes, qui effectuent les calculs : les modèles de propagation d'ondes radio qui permettent de calculer l'affaiblissement du signal radio sur une zone donnée, les modules de calculs du trafic (simulation et visualisation des mesures de trafic sur le terrain), le module de visualisation des données géographiques (visualisation des couches d'informations, chargement des données à partir du SGBDR, etc.), un module donnant accès aux données radioélectriques mesurées sur le terrain (affaiblissement radio mesuré), etc.

- Le SIG peut être utilisé comme **outil de modélisation** (figure 256) de la propagation des ondes radio. Tous les calculs (affaiblissements radioélectriques, coupe de profil, choix de la résolution des données géographique optimale pour le calcul, etc.) sont effectués directement dans le SIG.

- Le SIG peut être utilisé comme **outil d'analyse spatiale** afin d'étudier préalablement la zone géographique à prendre en compte pour le calcul radio. Ceci permet de caractériser plus efficacement (analyse morphologique, etc.) le milieu géographique présent le long du canal de propagation afin d'améliorer les calculs d'affaiblissement radio.



Sources : C.Turck, LIV, 2005.

Figure 256 : Présentation des deux modules composant le modèle OpenMorph, ainsi que les résultats de calculs obtenus à l'aide du modèle.

4.2.1 – La plateforme d’ingénierie radiomobile OpenMorph

4.2.1.1 - Introduction

La plateforme d’ingénierie radiomobile OpenMorph est à l'origine un outil dédié à l'ingénierie Outdoor pour les réseaux GSM 900 MHz, mais une extension est envisagée vers des modèles indoor, des modèles macro cellulaires, des réseaux GSM 1800 MHz, des réseaux UMTS, ainsi que d’autres types de modélisation : propagation sonore, diffusion de polluants dans l’air, etc. OpenMorph est une extension du Système d'Information Géographique ArcView. Il s'utilise par l'intermédiaire d'ArcView.

Elle permet de visualiser le relief (montagnes, collines, zones côtières, etc.) et les objets géographiques comme les bâtiments (y compris les étages) en 2D et 3D, et de positionner les différents éléments d'un réseau GSM (antennes, etc.) afin de faire des simulations en mode couverture, en mode profil et en mode maillé.

Les modèles de prédiction de champ radio disponibles dans OpenMorph sont des modèles du type Okumura-Hata et COST-LD dont les paramètres peuvent être fixés par l'utilisateur. Un paramétrage par défaut est néanmoins proposé. Le but de ce paragraphe est de présenter la plateforme d’ingénierie radiomobile OpenMorph, c'est-à-dire d’analyser ses fonctionnalités techniques et de dégager des pistes d’évolutions afin d'enrichir l'outil d'ingénierie.

Les fonctionnalités nécessaires à la plateforme peuvent être subdivisées en trois modules :

- Les modules dédiés à l’ingénierie ;
- Les modules dédiés à la visualisation de résultats, des données géographiques, etc. ;
- Les modules dédiés à l’import/export des données.

4.2.1.2 – Les modules dédiés à l’ingénierie et à la visualisation

Pour décrire les fonctionnalités d'OpenMorph, la démarche a consisté à se positionner comme un nouvel utilisateur qui découvre l'outil d'ingénierie GSM et construit un nouveau réseau radiomobile.

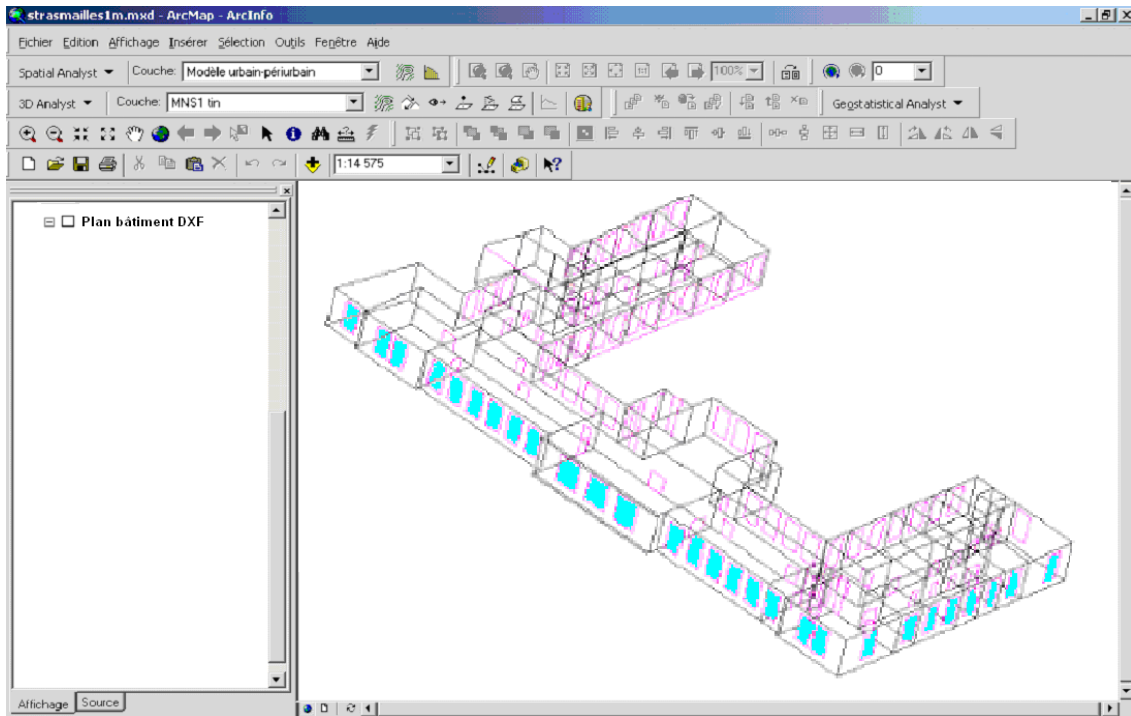
L’interface Homme-Machine :

Par défaut, ArcView créé une fenêtre "nouveau projet" dans laquelle vont être stockées toutes les références aux données géographiques et attributaires et aux traitements spatiaux et calculs d’ingénierie.

Pour disposer des fonctionnalités SIG d'OpenMorph, l'utilisateur doit se placer dans une vue et cocher l'extension "OpenMorph" (onglet *File + Extensions*). Les vues sont des fenêtres dans lesquelles s'affichent les différentes données cartographiques.

Il est possible de charger des fichiers géographiques dans de nombreux formats standards (.dxf, .tif, .jpeg, .shp, etc.) où les couches d’informations géographiques sont déclarées comme des thèmes (onglet *View +Add Theme*).

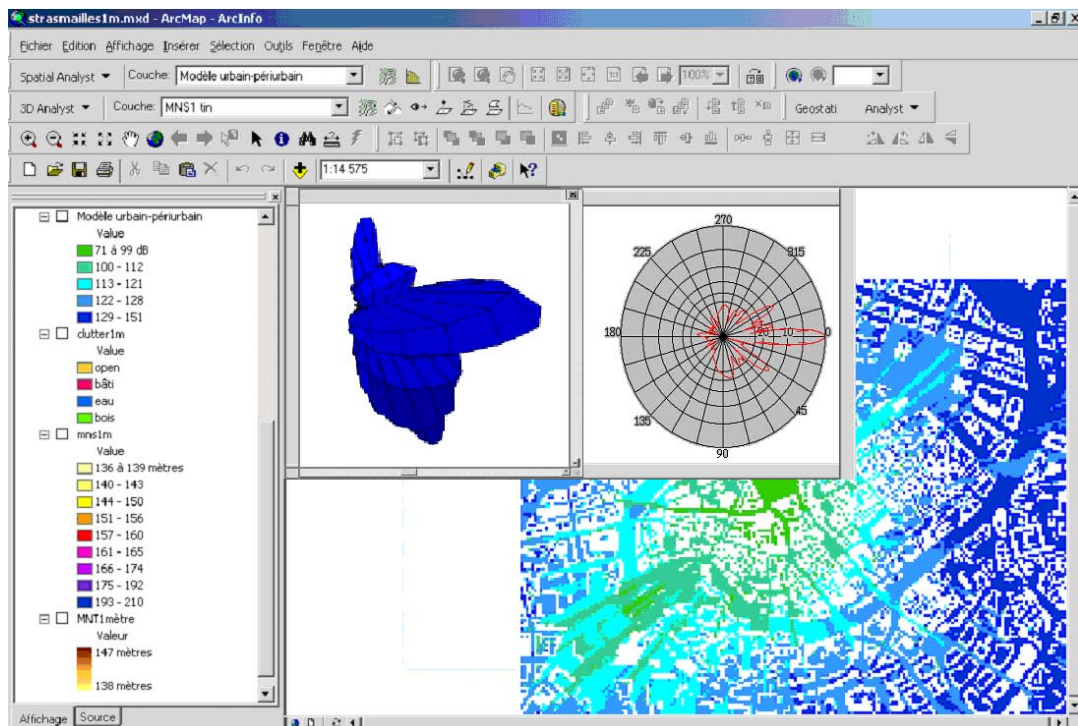
La figure 257 représente le plan *.dxf d'un étage d’un bâtiment en trois dimensions.



Sources : C.Turck, LIV, 2004.

Figure 257 : Plan DXF en 3D chargé sous ArcView : Visualisation des murs et des fenêtres du bâtiment à l'aide des fonctionnalités du SIG

OpenMorph met également à disposition de l'utilisateur un ensemble d'éléments du réseau pour lui permettre de construire son réseau de télécommunication et de faire des simulations. Il s'agit : des stations de bases, des antennes émettrices, de la position du récepteur, etc. OpenMorph offre la possibilité de visualiser les diagrammes d'antenne en 2D et 3D (figure 258).



Sources : C.Turck, LIV, 2004.

Figure 258 : Exemple d'utilisation de données radio dans le modèle OpenMorph : visualisation du diagramme d'antenne en 2D et 3D pour un relais bien précis

La modélisation radioélectrique

- **Les calculs de couverture de champ radio proposés dans OpenMorph**

L'utilisateur doit d'abord délimiter à l'aide de la souris l'étendue de la zone géographique sur laquelle il désire calculer la puissance radio reçue. Cette zone de calcul est identique pour l'ensemble des stations. Cette zone est maillée (maille carrée). L'utilisateur peut choisir soit la résolution (par exemple, une maille de 1 mètre de côté) soit le nombre de mailles qu'il souhaite sur l'un des axes (X ou Y). Pour chaque émetteur présent dans la vue, OpenMorph calcule la puissance reçue en chaque maille de la zone de calcul préalablement définie.

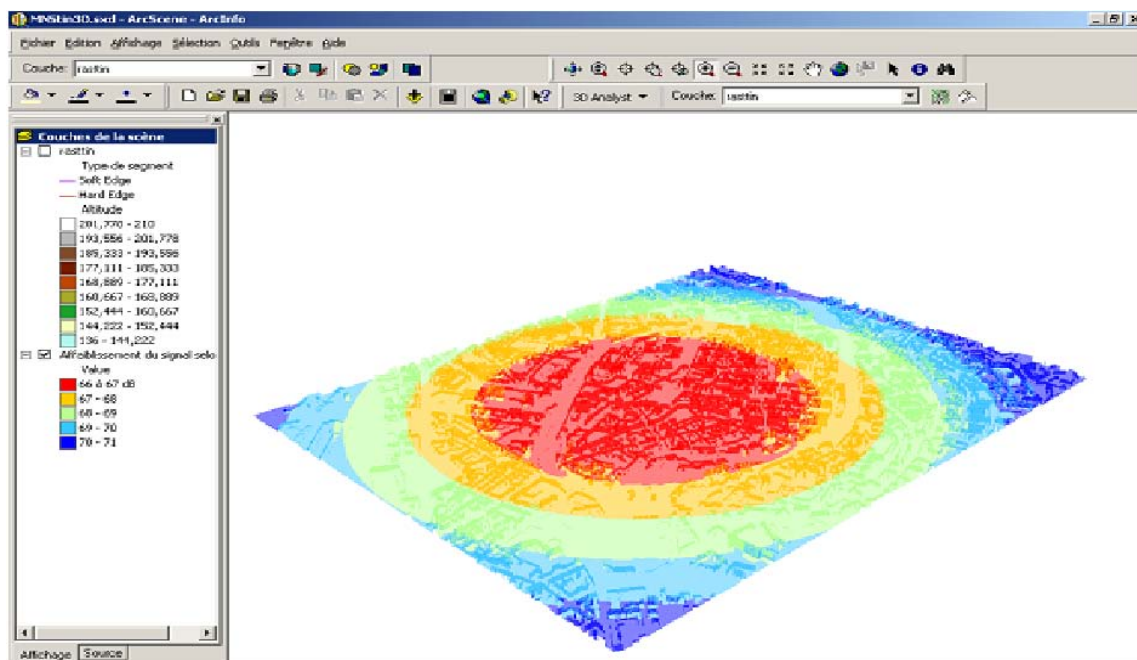
L'outil propose une légende pour la couverture en fonction des valeurs de puissance reçue qu'il a calculées. L'utilisateur peut néanmoins paramétrer à son gré la symbologie de la couverture obtenue : les couleurs d'affichage ainsi que les intervalles de puissance associés aux couleurs.

Pour aider l'utilisateur à réaliser son réseau dans le cas où il dispose de mesures Outdoor sur d'une zone géographique donnée, un module d'optimisation des modèles de propagation a été intégré à l'outil.

Par ailleurs, un modèle de type tracé de rayons peut s'avérer très utile pour une meilleure prise en compte des phénomènes physiques de propagation et une meilleure précision de la prédiction et pour fournir des informations sur les trajets multiples.

- **Calculs des couvertures radio et visualisation en 3D**

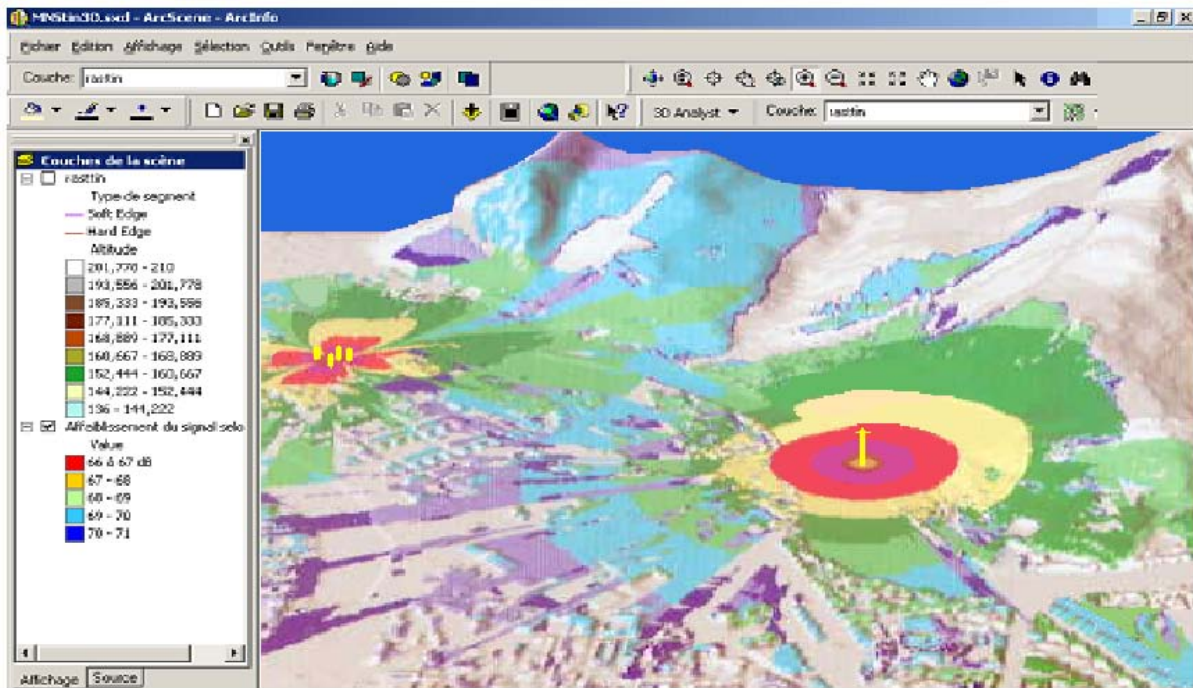
OpenMorph permet l'étude de l'ingénierie d'un réseau GSM en 3D pour un quartier, un îlot bâti ou un seul bâtiment, étage par étage.



Sources : C. Turck, LIV, 2004.

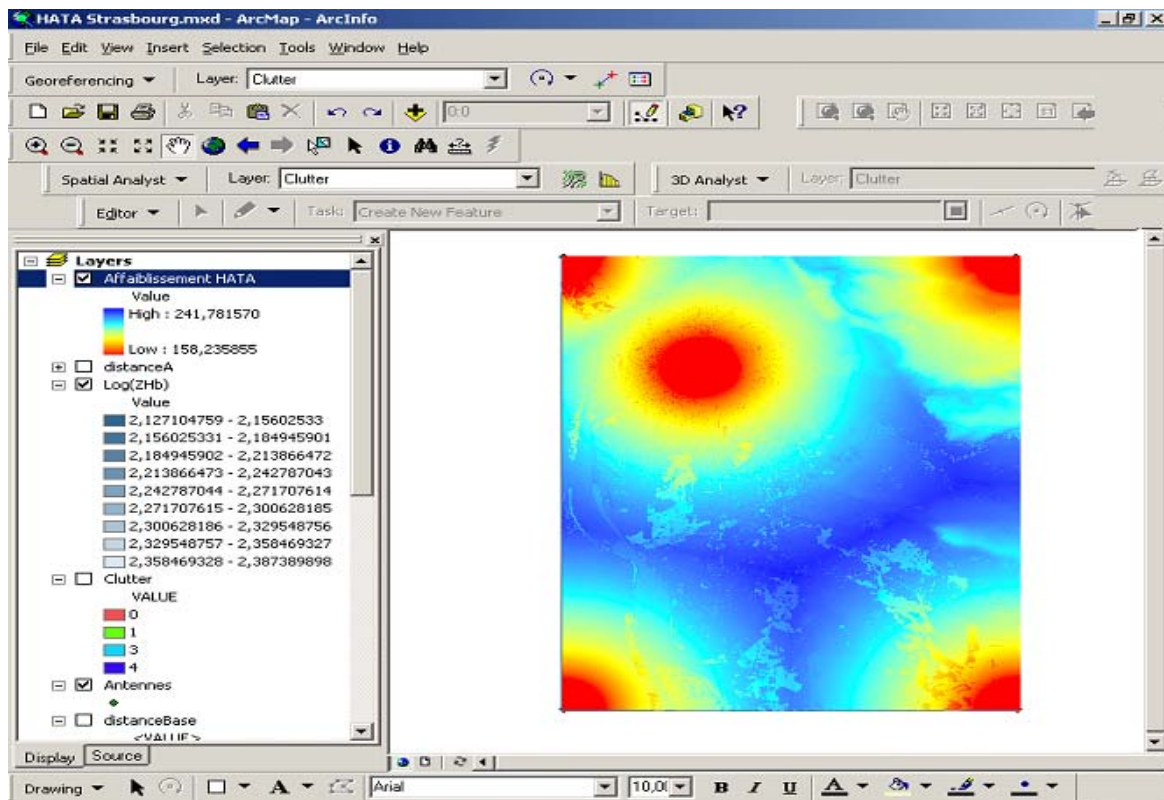
Figure 259 : Modèle de Hata optimisé – Visualisation sous SIG en 3D – Strasbourg Centre-ville - Pour une antenne relais - (Module 3D Analyst)

La figure 260 représente la couverture de champ calculée par le modèle de Hata. La carte d'affaiblissement radio est visualisée en trois dimensions grâce au module dédié à la visualisation 3D d'ArcView, le module ArcScene. Il est possible aussi de visualiser les différents émetteurs relais (figure 261).



Sources : C. Turck, LIV, 2004.

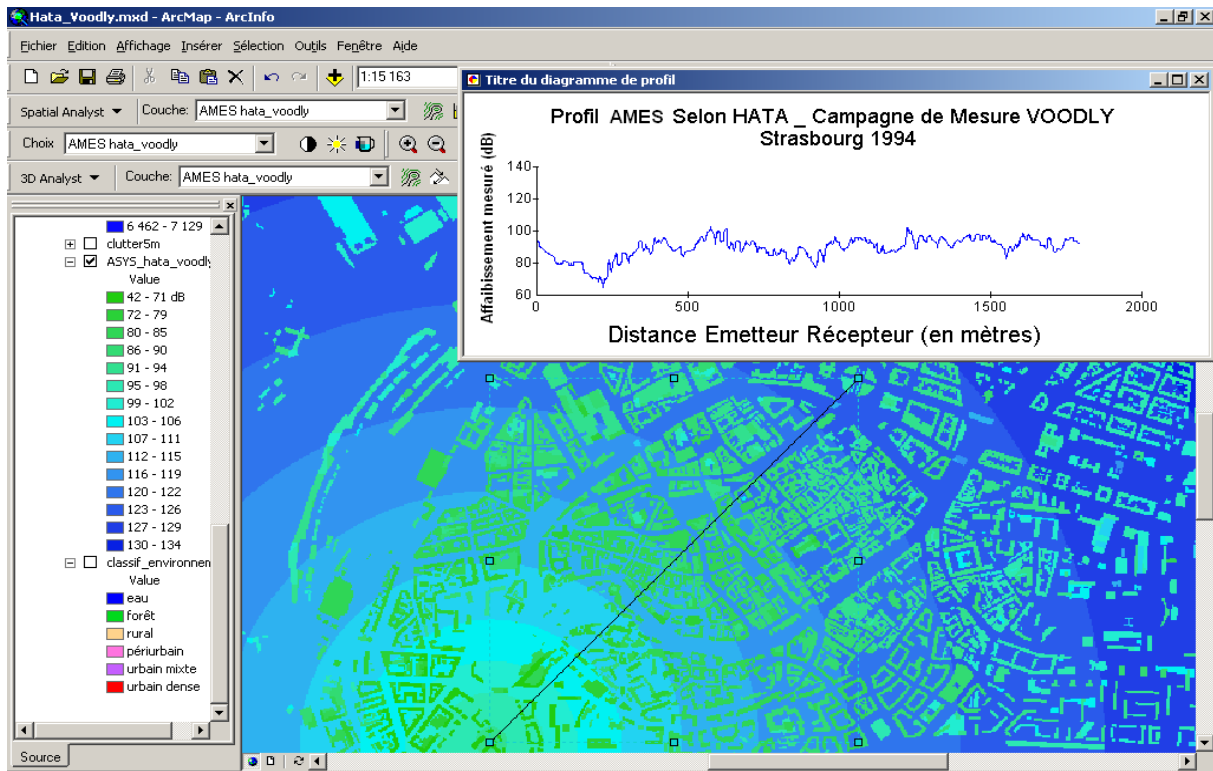
Figure 260 : Modèle de Hata optimisé – Visualisation sous SIG en 3D – Zone montagneuse



Sources : C. Turck, LIV, 2004.

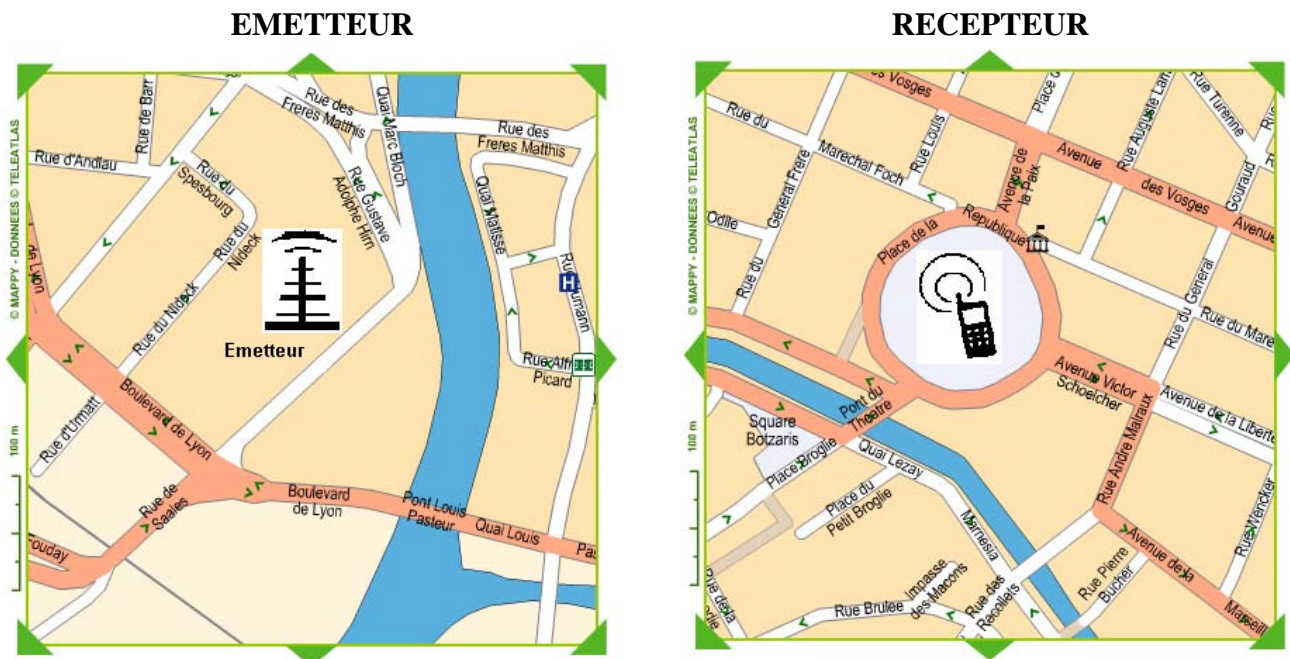
Figure 261 : Modèle de Hata optimisé – Visualisation sous SIG en 2D – Communauté Urbaine de Strasbourg Pour 5 antennes relais - (Module Spatial Analyst)

L'affaiblissement radioélectrique est aussi calculé et représenté comme ici (figure 262) pour le modèle de Hata, où l'affaiblissement est compris entre 42 et 134 décibels.



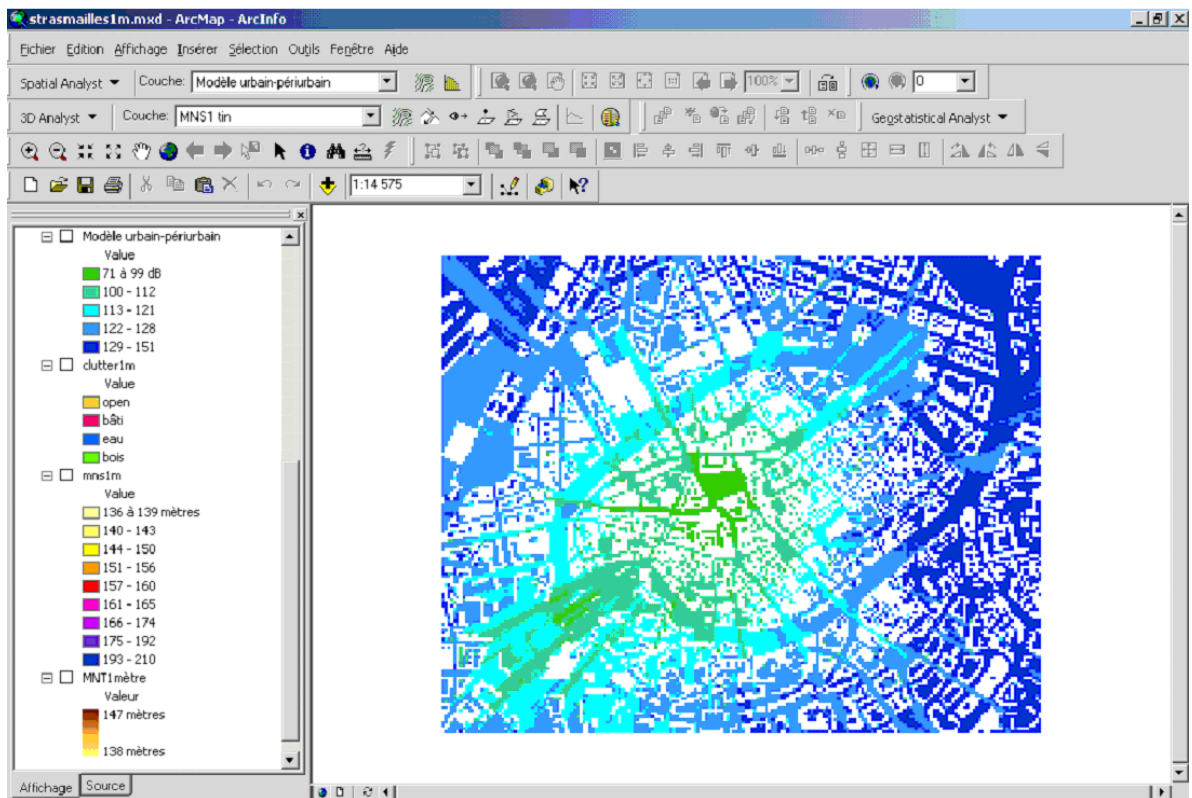
Sources : C. TURCK, LIV, 2003

Figure 262 : Visualisation sous ArcView 8 : Modèle de propagation d'ondes radio de Okumura-Hata
En mode Couverture de champ radio (affaiblissements prédits)
et en mode Profil émetteur-récepteur (affaiblissements mesurés)



Sources : C. TURCK, LIV, 2003
Logiciel : Mappy, Données géo : TéléAtlas

Figure 263 : pour le profil : Localisation de l'Emetteur et du Récepteur
Campagne de mesure Strasbourg -TrajetVOODLY2_1994



Sources : C. Turck, FTR&D et LIV, 2003.

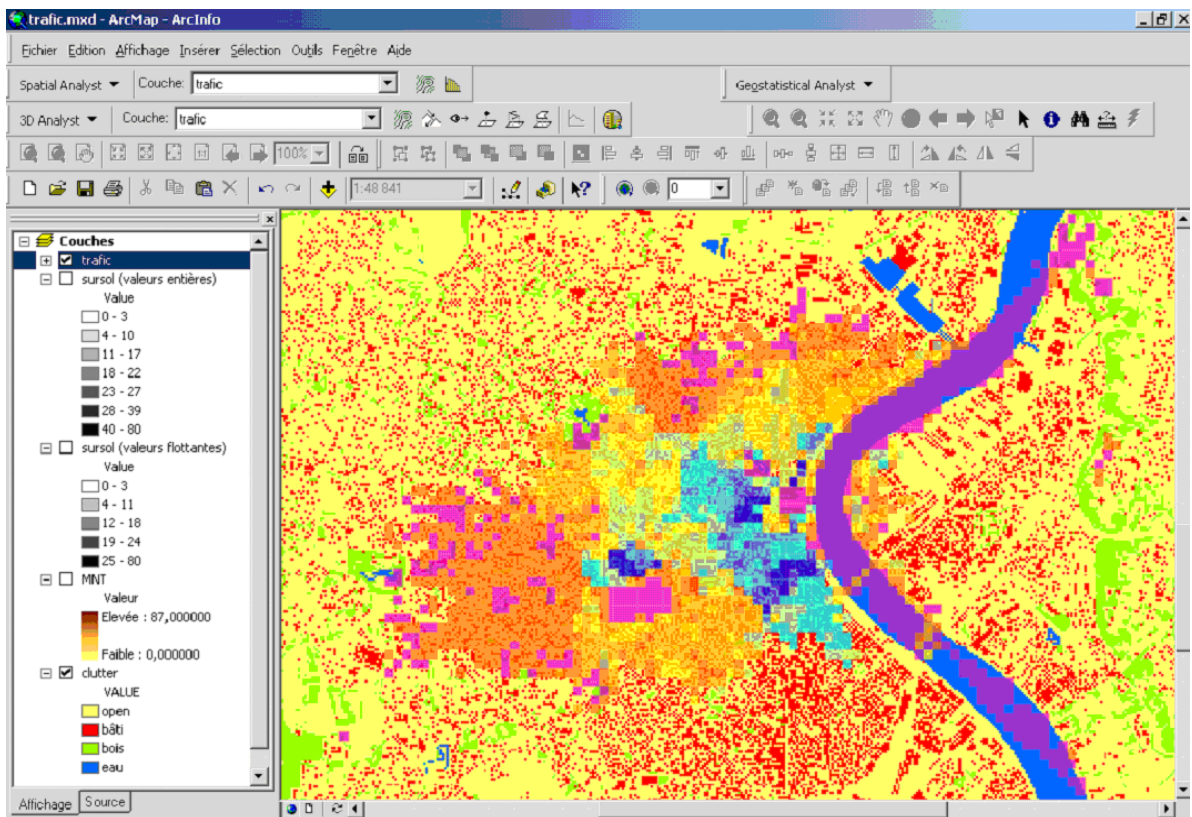
Figure 264 : Modèle COST-LD¹⁸⁶ optimisé sous SIG - Visualisation en 2D – Strasbourg Centre-ville

La figure 264 représente les résultats de calculs d'une couverture de champ par le modèle macro et micro cellulaire COST-LD (modèle FTR&D) pour Strasbourg Centre-ville.

¹⁸⁶ Les données géographiques qui ont été utilisées en entrée du modèle sont : le MNT 50 m, le MNS 25m et le clutter 14 classes. La zone de calcul géographique a un pas de maille de 1 mètre de résolution. L'antenne utilisée pour le calcul est une antenne 3D. La pseudo-station émettrice avait été positionnée pour ce calcul radio à l'angle de la rue du 22 novembre et de la rue des francs bourgeois.

- Les calculs de trafic radio

La figure 265 représente un autre type de calcul utilisé en ingénierie radiomobile : le trafic radio. Le trafic radioélectrique correspond à la mesure du nombre de communications émises et reçues par les antennes relais d'un réseau radiomobile, pour une zone géographique donnée. L'image ci-dessous correspond à la visualisation d'une carte de trafic radio obtenue avec le module ArcMap d'ArcView.

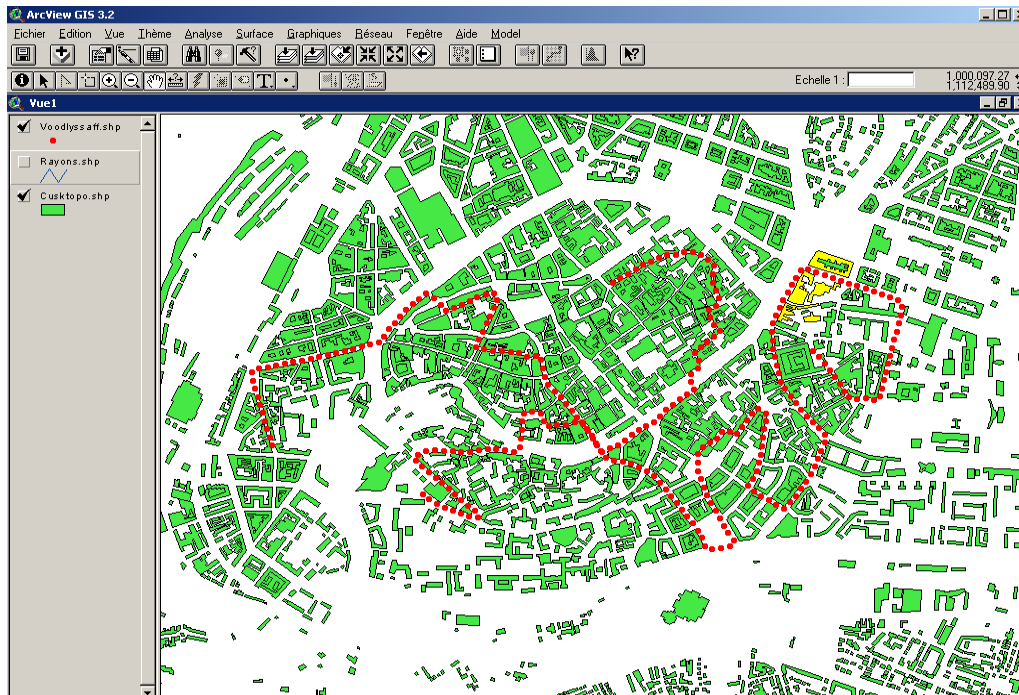


Sources : C. Turck, LIV, 2004.

Figure 265 : Visualisation d'un autre type de calcul radio effectué à l'aide du SIG : le calcul de la carte de trafic radioélectrique (Module ArcMap et Spatial Analyst)

4.2.1.3 - L'importation/l'exportation de données, de mesures radio

OpenMorph importe les mesures radio de la manière suivante : les fichiers de mesures sont chargés dans le SIG. La coordonnée Y du fichier *.mol doit être renseignée positivement, les fichiers émetteurs (*.eml) et mesures (*.mol) doivent être projetés dans le même système de projection que la zone géographique étudiée.



Sources : C. TURCK, LIV, 2003

Figure 266 : Chargement de fichiers de mesures radio sous ArcView 3 - Strasbourg Centre-ville

Les fonctionnalités de l'outil d'import/export des données sont au nombre de quatre :

- **1. Importation, lecture** : Les mesures importées sont affichées avec un code couleur, fonction de la valeur de la puissance (en décibels) pour ce point de mesure. Cet affichage facilite l'analyse des mesures dans l'environnement considéré. L'utilisateur peut, par ailleurs, demander la valeur exacte de la puissance mesurée en cliquant sur un point de mesure donné (fonctionnalité existant dans tous les SIG).

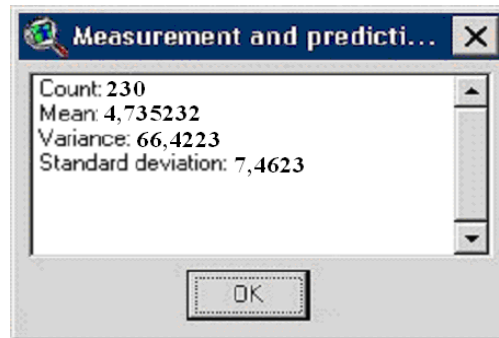
Positionnement d'un élément du réseau :

Le positionnement d'un élément du réseau (une antenne relais par exemple) serait facilité s'il suffisait d'indiquer ses coordonnées X et Y. Pour l'instant, le positionnement s'effectue manuellement à l'aide de la souris (les coordonnées sont alors affichées dans la barre d'outils).

- **2. Analyse, visualisation** : Il existe un outil statistique de comparaison prédiction/mesures, qui précise le nombre de points ayant servi aux calculs statistiques suivants : la moyenne, la variance et l'écart-type de l'erreur.

La comparaison prédiction/mesures s'effectue à partir des points de mesures situés dans la zone de couverture (là où une prédiction du signal radio est disponible). Le SIG comparera la mesure à la prédiction de la maille la plus proche. Il est donc nécessaire de lancer un calcul de couverture avant d'effectuer une comparaison prédiction/mesures.

La figure 267 montre les statistiques de l'erreur (entre affaiblissements prédits et affaiblissements mesurés) calculées par OpenMorph. Ces statistiques ont été calculées avec les points de mesures appartenant à la couverture et avec le paramétrage par défaut du modèle de prédiction de Okumura-Hata. Le nombre de points de mesures pris en compte pour le calcul statistique n'est ici que de 230 points, ce qui serait insuffisant si l'on voulait utiliser ces résultats statistiques pour améliorer la modélisation radioélectrique par exemple. Il faudrait appliquer les calculs statistiques à plusieurs milliers de points pour obtenir des résultats objectifs (Sanders, 1990, 1992¹⁸⁷).



Sources : C.Turck, LIV, 2004

Figure 267 : Statistiques de l'erreur calculées par OpenMorph

Comparaison des couches d'informations prédiction/mesures :

Les comparaisons prédiction/mesures s'effectuent de manière automatique sur l'ensemble des mesures qui se situent sur la zone où un calcul de couverture a été effectué. Cette opération spatiale de comparaison de données spatiales est proposée à la base dans tout SIG. Les performances fournies par OpenMorph sont relatives à un seul fichier de mesures, (lui-même relatif à une seule antenne relais). Il n'est pas possible pour l'instant d'effectuer des comparaisons globales prédiction/mesures relatives à plusieurs fichiers de mesures ou à plusieurs antennes relais.

- 3. Visualisation, Export :

Affichage de la couverture :

La couverture de champ radio globale est affichée en fonction de l'ensemble des antennes présentes dans la vue. Il serait intéressant de pouvoir afficher la couverture relative à une seule ou plusieurs antennes sélectionnées par l'utilisateur.

Fonds de plan de bâtiments en 2D :

Pour recréer les bâtiments à partir des fonds de plan en 2D aux formats bmp et tif, l'utilisateur dispose d'outils standard dans le SIG. Il faudrait donner à l'utilisateur la possibilité de créer de nouveaux types d'outils (nouveaux types de murs, rajouts d'un plancher, d'un étage, d'un escalier, etc.).

- 4. Transformation, conversion des données : L'utilisateur a la charge d'ajouter dans le projet SIG une antenne fictive qui aura les caractéristiques de l'émetteur réel associé aux mesures. Les fichiers décrivant les caractéristiques de l'émetteur (*.eml) associés aux mesures de champ radio (*.mol) ne sont pas pris en compte automatiquement par OpenMorph. Ils

¹⁸⁷ Sanders L., 1990, L'analyse des données appliquées à la géographie, Alidade, RECLUS, 267 pages.

Sanders L., 1992, Géographie et Statistique, in Bailly, Ferras, Pumain Eds., Encyclopédie de Géographie, pages 273-294.

doivent tout d'abord être convertis (grâce au convertisseur GDGM) dans un format standard (*.dbf) afin de pouvoir être importés dans le SIG.

4.2.1.4 – Conclusion

OpenMorph est un outil convivial et simple d'emploi. Il offre les fonctionnalités de base (mise en place d'un réseau, calculs de couverture radio, de dimensionnement, d'importation de mesures de terrain) pour réaliser une ingénierie de réseau radiomobile GSM. Cet outil mériterait des développements complémentaires afin d'enrichir ses fonctionnalités et optimiser l'ingénierie. Parmi les développements les plus importants, citons les suivants :

- extension de l'étude de l'ingénierie à plusieurs étages d'un bâtiment et/ou niveaux emboîtés en simultané et calcul/visualisation en 3D,
- modèle de prédiction de puissance reçue basée sur un tracé de rayons,
- calcul de couverture de champ radio par étage avec prise en compte des contributions extérieures.

4.2.2 - Le module d'Analyse Spatiale : modélisation géographique du milieu de propagation des ondes radio

Nous posons comme hypothèse que l'espace joue un rôle important dans la propagation des ondes radio et donc par conséquent que l'information géographique est essentielle dans la modélisation mathématique de la propagation.

Ceci entraîne que si l'on cherche à améliorer la modélisation radio, en terme de justesse de la prédiction et de vitesse de calcul, l'évaluation de la qualité de l'information géographique prise en compte par le modèle est une nécessité.

Afin d'avoir une meilleure prise en compte des objets géographiques qui interfèrent avec les ondes radio et jouent le rôle d'obstacles à la propagation nous proposons d'introduire des variables géographiques directes et indirectes dans la modélisation radio. Ainsi, avant tout calcul d'affaiblissement radio, il y aura au préalable une étude qualitative et quantitative du milieu géographique (morphologie, visibilité, altitude, clutter, etc.).

Nous disposons d'une base de données contenant les variables géographiques directes et indirectes qui ont été pré-calculées au préalable, ce qui nous permet de décrire plus précisément le sol et le sursol, ceci étant surtout important pour les zones complexes comme le milieu urbain.

4.2.2.1 – De l'importance des données géographiques pour la modélisation radiomobile

4.2.2.1.1 – Introduction

Il existe différents types de modèles de propagation des ondes radioélectriques pour des fréquences de 900 et 1800 MHz (GSM) et 1900 MHz (UMTS). Ils se différencient par le type de modélisation radio utilisée (rayon, optique géométrique, facettes de montagnes, etc.) et par la taille des cellules (zone géographique couverte par un émetteur) du réseau radiomobile : grandes cellules (niveau Macro) de plusieurs dizaines de kilomètres, cellules de taille moyenne (niveau Méso) de quelques kilomètres, petites cellules (niveau Micro) de quelques centaines de mètres voir un kilomètre au maximum, et enfin très petites cellules (Niveau Pico) de quelques dizaines de mètres.

Ainsi, c'est **la notion d'échelle géographique** qui permet de faire une première distinction entre les modèles.

De plus, pour chaque type de cellule ont été développés plusieurs modèles de propagation d'ondes radio différents, selon le type de milieu géographique traversé par les ondes : il existe ainsi des modèles spécifiques au milieu montagneux, d'autres pour le milieu rural, d'autres encore pour les milieux périurbain et urbain, et d'autres enfin dédiés au milieu urbain dense et très dense.

Ainsi, **la typologie du milieu géographique** en présence permet de faire une deuxième distinction entre les modèles.

Le modèle OpenMorph est composé de deux modules interconnectés. Le module de modélisation spatiale et de choix des données géographiques pertinentes pour la modélisation radio, les plus adaptées à la zone géographique sur laquelle s'effectue le calcul radio (résolution, variables directes, variables indirectes, etc.) est un modèle adaptatif s'adapte, de manière automatique. En effet, il ne prend en compte, selon le contexte géographique, que les variables les plus pertinentes pour la zone géographique. Il est prévu d'y adjoindre également

un Système Expert afin d'automatiser le choix de ces variables géographiques : plus le milieu sera complexe (Rolland-May, 2000¹⁸⁸), comme c'est le cas par exemple en milieu urbain très dense, plus le Système Expert aura tendance à proposer l'utilisation d'un niveau d'analyse spatiale plus fin, c'est-à-dire à calculer les variables géographiques indirectes avec une résolution plus fine (métrique), et à utiliser un nombre de variables géographiques plus importantes (indicateurs morphologiques, façades de bâtiments, etc.).

4.2.2.1.2 – L'intérêt de l'Analyse Spatiale pour l'ingénierie radio :

L'analyse spatiale¹⁸⁹ correspond à l'étude du milieu géographique afin d'en dégager des éléments caractéristiques, qui vont ensuite pouvoir être utilisés dans d'autres études (Télécoms, etc.). Elle correspond à l'analyse d'objets et de phénomènes spatialisés, c'est-à-dire qui sont géolocalisées par leurs coordonnées en X, Y, voir Z (l'altitude, ou le thème).

La propagation des ondes radio varie considérablement selon le type de milieu géographique traversé. En milieu urbain dense par exemple les ondes radio vont être fortement atténuées par la présence du bâti. Dans le SIG, le type d'environnement a été inclus comme critère incontournable pour le calcul de la couverture radio. Les environnements géographiques pris en compte actuellement dans OpenMorph sont les suivants : milieu urbain dense, milieu urbain, milieu suburbain, milieu rural, milieu montagneux et zones côtières.

4.2.2.1.3 – Les apports de l'Analyse Spatiale sous SIG pour les radiocommunications

Trois domaines articulant SIG et radiocommunications gagnent actuellement en importance : La visualisation des informations, l'intégration, l'analyse et la comparaison des informations.

- **La visualisation** : la possibilité offerte de visualiser les réseaux en 2D et 3D est une ouverture en matière de complémentarité entre SIG et Télécommunications. Le SIG possède des modules spécifiques dédiés à la 3D.
- **L'intégration** : L'interfaçage avec des logiciels d'ingénierie radiomobile du commerce est aisé (sous ArcInfo) et s'effectue sous Windows grâce à des composants COM, des Active X, des bibliothèques dynamiques (.dll). Le SIG ArcInfo dispose d'une bibliothèque orientée objet (ArcObjets) comportant plus de 10 000 objets.
- **La sélection** des sites (dimensionnement des antennes) : de nombreux critères sont pris en compte pour sélectionner une localisation optimale des antennes relais. Des informations géographiques au format vectoriel ou raster telles que les limites administratives, les obstructions verticales, les types d'occupation du sol... doivent être intégrées.
- **La comparaison** : Le SIG permet d'intégrer et de manipuler des couches d'informations parfois très variées, afin d'en extraire de nouvelles données, ou bien de déduire de nouvelles connaissances, également grâce à différentes opérations spatiales : Les cartes d'affaiblissement, calculé par un même modèle sont ainsi comparées lorsqu'on modifie certains paramètres ou variables géographiques ; on peut ainsi évaluer l'impact de la résolution spatiale des données raster sur la qualité de l'affaiblissement radio calculé par

¹⁸⁸ Rolland-May, 2000, Evaluation des territoires : concepts, modèle, méthodes.

¹⁸⁹ Sanders *et al*, 2001, Modèles en analyse spatiale.

le modèle. On peut effectuer très facilement des comparaisons de couches d'informations, de données parfois très différentes, comme :

- les valeurs prédites par le modèle avec les mesures de terrain.
 - les résultats obtenus (A_{ff}) obtenus avec différents modèles pour une même zone géographique, afin de savoir automatiquement quel est le modèle le mieux adapté pour ce type de milieu géographique.
- **Tests** : On peut aussi tester la modélisation radio (l'équation, les variables, etc.) grâce aux statistiques : tester de la qualité des résultats (calcul de l'écart-type, de l'erreur moyenne, etc.) si l'on ajoute ou si l'on enlève des variables géographiques dans la modélisation.

4.2.2.2 – Applications en cours de développement et recherches futures

OpenMorph permet différents types de représentations selon le point de vue adopté :

- **le profil horizontal : vue plane, vue d'au-dessus,**
- **le profil vertical : coupe de profil,**
- **la 3D : les voxels.**

Dans les modèles de propagation d'ondes radio, on utilise ces différentes approches pour la modélisation.

Pour chaque mode de représentation, des variables géographiques spécifiques peuvent être utilisées :

- Vue horizontale, plane : la plus classique, qui est utilisée pour créer des cartes et des couches d'informations sous SIG, des plans de bâtiments sous Autocad. Les données sont en 2D. Nous nous en sommes servis pour créer les indices de forme, les surfaces de visibilité.
- Vue de profil : la rugosité, les fractales, la hauteur des bâtiments, etc. Les données sont en 2D.
- Vue 3D : elle sera mise en œuvre dans OpenMorph 3D : Modélisation par étage et modélisation volumique (calcul des indices de formes volumiques, pour des volumes de visibilité, et non plus uniquement des surfaces de visibilité).

4.2.2.2.1 – Le profil horizontal

4.2.2.2.1.1 - La modélisation des espaces vides

Les ondes radioélectriques vont se propager dans l'espace au niveau des espaces vides. Il est donc important de pouvoir analyser ces espaces ouverts, de pouvoir les détecter, les visualiser, et de disposer des données géographiques permettant de les décrire, de les quantifier [indicateurs morphologiques (indices de forme, fractales), surface, etc.].

Pour modéliser le bâti/non bâti en milieu urbain dense, nous avons procédé de trois manières différentes :

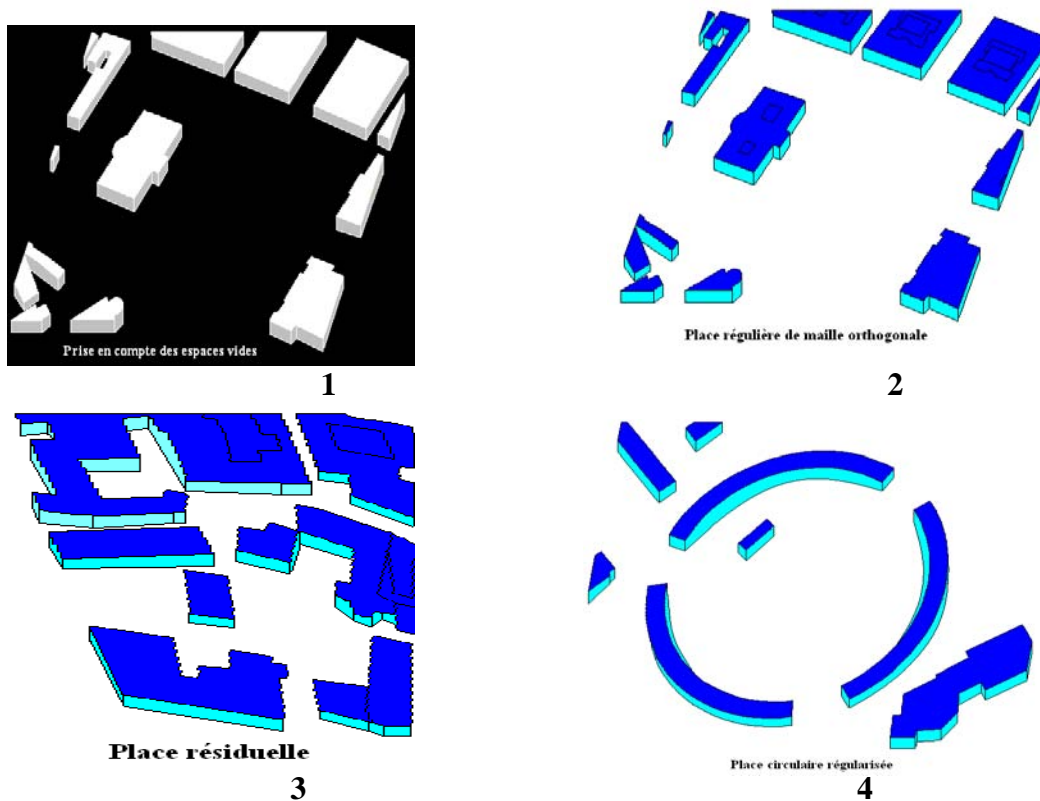
1. le calcul des surfaces de visibilité en 2D, mais pour différentes hauteurs du sol : un calcul de surface de visibilité pour chaque étage, donc tous les 2,5 mètres (hauteur moyenne d'un étage).
2. Ou bien un calcul de visibilité pour 3 hauteurs : un calcul au niveau du sol, un calcul pour H_{\max} (la hauteur maximale de sursol, par exemple la hauteur d'un bâtiment relevé au niveau du toit) et un calcul pour la hauteur médiane $H_{\text{méd}}$ de sursol ($0,5 \times H_{\max}$)
3. On peut également choisir de calculer les surfaces de visibilité « intermédiaires » non pas pour la hauteur moyenne, mais lorsqu'il y a des variations brusques dans le profil vertical (donc présence d'enfoncement dans le bâti, bâtiments moins hauts que les autres autour, etc.).

4.2.2.2.1.2 - La modélisation des places en milieu urbain

La détection des espaces vides en milieux urbains nous a permis de faire une classification des surfaces de visibilité optique selon leur forme et de mettre en évidence le lien existant entre le type d'occupation du sol et la forme des surfaces de visibilité. En ce qui concerne les places, nous avons fait une classification en trois types de places :

- Les places régulières, carrées, orthogonales : par exemple la figure 268.2, qui correspond à la place située devant le Tribunal de Strasbourg.
- Les places résiduelles, de petite taille et de forme très irrégulière : par exemple la figure 268.3, qui correspond à une place située au Centre-ville de Strasbourg.
- Les places circulaires régularisées, qui sont peu présentes à Strasbourg, à part au niveau des grands ronds-points, etc. : un exemple de place circulaire est représentée par la 268.4, qui correspond à une place située dans la commune de Cronenbourg.

Comme dans notre travail, nous nous sommes d'abord intéressé aux espaces vides, parce que les ondes radioélectriques se propagent à travers les espaces vides, nous avons choisi de mettre en évidence par des couleurs foncées (noir ou bleu) ces espaces ouverts. L'image noir/blanc ainsi obtenue va pouvoir être utilisée dans des études fractales (Badariotti, 2002), de rugosité surfacique, de détection de contours en milieu urbain [limites de quartiers, limites de la zone bâtie d'une agglomération, c'est-à-dire la Zone Morphologique Urbaine (Weber, 2002)].



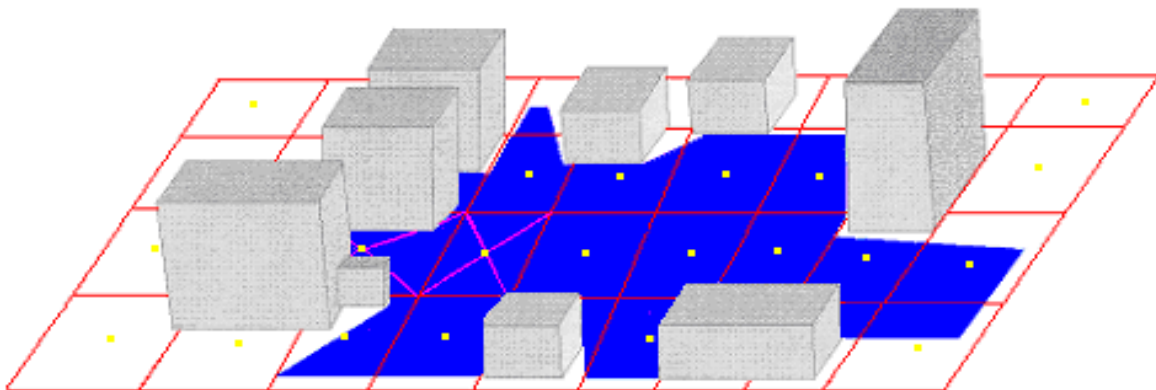
Sources : C. Turck, LIV, 2004.

Figure 268 : Modélisation vectorielle en 3D sous ArcView : Visualisation des bâtiments et des différents types de places à l'aide des fonctionnalités du SIG

4.2.2.1.3 - La généralisation du calcul des surfaces de visibilité

Dans une seconde phase de travail nous avons généralisé le calcul des surfaces de visibilité à l'ensemble d'une zone géographique, dans un format raster (une grille de points réguliers), puis dans un format maillé (une grille de mailles). Le calcul des surfaces libres s'effectue en chaque point de la grille, qui a un pas régulier, par exemple de 50 mètres en milieu rural et 10 mètres en milieu urbain dense. On obtient alors les résultats de calculs des surfaces de visibilité (visualisation de la forme, aire, périmètre, etc.) ainsi que les calculs des indicateurs morphologiques correspondants (indices de forme, fractales, etc.). La figure 268 illustre le calcul d'une surface de visibilité en mode vecteur pour une distance de visibilité maximale de 500 mètres. Le point de calcul de cette surface est situé au centre de la surface. Nous avons appliqué une grille régulière de points au-dessus de la couche vectorielle (grâce au SIG), à un pas de 50 mètres, puis nous avons refait les calculs de visibilité optique et de morphologie en mode point, ce qui nous a permis d'obtenir des résultats plus fins, mais aussi beaucoup plus lourd en mémoire. Or l'opérateur doit pouvoir disposer de ces données morphologiques pour l'ensemble de la France, afin de pouvoir utiliser la modélisation géographique indirecte (morphologie, rugosité, etc.) dans ses outils d'ingénierie.

De ce fait avons converti les données géographiques pointées en données géographiques maillées en appliquant une table de transcodage (méthode d'interpolation spatiale : affectation des coefficients calculés pour un point (surface, indices morphologiques, etc.) à l'ensemble de la maille correspondante. Nous obtenons ainsi une grille maillée de variables morphologiques qui sera stockée dans une base de données géographiques et pourra être utilisée en modélisation radiomobile ainsi que dans la plateforme d'ingénierie OpenMorph, qui contient le module permettant de calculer les variables morphologiques.



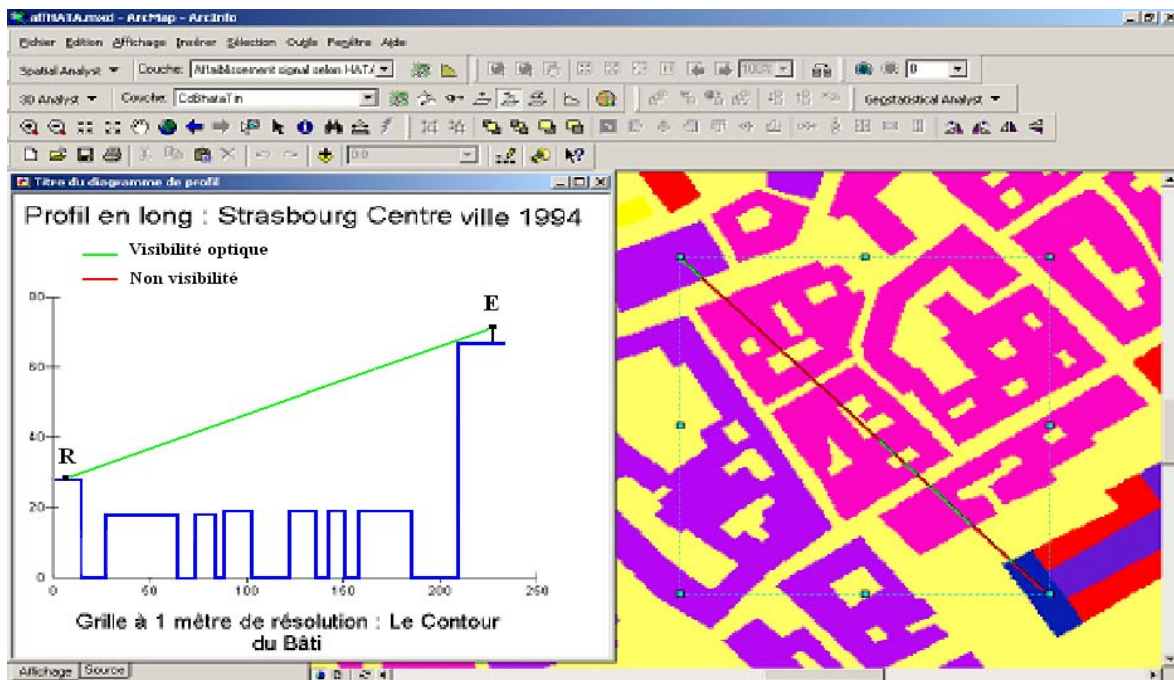
Sources : C. Turck, LIV, 2004.

Figure 269 : Visualisation en 2,5 D de la surface de visibilité pour la place Kléber à Strasbourg. Calcul maillé.

4.2.2.2.2 – Le profil vertical

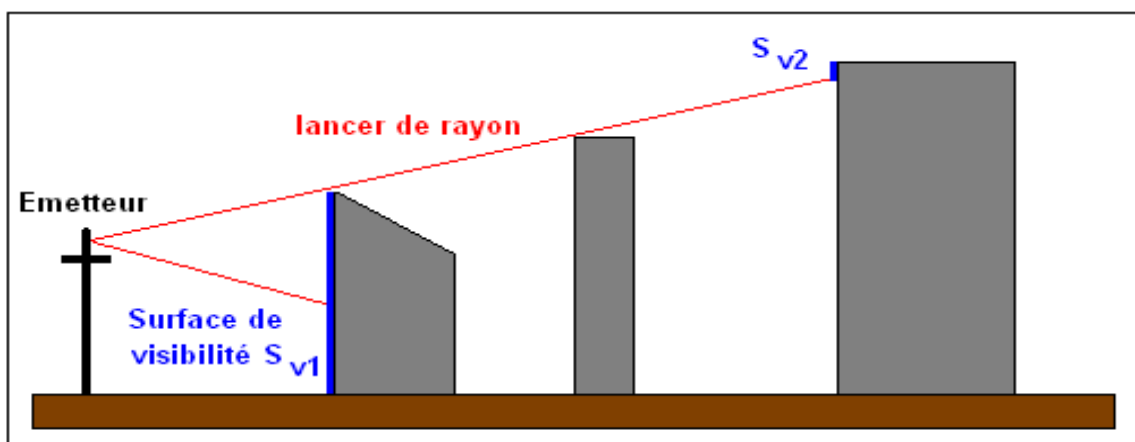
4.2.2.2.2.1 - La modélisation du bâti et des espaces vides

Le SIG ArcInfo 8 dispose en standard d'une fonction d'étude de la visibilité optique à partir d'un point, dans le module *3D Analyst*, qui permet d'obtenir automatiquement pour une variable donnée [altitude du sol, hauteur du sursol, etc.] le profil en long entre deux points. Le calcul de la visibilité optique [sous la forme d'un rayon dont la couleur varie selon que l'on soit en visibilité ou pas (vert si visibilité, rouge si obstacle)] est également disponible en standard dans le SIG (figure 270).



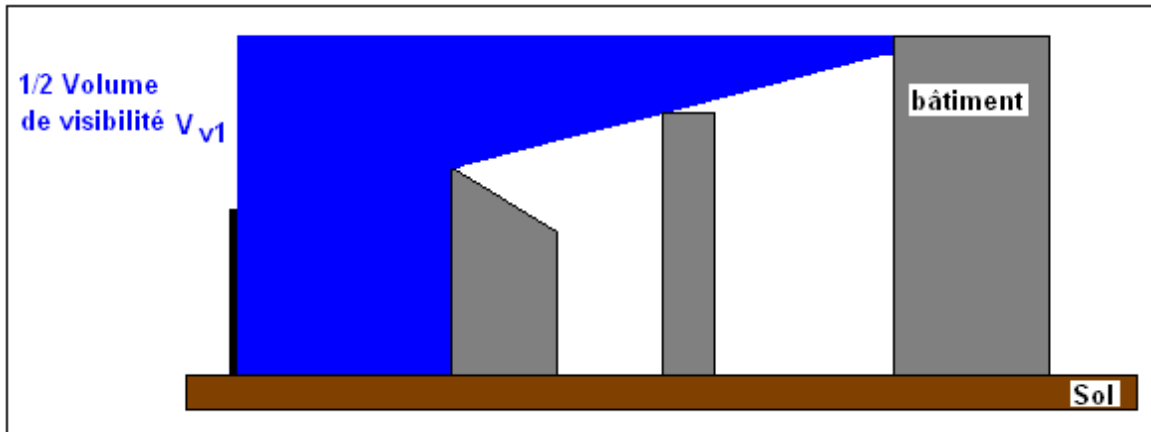
Sources : C. Turck, LIV, 2004.

Figure 270 : Exemple de fonctions disponibles dans le SIG : la visibilité optique en mode plan et en mode profil (Module 3D Analyst) : le profil de visibilité



Sources : C. Turck, Laboratoire Image et Ville, 2005.

Figure 271 : Visualisation des surfaces de visibilité dans le plan vertical (façades)



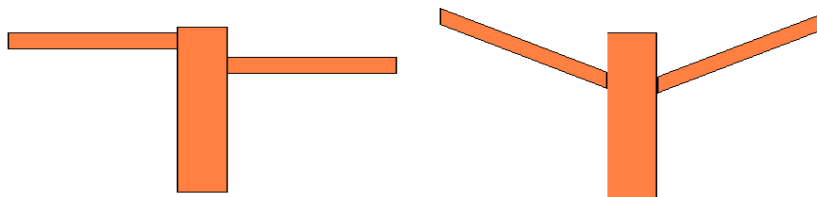
Sources : C. Turck, Laboratoire Image et Ville, 2005.

Figure 272 : Visualisation d'un demi volume de visibilité dans le plan vertical (profil)

4.2.2.2.2 – Cas particulier : Modélisation des arbres

Les arbres peuvent jouer le rôle d'obstacle à la propagation des ondes radio UHF dans certains cas (fréquence de 900 Mégahertz dans notre étude) : les branches et le tronc des arbres dont le diamètre est supérieur ou égale à la longueur d'onde ($\lambda = 32$ centimètres) vont jouer le rôle d'obstacle à la propagation des ondes radio. On va donc modéliser les arbres sous la forme de polygones représentant chacun le tronc et les grosses branches de l'arbre, comme illustré sur la figure 273. Cette figure est une simplification à l'extrême de la forme d'un arbre, mais elle permet de modéliser efficacement la propagation des ondes en milieu boisé.

Dans le cas de la propagation des ondes pour d'autres fréquences, la longueur d'onde sera différente, ce qui induit que la taille des objets à prendre en compte sera également différente. Prenons l'exemple du GPS. Il utilise des micro-ondes, et la longueur des ondes radio est de l'ordre du millimètre. Ainsi les objets de très petite taille comme les feuilles des arbres, les petites branches, la rugosité des façades des bâtiments, la pluie, etc., vont fortement atténuer la propagation des ondes radio reçues et envoyées par le GPS. De ce fait, la modélisation des arbres et des autres éléments (bâti, atmosphère, etc.) sera différente (résolution plus fine, précision demandée plus importante, etc.).



Sources : C. Turck, LIV, 2004.

Figure 273 : Modélisation vectorielle des arbres

4.2.2.2.3 – La troisième dimension, le volume

4.2.2.2.3.1 - La modélisation des espaces vides en 2,5D

Considérant un point de position connue, la zone qui correspond à l'espace libre autour de ce point est délimitée (son périmètre). Cette représentation ne prend en compte que l'espace visible à partir de ce point, car ce point est assimilé à un récepteur. La zone 2D ainsi représentée s'apparente à une surface de visibilité.

Afin d'obtenir des indices morphologiques en trois dimensions on refait les calculs de lancer de rayon, mais en prenant en plus en compte la hauteur du sursol.

Dans l'algorithme de lancer de rayon, on implémente le calcul du rayon non pas par une surface visible S_{Vi} en 2D, mais par le volume visible, V_{Vi} , correspondant. Les volumes en visibilité obtenus sont beaucoup plus complexes, car les bâtiments n'ayant pas tous la même hauteur, les ondes vont pouvoir passer au dessus des toits dans certains cas. Les calculs des indices morphologiques en 2,5D pour ces volumes de visibilité seront également plus complexes. Une illustration d'un volume de visibilité est présentée sur la figure 274.

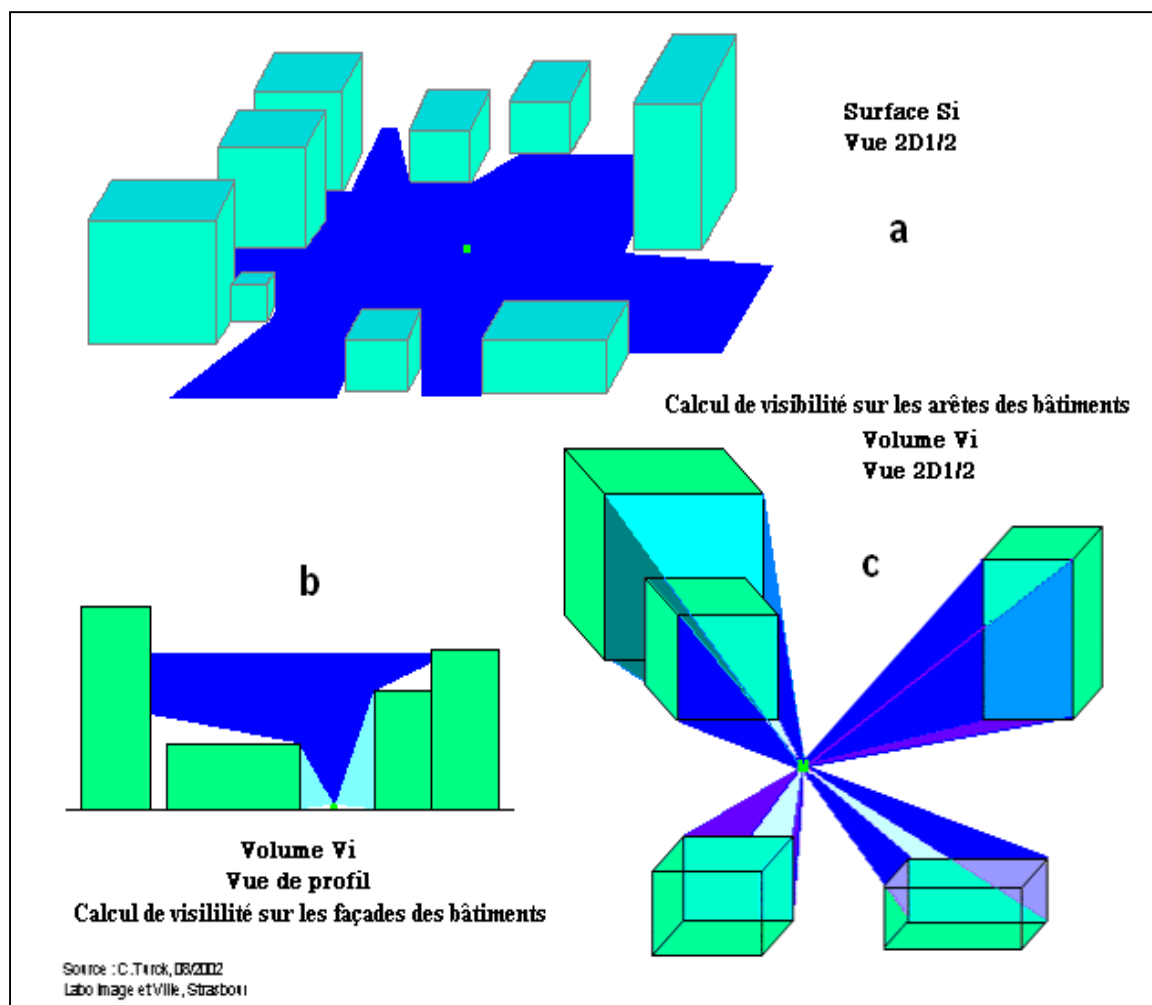


Figure 274 : vue 2D1/2 des surfaces de visibilité, Strasbourg

Nous avons pris en compte les calculs non plus sur des surfaces en 2D, mais sur des volumes en 3D : nous avons calculé des volumes de visibilité optique.

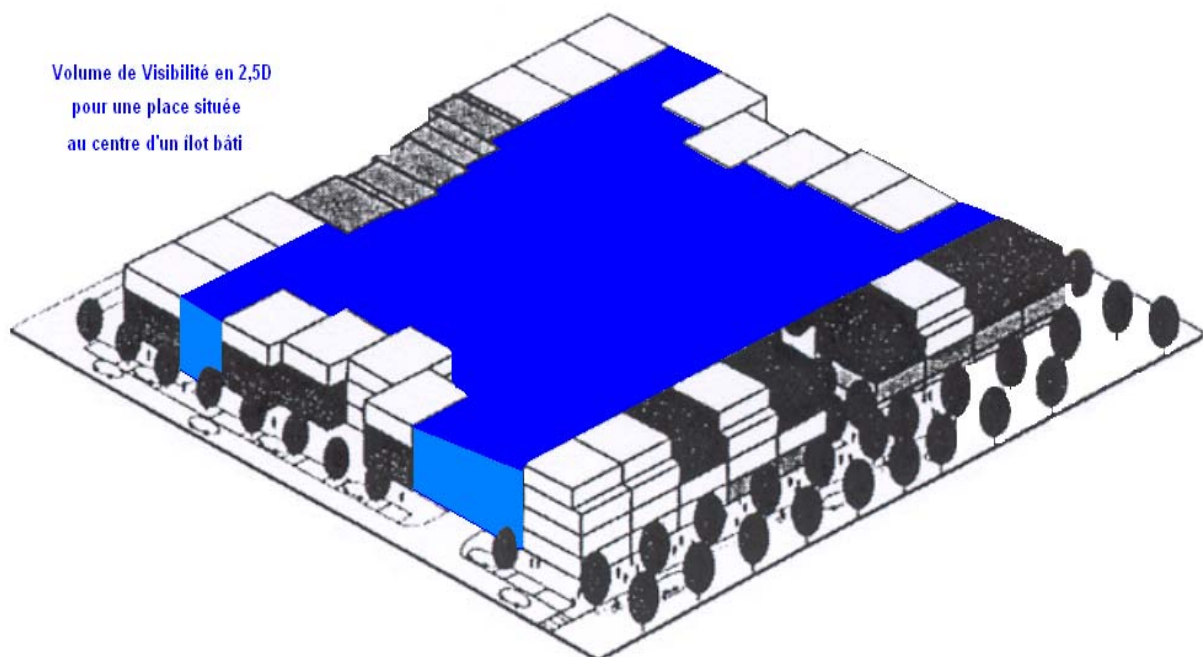
Les indices de forme ont également été modifiés pour prendre en compte la notion de volume. On utilise la géométrie dans l'espace. On effectue des calculs non plus sur des pixels, mais sur des **voxels** en 3D.

Dans la vue horizontale (figure 274.a) tel un plan d'architecture, on visualise la visibilité optique au niveau du sol. Mais dans la réalité, sur le terrain, les objets géographiques (bâti, bois, etc.) ne sont pas planes. Il est donc nécessaire de prendre en compte le profil vertical, ainsi que la troisième dimension Z, correspondant à la hauteur du sursol. On calcule donc d'une part une surface de visibilité en coupe verticale (figure 271), ainsi qu'une « surface » de visibilité en 3D : un **volume de visibilité** V_{vi} (figure 272).

En terme de propagation radioélectrique, ce qui est important c'est que le téléphone mobile soit visible depuis l'émetteur (ou bien puisse recevoir les contributions indirectes du signal par réflexion, diffraction, etc.), ainsi que la taille de la surface de visibilité.

Sur la figure 271 on voit bien que la surface de visibilité S_{v2} est beaucoup plus petite que la surface de visibilité S_{v1} .

Sur la figure 274.b et 274.c on visualise le mode de calcul des volumes de visibilité en 2,5 D pour des zones de bâti dense (prise en compte du point d'impact des lancers de rayons sur les façades et les arêtes des bâtiments).



Sources : C. Turck, Laboratoire Image et Ville, 2005.

Figure 275 : Visualisation d'un volume de visibilité en 2,5 D pour une place située au centre d'un îlot bâti

Sur la figure 275 nous visualisons un volume de visibilité V_{vi} en 2,5 D. Les limites du volume de visibilité correspondent aux façades des bâtiments et à une distance maximale de lancer de rayon égale à 200 mètres pour cet exemple. Le volume de visibilité obtenu est de forme compacte, assez rectangulaire.

4.2.2.2.3.2 - La modélisation des objets urbains : le bâti

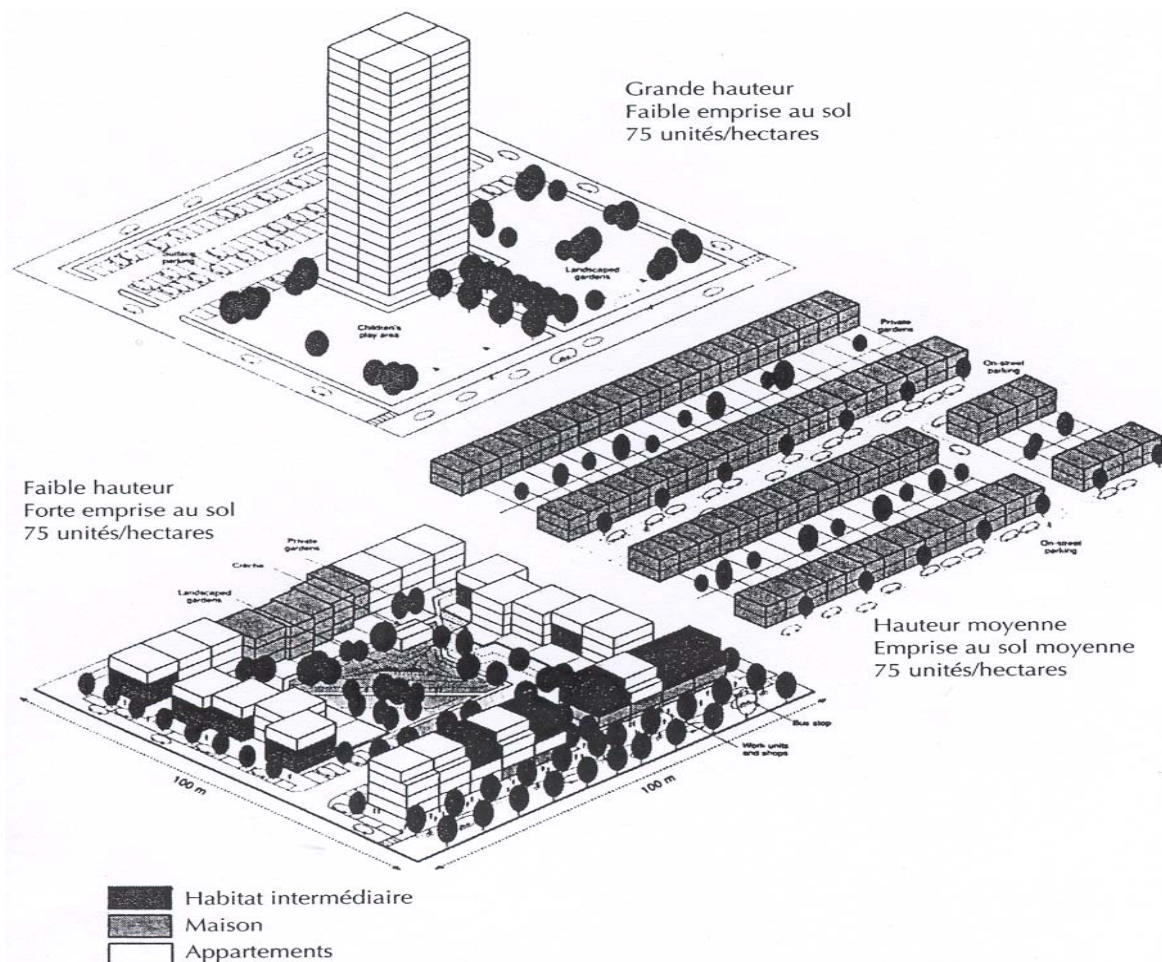
Le bâti : le volume, la densité, l'emprise au sol

Le rapport entre surfaces bâties et surfaces non bâties, la disposition des objets urbains (bâti) et des espaces vides, sont des variables importantes à prendre en compte pour analyser et modéliser le milieu urbain.

La figure 276 représente un exemple de visualisation de trois types formes urbaines obtenues pour une même densité du bâti à l'îlot :

- Ilot comportant un seul immeuble-tour au centre de la l'îlot,
- Ilot comportant des maisons de villes à un alignement des voies sur le parcellaire étroit,
- Ilot comportant des immeubles collectifs de faible hauteur.

Le bâti (ou les surfaces de visibilité) peut être modélisé en 3D sous la forme de volume, de polygones, qui vont être modélisés de manière assez aisée grâce au SIG ArcInfo, qui fonctionne en mode vecteur.



Sources : Rogers Report, *Department of Environment, Norwich.*

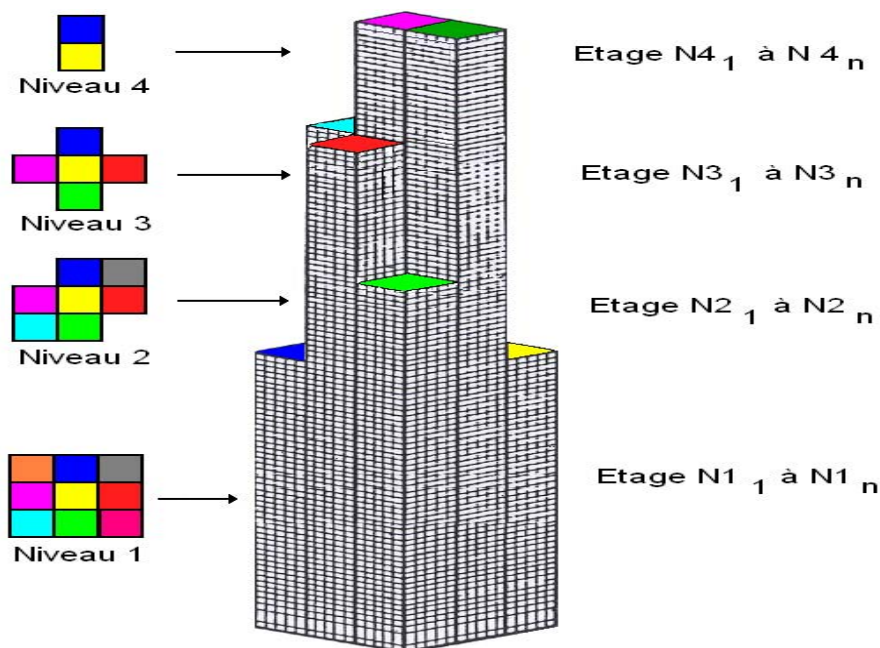
Figure 276 : Modulation morphologique de la densité

Modélisation volumique et cellulaire d'un immeuble

Une tour d'immeuble est un objet géographique complexe, et qui doit être décomposé en sous unités afin de pouvoir être analysé et modélisé efficacement. Nous l'avons donc décomposé en plusieurs volumes (voxels) de forme régulière (forme carré ou rectangulaire).

Ensuite, nous avons modélisé les paliers où il y avait des modifications de la forme de l'immeuble. La modélisation du palier, du niveau (niveau 1 à 4 sur la figure 277) s'effectue sous la forme de cellules élémentaires de même taille (mailles régulières).

La figure 277 illustre l'utilisation d'une telle méthode de modélisation d'une tour d'immeuble sous la forme de plusieurs volumes sur lesquels sont accolées les mailles.



Sources : C. Turck, 2005, d'après R. Allain, 2004.

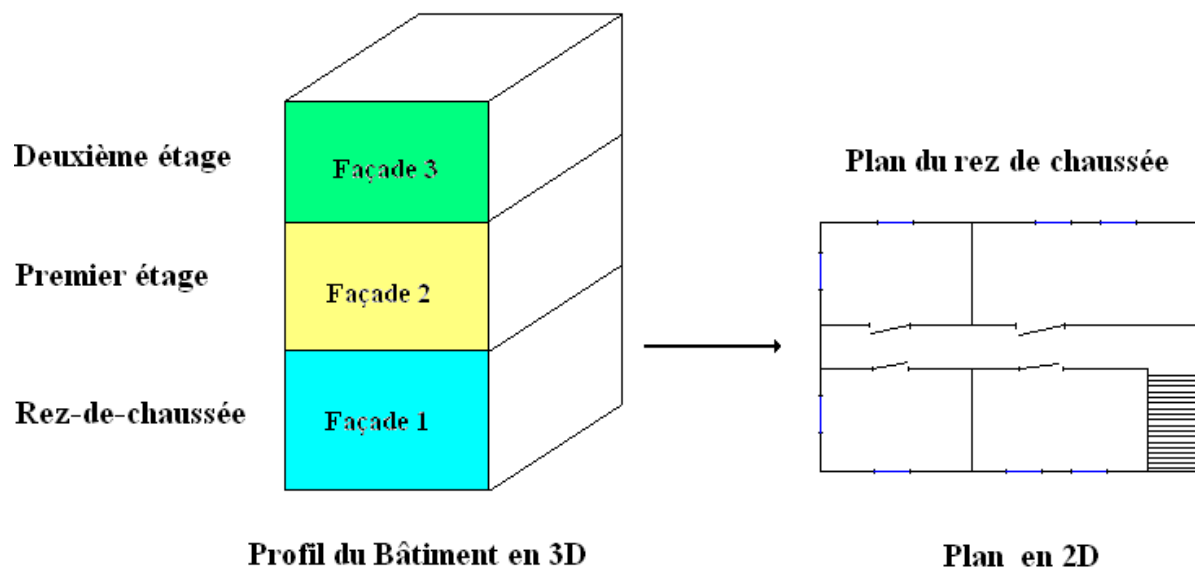
Figure 277 : Modélisation d'un immeuble par cellules et par étages : l'exemple de la Sears Tower à Chicago aux USA.

Modélisation vectorielle des étages et des façades

Les façades des bâtiments sont un élément important à prendre en compte dans la propagation des ondes radio parce qu'elles peuvent présenter des aspérités de surfaces de taille importante (pierre de taille, ornements de façades, balcons, enseignes, etc.) qui vont jouer de rôle d'obstacle à la propagation des ondes radio (900 MHz).

Pour les micro-ondes (le GPS par exemple) la rugosité de façade, le type de revêtement (pierre, métal, bois, etc.) va avoir une influence encore plus grande sur l'atténuation du signal radio. Il est donc important d'intégrer la modélisation des façades dans le modèle OpenMorph. Ceci a donc été fait, en mode vectoriel, comme représenté sur la figure 278. Chaque façade d'un bâtiment a été subdivisée en un polygone régulier (un rectangle) dont les limites correspondent aux limites de chaque étage. Le type de revêtement utilisé (pierre, béton, etc.) ne varie pas au sein d'un même étage, mais à la limite de deux étages).

Un deuxième élément important à prendre en compte en terme de propagation du signal radio est la propagation à l'intérieur des bâtiments. Comme nous l'avons vu dans la deuxième partie du mémoire, deux types de modèles prédisent la propagation des ondes à l'intérieur des bâtiments : les modèles de pénétration et les modèles indoor. Nous avons donc modélisé l'intérieur des bâtiments par étage en 2D (figure 278) et en 3D. Ce type de modélisation est fréquemment utilisé par les architectes et les urbanistes. Les données géographiques utilisées sont des plans de bâtiments au format vectoriel DXF.



Sources : C. Turck, LIV, 2004.

Figure 278 : Modélisation vectorielle du bâti : les étages et les façades

5 - Conclusion de la troisième partie

Dans cette dernière partie, nous avons proposé des solutions afin d'améliorer les modèles de propagation radio grâce à une approche géographique : une meilleure prise en compte du milieu géographique, principalement en milieu urbain, du fait de sa complexité et de la forte influence des objets géographiques (bâti, infrastructures, réseaux, etc.) sur la propagation des ondes radio ; une utilisation de nouvelles données géographiques directes et indirectes (indicateurs morphologiques, modélisation spatiale en deux et trois dimensions). Nous avons également évalué la qualité des données géographiques utilisées par les opérateurs de télécommunication dans leur modèles de propagation d'ondes radio, afin de mettre en évidence les limites des performances des modèles radio dues soit à une mauvaise prise en compte des données géographiques dans la modélisation, soit à une mauvaise qualité des données géographiques elles-mêmes (erreurs géométriques, résolution, etc.), soit encore à une Information Géographique trop imprécise (résolution des données trop faible, pas assez de données géographiques caractéristiques du milieu). Nous avons proposé l'utilisation de nouvelles variables géographiques directes et indirectes (indicateurs morphologiques) qui permettent de caractériser plus efficacement le milieu en présence.

Dans cette troisième étape de notre recherche nous avons présenté de nouvelles approches algorithmiques (géomatiques) du calcul de couverture de champ radioélectrique. Nous avons introduit de nouvelles données géographiques : les indicateurs morphologiques dans les calculs radio. Ces données permettent de classer l'environnement en vastes zones géographiques homogènes du point de vue morphologique.

Ceci soulève la question suivante : Quels sont les critères géographiques à utiliser pour modéliser l'espace terrestre ?

Deux types de données géographiques ont été mis en œuvre de manière complémentaire :

- Les mesures géographiques « classiques », directes : clusters bâtis, surfaces en visibilité optique (espaces ouverts), densité bâti, altitude et pente du sol, type d'occupation du sol (clutter), distance émetteur-récepteur, etc.
- Les mesures indirectes : indicateurs morphologiques, dimensions fractales (géométrie fractale des objets géographiques), coefficients de rugosité, etc.

L'utilisation d'un Système d'Information Géographique, nous a permis d'évaluer l'apport d'un logiciel dédié à l'Analyse Spatiale pour la modélisation d'un phénomène physique : la propagation des ondes radioélectriques pour un espace géographique donné. Enfin l'utilisation du SIG nous a permis de développer une plateforme d'ingénierie radio, prénommée OpenMorph, qui effectue les calculs d'ingénierie radiomobile (calculs d'affaiblissement radio pour différents modèles, etc.). Le modèle OpenMorph comporte également un module dédié à la modélisation géographique, à l'analyse spatiale du milieu géographique en présence : ce module effectue une étude de la morphologie du milieu, grâce aux calculs d'indicateurs morphologiques. Ces calculs permettent d'obtenir toute une série de données géographiques directes (altitudes, types d'occupation du sol, etc.) et indirectes (indices de forme, dimensions fractales, surfaces et volumes de visibilité en 2D et 3D, etc.), qui permettent de caractériser plus efficacement le milieu géographique en présence, et permettent ainsi d'améliorer la prédiction de l'affaiblissement du signal radio par les modèles de propagation d'ondes radioélectriques. L'influence des éléments naturels et anthropiques (relief, bois, champs, eau, bâtiments et infrastructures) et de la précision des données géographiques sur la qualité de la modélisation de la propagation radioélectrique a été mise en évidence. Afin de valider le modèle, une simulation du modèle OpenMorph a été effectué sur Strasbourg : le calcul des données géographiques et le calcul de l'affaiblissement radio selon le modèle de Hata a été effectué pour l'ensemble de la Communauté Urbaine de Strasbourg.

Conclusion générale

L'objectif principal de la recherche a été d'évaluer l'apport de l'**Information Géographique** et de ses outils informatiques (les **Systèmes d'Information Géographique**) pour l'ingénierie des télécommunications radiomobiles.

Les systèmes de télécommunications radiomobiles de deuxième génération (GSM) ainsi que les nouveaux systèmes de télécommunications de troisième génération (UMTS) sont mis en place en France par les opérateurs de télécommunications, en concertation avec les collectivités territoriales (les services en charge de la gestion des réseaux dans les villes, les mairies, les communes, les départements, etc.). Ces réseaux subdivisent le territoire sous la forme de mailles hexagonales comportant une ou plusieurs antennes émettrices au centre de chaque maille. Les outils d'ingénierie servent à dimensionner le réseau, c'est-à-dire à prévoir, à l'aide de modèles de propagation des ondes radioélectriques, la zone de couverture d'une antenne relais, et à positionner de manière optimale les antennes afin de pouvoir couvrir l'ensemble du territoire sans zone d'ombre.

LES RESULTATS OBTENUS

Dans la première partie de notre recherche, nous avons analysé l'histoire du développement des moyens de télécommunications et de la construction des réseaux de télécommunications afin de comprendre pourquoi et comment se sont développés les télécommunications sur le territoire français. Nous avons ainsi pu observer que les réseaux de télécommunication qui structurent l'espace français se sont développés de manière différente selon les régions, selon les époques et selon les politiques locales (choix des lieux d'implantation, choix des technologies de télécommunications, etc.). Nous voulions également comprendre comment se sont mis en place les réseaux de téléphonie radiomobile, quel est le rôle joué par les opérateurs de télécommunications radiomobiles présents sur le marché français, quelles sont les technologies et les normes utilisées, et enfin quels rôles jouent les collectivités territoriales dans le choix des lieux d'implantation des antennes relais (toit des immeubles, pylônes, etc.). Nous avons analysés l'impact sociologique et humain de tous ces nouveaux moyens de communication (NTIC) sur notre société, car en fin de compte c'est bien l'être humain qui est au centre de toute problématique de télécommunication, puisque c'est lui qui cherche à communiquer avec un Autre.

Dans la seconde partie de notre recherche, nous avons étudié les outils d'ingénierie radiomobile déjà en exploitation auprès des opérateurs : les plateformes d'ingénierie, les outils de calculs radio, les outils de visualisation des données radio et des données géographiques, **les différents modèles de propagation des ondes radioélectriques, les différentes bases de données géographiques utilisées**, afin de mettre en évidence les points à améliorer en terme de modélisation radioélectrique : **la prise en compte de l'Information Spatiale dans la modélisation radio**, le type de données géographiques utilisées en entrée des modèles de propagation, la qualité des données géographiques (précision, sémantique, mise à jour, coût, échelle, etc.). Nous avons ainsi constaté qu'il existe des limites, des entraves à une modélisation radio optimale due à une mauvaise prise en compte de l'information géographique dans les modèles radio préexistant, ainsi qu'à une mauvaise utilisation de ces données géographiques dans la modélisation radio.

Dans la troisième partie de notre recherche, nous avons proposés des solutions afin **d'améliorer la prise en compte de l'environnement** dans lequel les ondes radioélectriques se propagent : une meilleure prise en compte du milieu géographique, principalement en **milieu urbain**, du fait de la complexité et de la forte influence des objets géographiques (bâti,

mobilier urbain, etc.) sur la propagation des ondes radio, grâce à l'utilisation de données géographiques directes et indirectes (**indicateurs morphologiques**, modélisation en deux et trois dimensions, etc.).

Nous avons évalué la qualité des données géographiques utilisées dans les modèles de propagation d'ondes radio, afin de mettre en évidence **les limites** des performances du modèle dues à une mauvaise prise en compte des données géographiques dans la modélisation, soit à une mauvaise **qualité** des données géographiques elles-mêmes (erreurs géométriques, résolution, etc.), soit à une information géographique trop imprécise. Nous avons ainsi proposé l'utilisation de nouvelles variables géographiques directes et indirectes (indicateurs morphologiques) qui permettent de caractériser plus efficacement le milieu en présence.

L'utilisation d'un **Système d'Information Géographique**, nous a permis d'évaluer l'apport d'un logiciel dédié à **l'Analyse Spatiale** pour la modélisation d'un phénomène physique : la propagation des ondes radioélectrique à travers l'espace géographique. L'utilisation du SIG nous a amené à développer une plateforme d'ingénierie radioélectrique, prénommée **OpenMorph**, qui effectue les calculs d'ingénierie radiomobile (calculs d'affaiblissement radio selon différents modèles, diagrammes d'antennes en 2D et 3D, statistiques sur les mesures radioélectriques, etc.). Le modèle OpenMorph comporte également une modélisation dédiée à l'analyse spatiale du milieu géographique en présence : le module effectue une étude de la morphologie du milieu, par le calcul d'indicateurs morphologiques (indices de forme, fractales, rugosités, modélisation du bâti et des espaces vides en 2D et 3D, etc.). Ces calculs permettent d'obtenir toute une série de données géographiques directes (altitudes, types d'occupation du sol, etc.) et indirectes (indices de forme, dimensions fractales, surfaces en visibilité, etc.), qui permettent de **caractériser plus efficacement le milieu géographique en présence, et ainsi améliorer les modèles de propagation d'ondes radioélectriques** utilisées en ingénierie radiomobile, ainsi que d'apporter de nouvelles pistes de recherche en modélisation géographique, en analyse spatiale.

PERSPECTIVES

- AMELIORATIONS TECHNIQUES A APPORTER AU MODELE OPENMORPH :

Le modèle OpenMorph va être reprogrammé dans **un seul langage de programmation : le Langage C++**. Actuellement, le modèle comporte plusieurs modules dispatchés dans plusieurs logiciels différents, chacun étant programmé dans un langage différent : langage Avenue pour le SIG ArcView3, langage Prolog pour le Système Expert (qui effectue le choix de la résolution optimale et des variables géographiques à utiliser dans les calculs radio), langage C++ pour le modèle de propagation radio dans le module radio d'OpenMorph, langage C++ et Visual Basic dans le SIG ArcView8. L'ensemble des logiciels fonctionnent avec le système d'exploitation Windows.

Nous avons utilisé le Système Expert SWI-Prolog, car c'est un logiciel gratuit que nous avons déjà utilisé auparavant. Il nous paraît intéressant d'utiliser un autre **Système Expert**. Il existe aujourd'hui d'autres Systèmes Experts utilisant des langages standard comme le langage C++, qui sont Open Source, et plus performants. Nous pourrions également y adjoindre **un réseau de neurones**, pour résoudre les questions du choix de la résolution des données géographiques, du choix du type de modèle de propagation à utiliser selon le type de milieu géographique en présence (selon le degré de complexité du milieu géographique).

OpenMorph a été développé à la base à partir du SIG ArcView, en utilisant les bibliothèques ArcObjets. Mais il est tout à fait possible de redévelopper le modèle à l'aide d'un autre **SIG Open Source** tel que GRASS ou le consortium OpenGIS, par exemple. On peut également

choisir de redévelopper le modèle entièrement, sans utiliser de SIG, mais cela ne nous semble pas judicieux, car d'une part ce serait très long à mettre en oeuvre, et les logiciels SIG, même Open Source, sont alimentés régulièrement par la communauté des développeurs, et d'autres part, beaucoup de fonctions présentes dans le SIG seraient très longues et fastidieuses à programmer. Nous préférons donc utiliser les ressources mises en commun gratuitement sur le net par les développeurs travaillant dans le domaine de la géomatique.

Le modèle OpenMorph va être optimisé et complété par de nouvelles **extensions** : Implémentation du modèle sous forme de logiciel indépendant ne dépendant plus d'une plateforme d'ingénierie dédiée aux télécoms ; Implémentation du modèle en trois dimensions (rajout de la variable Z, utilisation des règles de topologie dans les algorithmes) ; Création d'**un modèle unique** (choix automatique de la modélisation radio par le Système Expert en fonction des caractéristiques géographiques). Il serait également intéressant de développer un module de calcul en quatre dimensions intégrant l'infographie et le multimédia (norme VRML ou norme plus récente) et la variable « Temps ». Ceci permettrait de modéliser la mobilité des personnes, des voitures, des phénomènes, etc.

Dans le module d'Analyse Spatiale : pour le calcul de variables indirectes : Création d'un module d'analyse fractale en 2D et 3D (dimension fractale, densité fractale) ; étude des contours des bâtiments en vue horizontale et en coupe de profil, ainsi qu'en vue volumique (volume fractal) ; Création d'un module d'analyse de la rugosité en 2D et 3D (rugosité de profil Z_0 , rugosité surfacique en 3D) ; Rajout de 16 indices de forme aux 9 indices de forme déjà implémentés dans le modèle OpenMorph.

- TRANSFERABILITE METHODOLOGIQUE DU MODELE OPENMORPH A D'AUTRES DOMAINES D'ETUDES EN MILIEU URBAIN :

Le but final du modèle OpenMorph est de pouvoir être utilisé en tant qu'outil d'analyse morphologique et de modélisation spatiale, dans des applications scientifiques variées, comme par exemple l'étude des nuisances sonores en milieu urbain, l'étude de l'ensoleillement en ville, l'étude de la pollution atmosphérique, etc.

Une phase de test, avec une autre problématique, comme par exemple la modélisation de la pollution atmosphérique, soit un modèle météorologique, permettrait de valider l'utilisation du modèle OpenMorph dans un contexte scientifique plus large.

Pour conclure, nous pouvons dire que l'Information Géographique joue un rôle essentiel dans la modélisation des phénomènes de transmission des ondes radio à travers l'espace géographique. Il est important que les concepteurs de systèmes de télécommunications radiomobiles et de plateformes d'ingénierie en aient conscience, afin d'améliorer la qualité de leur outils de modélisation radio, et de pouvoir optimiser l'implantation des antennes relais de leur réseau de téléphonie radiomobile.

Depuis deux ans, les opérateurs de télécommunications et les constructeurs d'équipements dédiés aux télécommunications ont pris conscience de l'intérêt que représentait pour eux l'utilisation de la Géomatique et d'une Information Géographique de qualité.

On assiste à une forte augmentation des achats de SIG et d'outils de géolocalisation ou de géomarketing par les grands groupes de télécoms (France Télécom, SFR, Bouygues, les call centers, Alcatel, Sagem, etc.).

Références bibliographiques

ABRY P., GONÇALVES P., LEVY VEHEL J., 2002, *Lois d'échelle fractales et ondelettes*, Editions Hermès Sciences, Collection Traitement du signal et de l'image, Paris, vol. 2, 269 pages.

AUGER F., 1999, *Introduction à la théorie du signal et de l'information : cours et exercices*, Editions Technip, 465 pages.

ATTALI J., 1975, *La Parole et l'Outil*, Presses Universitaires de France, Paris.

BARDOT J-P., 1995, *Propagation Radioélectrique avec les mobiles pour les communications personnelles à l'intérieur des bâtiments dans la bande passante 1-3 GHz*, Thèse de Doctorat , Université Paris Sud.

BENNET C., *Different Processes, One Result: The Convergence of Data Protection Policy in Europe and in the United States.*

BERGER G., 1964, *Phénoménologie du temps et prospective*, Presses Universitaires de France, 278 pages.

BERNAUDEAU F., ESCOT F., 1996, *Les mots du Japonais*, Editions Ellipses, Paris, 253 Pages.

BERTHO C. et al., 1984, *Histoire des télécommunications en France*, Editions Erès, Toulouse.

BRETON T., 1994, *Les Téléservices en France : quels marchés pour les autoroutes de l'information ?* , Editions La Documentation française, Rapport pour le Ministère de l'Intérieur et de l'Aménagement du territoire et le Ministère des entreprises et du développement économique.

BROESCH J.D., 1997, *Digital Signal Processing Demystified*, High Text Publications, USA, 175 pages. Traduction française : *Comprendre le Traitement Numérique du Signal*, 1999, traduit de l'anglais par Patrice Nus et Jean-Marie Moureaux, Editions Publitrone/Elector, Paris, 175 pages.

CALHOUN G., 1992, *Radio cellulaire numérique*, éd. Lavoisier.

CAMINADA A., FINKE G., JEDIDI A., *Objective Optimisation of Cells Overlap and Geometry with Evolutionary Algorithms*, EvoWorkshops Conference, Coimbra, Portugal, 5-7 April 2004, p 130-139.

CAUVIN C., RIMBERT S., 1976, *Les méthodes de la cartographie numérique. Fascicule 1 : La lecture numérique des cartes thématiques*, Ed. Université de Fribourg, Suisse, 172 pages.

CASTELLS M., 2002, *La galaxie Internet*, Editions Fayard.

CASTELLS M., *La société en réseaux*, Tome 1 à 3, Editions Fayard.

CAUSAC J-P., DEJEAN M., *Radiocommunications : des moyens performants de communications*, in CNES Magazine, octobre 2000, pages 39 à 41, coll. Localisation Satellites.

CHALMOND B., 2000, *Éléments de modélisation pour l'analyse d'images*, éd. Springer, Paris, 331 pages.

CHARTIER-KASTLER C., THU QUANG P., 1989, *MERISE appliquée : conception des systèmes d'information. De la théorie à la pratique. Méthode et outils.*, éd. Eyrolles, Paris.

CHARNU P., 1975, *De l'histoire à la prospective*, Editions Robert Laffont, Paris.

COMMISSION EUROPEENNE – Livre Blanc, décembre 1993, *Croissance, compétitivité, emploi – Les défis et les pistes pour entrer dans le XXI^{ème} siècle.*

COLLET C., 1992, *Systèmes d'information géographique en mode image*, éd. Presses polytechniques et universitaires romandes, 186 pages.

COSTER M., CHERMANT J.L., 1985, *Précis d'analyse d'images*, Editions du CNRS, Paris.

COST 231, 1999, *Evolution of land mobile radio (including personal) communications*, Final report "Information, Technologies and Sciences", European Commission.

De La LOSA A., 2000, *Modélisation de la troisième dimension dans les bases de données géographiques*, Thèse de doctorat en Sciences de l'Information Géographique, Université de Marne-la-Vallée, 175 pages.

De La LOSA A., CERVELLE B., 1999, *3D topological modeling and visualisation for 3D GIS*, in Computers & Graphics, 10 pages.

DELMAS J-P., 1987, *Probabilités et télécommunications : exercices et problèmes commentés*, éd. Masson, 238 pages.

DELORAINÉ M., 1974, *Des Ondes et des Hommes*, Editions Flammarion, Paris.

DESCARTES R., 1637, *Le Discours de la méthode*, Editions Livre de Poche, Collection G.F., réédition de 2000, 189 pages.

DESPLANQUE, 1992, *GSM le radiotéléphone de la décennie 90*, in Commutation & Transmission, NO. 1, éd. France Télécom.

DEYGOUT J., 1994, *Données fondamentales de la propagation radioélectrique*, éd. Eyrolles, coll. de la Dir. des Etudes et Recherches chez Electricité de France, 192 pages.

DHOME M. *et al*, 2003, *Perception visuelle par imagerie vidéo*, Editions Hermes Science, Collection Traitement du signal et de l'image, Paris, 330 pages.

De LUCA J., 1988, *Dictionnaire des Télécommunications : anglais-français*, éd. Masson, 401 pages.

FABIEN N., *Les télécommunications européennes, entre dérégulation et « autoroutes de l'information »*, MédiasPouvoirs, n°37, 1^{er} trimestre 1995.

FALCONER K., 1990, *Fractal geometry: Mathematical foundations and applications*, Editions John Wiley and Sons.

FAUGERAS O., 1998, *De la géométrie au calcul variationnel : théorie et applications de la vision tridimensionnelle*, In 11^{ème} Congrès RFIA, janvier 1998.

FENEYROL M., GUERARD A., 1994, *Innovation et recherche en télécommunications : progrès techniques et enjeux économiques*, éd. CNET-ENST, 316 pages.

FRANCE TELECOM, Direction Générale/Délégation à la Communication., 1995, *France Télécom. Mémoires pour l'action*, Editions France Télécom.

GEOEurope, mai 2000, *GIS in Telecoms*, pages 28-30 : *Geoinformation : a singular advantage in a cellular age*, pages 32-33 : *Planning a logical approach to network infrastructures*, GEOEurope The geographic technologie magazine for the British Isles, mainlandEurope, the Middle East and Africa.

GLOWINSKI A., 1980, *Télécommunications – Objectif 2000*, Collection technique et scientifique des télécommunications, Ed. Dunod, Paris.

HATA M., 1980, *Empirical formula for propagation path loss in land mobile radio services*, IEEE Trans. Veh. Tech., vol. 29, n°3, pages 317-325.

HERAULT J., JUTTEN C., 1994, *Réseaux neuronaux et traitement du signal*, Editions Hermès, Paris.

HUDSON H. E., 1988, *A bibliography of telecommunications and socio-economic development*, éd. Artech House, 241 pages.

INSTITUT ROYAL DE FRANCE, 1833, *Rapport concernant le procédé de téléphonie de M. Sudre*, Imprimerie royale, Paris.

JANCOVICI J.-M. , octobre 2000, Note de synthèse sur le télétravail, Ministère de l'industrie–Mission pour le développement durable, Secrétariat d'Etat à l'Industrie, Paris.

JOLION J.-M., 1994, *Computer Vision Methodologies, CVGIP : Image Understanding*, vol. 59, n°1, Pages 53-71.

JOLION J.-M. *et al.*, 2001, *Les systèmes de vision*, Editions Hermès Science, Collection traitement du signal et de l'image, Paris, 367 pages.

KOEHL M., 1999, *Modélisation géométrique et sémantique en milieu urbain : intégration dans un système d'information topographique tridimensionnel*, Thèse de doctorat, ENSAIS, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 292 pages.

LACROIX J.-G. *et al.*, 1994, *De la Télématic aux autoroutes électroniques. Le Grand Projet reconduit*, Presse de l'Université du Québec, Sainte-Foy.

LAGRANGE X., GODLEWSKI P., TABBANE S., 1999, *Réseaux GSM-DCS*, éd. Hermès, coll. Réseaux et Télécommunications, Paris, 479 pages.

LASPOUGEAS P., PAJUSCO P., BIC J.-C., October 2000, *Spatial radio channel model for UMTS in urban small cells area*, European Conference on Wireless Technology (ECWT'00), pages 118-121.

LAURINI R., MILLERET-RAFFORT F., 1993, *Les bases de données en géomatique*, éd. HERMES, coll. Traité des nouvelles technologies. Géomatique, Paris, 340 pages.

LECOY P., 1999, *Technologie des télécoms*, éd. Hermès, coll. Réseaux et télécommunications, Paris, 364 pages.

LEE Y. W., 1960, *Statistical theory of communication*, éd. J. Wiley, 509 pages.

LENGELLE R. et al, 2002, *Décision et reconnaissance des formes en signal*, Editions Hermès Science, Collection Traitement du signal et de l'image, Paris, 319 pages.

LÉVY VÉHEL J., Mignot P., 1994, *Multifractal segmentation of images*, in *Fractals*, vol. 2, n°3, Pages 371-377.

LÉVY VÉHEL J., 1996, *Introduction to the multifractal analysis of images*, in Fisher Y. (dir.), *Fractal image encoding and analysis*, Editions Springer-Verlag, New-York.

LIBOIS L. -J., 1958, *Faisceaux hertziens et systèmes de modulation*, Collection scientifique du CNET, Editions Chiron.

LIBOIS L.-J., 1983, *Genèse et croissance des télécommunications*, Editions Masson, Collection Technique et scientifique des Télécommunications, Paris, 415 pages.

Mc DONNELL R., KEMP K., 1995, *International GIS dictionary*, éd. GeoInformation International, 111 pages.

MAC LUHAN M., 1962, *The Gutenberg Galaxy*, University of Toronto Press, Canada.
Traduction française: 1967, *La Galaxie Gutenberg*, Editions Mame/Seuil, Paris.

MAC LUHAN M., 1964, *Understanding media*, Editions Mac Graw Hill, New-York, USA.
Traduction française : 1968, *Pour comprendre les médias*, Editions Mame/Seuil, Paris.

MAITRE H., 1986, *Contribution to the Prediction of Performances of the Hough Transform*, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 8, n°5, pages 669-674.

MAITRE H., 1992, *Utilisation des modèles numériques de terrain dans les systèmes d'information géographique*, in *Bulletin de l'Association de géographes français ; Télédétection et systèmes d'information géographique*, 1992, Vol. 69, NO. 5, pages 374-379.

MAITRE H. et al, 2001, *Traitement des images de radar à synthèse d'ouverture*, Editions Hermès Science, Collection traitement du signal et de l'image, Paris, 357 pages.

MAITRE H. *et al.*, 2003, *Le traitement des images*, Editions Hermès Science, Collection traitement du signal et de l'image, Paris, 366 pages.

McGRAW-HILL, 1956, *Radio electronics*, 487 pages.

MARCHAND M., 1987, *La grande aventure du Minitel*, Editions Larousse, Paris.

MARCHAND M., *Histoire d'une innovation : la télématique en France et à l'étranger, 1972-1987*.

MOISY S., 1999, *Pour une représentation tridimensionnelle du milieu intra urbain*, Mémoire de DEA, Faculté de Géographie, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 75 pages.

MOLENAAR M., 1998, *An introduction to the theory of spatial object modeling for GIS*, éd. Taylor & Francis, 246 pages.

MOLES A., 1986, *Théorie structurale de la communication et société*, Editions Masson, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Paris, 294 pages.

NORA S., MINC A., 1977, *Rapport sur l'informatisation de la société*, Editions du Seuil, Paris.

NOTAISE J., BARDA J., DUSANTER O., 1996, *Dictionnaire du multimédia : Audiovisuel – Informatique – Télécoms*, éd. AFNOR, 2^{ème} édition, Paris, 903 pages.

OKUMURA Y. *et al.*, 1968, Field Strength and its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Radio Service, *Review of the Electrical Communication Laboratory*, Vol. 16, Numbers 9-10, septembre-octobre 1968.

Online journal publié sur le Net, Alcatel prépare le Webphone, numéro 58, 16 juin 1997.

PANTAZIS D-M., DONNAY J-P., 1996, *La conception de SIG : méthode et formalisme*, éd. Hermès, coll. Géomatique, 343 pages.

:

PERARDEL C. *et al.*, 1991, *Coup de fil. Le téléphone en Lorraine (1884 - 1991)*, Editions de l'Est, Collection Les Référents, Paris, 190 pages.

PONS P., *Tokyo, une ville à l'assaut du ciel*, in *Le Monde*, 11 mai 2002, Paris, France

PORNON H., 1992, *Les SIG : mise en œuvre et applications*, éd. Hermes, Paris, 158 pages.

PRIEUR G., 1996, *Radiofréquences et télécommunications analogiques : théorie, pratique, éléments de technologie*, éd. Masson, Paris, 195 pages.

PUISSANT A., 2003, *Information géographique et images à très haute résolution : Utilité et applications en milieu urbain*, Thèse de Doctorat de l'Université Louis Pasteur, mention Géographie, Laboratoire Image et Ville, Strasbourg, 445 pages.

QUATTROCHI D. A., GOODCHILD M. F., 1997, *Scale in remote sensing and GIS*, éd. Lewis Publisher, 406 pages.

RACHET G., 1998, Dictionnaire de la Civilisation égyptienne, Editions Larousse, Collection Les Référents, Paris, 268 pages

REININGER P., 2000, *Modélisation pour l'optimisation des réseaux cellulaires GSM*, Thèse de doctorat en Sciences, mention Informatique, Université Louis Pasteur, Strasbourg.

REININGER P., CAMINADA A., *Multicriteria design model for cellular network*, *Annals of operations research*, vol. 107, no 1-4, 251-265, 2001.

DE ROSNAY J., 1966, *Le Macrocosome. Vers une vision globale*, Editions du Seuil, Paris

RODEN M. S., 1996, *Analog and digital communication systems*, 4th ed., Prentice Hall, 560 pages.

ROLLAND-MAY C., 1986, *La théorie des sous-ensembles flous et son intérêt en Géographie*, in *L'espace Géographique*, Paris, n° 1, pages 42-50.

ROLLAND-MAY C., 1991, *Automatical Knowledge learning in an expert system for space management and planning*, in *Fuzzy Sets and Systems*, n° 44, pages 341-355.

ROLLAND-MAY C., 2000, *Evaluation des territoires : concepts, modèle, méthodes*, Ed. Hermès science, Paris, 381 pages.

ROUET P., 1991, *Les données dans les systèmes d'information géographique*, éd. Hermes, coll. *Traité des nouvelles technologies : série assistance par ordinateur*, 278 pages.

SALGUES B., 1995, *Les télécoms mobiles*, éd. Hermès, Paris, 187 pages.

SANDERS L., 1990, *L'analyse des données appliquées à la géographie*, Alidade, RECLUS, 267 pages.

SANDERS L., 1992, *Géographie et Statistique*, in Bailly, Ferras, Pumain Eds., *Encyclopédie de Géographie*, pages 273-294.

SANDERS L. *et all*, 2001, *Modèles en analyse spatiale*, éd. Hermès, Paris, 333 pages.

SCHNELL L., octobre 2000, *Mise en place et évaluation d'une base de données 3D sur l'emprise de la Communauté Urbaine de Strasbourg. Extraction d'indicateurs morphologiques*, Rapport de stage, DESS "Applications des technologies spatiales, Faculté de géographie, Laboratoire Image et Ville, Université Louis Pasteur, Strasbourg, Rapport de stage de 74 pages, Volume cartographique de 54 pages.

SIMON J.-P., 1987, *L'enfance du câble*, éd. du CNET, Paris.

SIZUN H., 1979, *Les perturbations ionosphériques itinérantes de moyenne échelle, étude et recherche de leur source*, Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle, Université de Rennes.

SIZUN H., 2003, *La propagation des ondes radioélectriques*, éd. Springer, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Paris, 355 pages.

SUDRE F., 1844, *Téléphonie ou Télégraphe acoustique (Pratiquée au moyen de quatre sons)*, Imprimerie royale, Paris.

TANZI T-J., LAURINI R., SERVIGNE S., 1998, *Vers un système temps réel d'aide à la décision spatiale*, in *Revue internationale de Géomatique*, Volume 8 : Systèmes d'information environnementaux et d'aide à la décision, n° 3/1998, éd. Hermès, coll. SIGURA, pages 33-46.

THERY G., BONNAFE A., 1994, *Autoroutes de l'Information – Horizon 2015*, Rapport officiel du Ministère de l'Industrie, éd. La Documentation Française, Paris.

THOMAS F., *La régulation politique du téléphone en Allemagne depuis 1877 et son effet sur le développement du système téléphonique.*

THOMPSON G. B., 1969, *Moloch or Aquarius*, Editions du Bell Northern Electric Laboratories, Ottawa, Canada.

TORRES A., 1994, *Qui tirera profit des autoroutes de l'information*, in *Le Monde Diplomatique*, novembre 1994.

TUFFERY C., 1997, *Les SIG dans les entreprises*, éd. Hermes, coll. Géomatique, 126 pages.

TURCK C., 1996, *Les Télécommunications : une nouvelle approche de l'espace*, Mémoire de géographie économique, DEUG 2^{ème} année, Faculté de Géographie, Strasbourg, 55 pages.

TURCK C., 1999, *De Nouvelles Images pour la Géographie*, Mémoire de maîtrise, Strasbourg, 171 pages.

TURCK C., 2000, *Développement sous SWI-Prolog d'un Système Expert pour la simulation du remplissage des conteneurs à papier*, Rapport de stage d'Intelligence Artificielle réalisé dans le cadre du DEA, Laboratoire Image et Ville, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 20 pages.

TURCK C., 2000, *La reconnaissance automatique de forme en milieu urbain et l'analyse diachronique à partir d'images SPOT XS et Panchromatiques : Analyse en Composantes Principales, Classifications*, Rapport de stage de Télédétection réalisé dans le cadre du DEA, Laboratoire Image et Ville, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 61 pages.

TURCK C., 2000, *Utilisation d'un SIG en tant qu'outil d'aide à la prévision et à la décision*, Rapport de stage SIG réalisé dans le cadre du DEA "Systèmes spatiaux et environnement, option environnement urbain", Laboratoire Image et Ville, Strasbourg, 145 pages.

TURCK C., 2000, *Apport de l'Audiovisuel à l'étude de l'organisation socio résidentielle d'une ville. Exemples à Strasbourg*, Mémoire de DEA, Laboratoire Image et Ville, Strasbourg, 195 pages.

TURCK C., juillet 2002, *Génération automatique de zones géographiques multi niveaux pour le calcul de champ radioélectrique*, Rapport d'Etude, France Télécom FTR&D, Belfort et Laboratoire Image et Ville, Strasbourg, 152 pages.

TURCK C., novembre 2002, *Détermination des indices de forme géographiques à Strasbourg, en vue d'une étude des corrélations entre "images géographiques" et "images radioélectriques" du champ propagé*, Rapport d'Etude, France Télécom FTR&D, Belfort et Laboratoire Image et Ville, Strasbourg, 60 pages.

TURCK C., mai 2003, *Contribution des indices de forme géographiques à la modélisation radioélectrique des réseaux radiomobiles GSM 900 MHz*, Rapport d'Etude, France Télécom FTR&D, Belfort et Laboratoire Image et Ville, Strasbourg, 150 pages.

TURCK C., WEBER C., THÔME D., 2002, *Prédiction de couverture de champ radioélectrique pour les réseaux radiomobiles : L'apport de l'Analyse Spatiale et des Systèmes d'Information Géographique. Application en Milieu Urbain*, in Actes de la Conférence « Les quatrième journées d'études sur la Propagation électromagnétique dans l'atmosphère du décimétrique à l'angström », 13-15 mars 2002, Rennes, France, 5 pages.

TURCK C., WEBER C., THÔME D., 2002, *Prédiction de couverture de champ radioélectrique pour les réseaux radiomobiles : L'apport du Système d'Information Géographique ArcInfo 8*, In Actes de la Conférence SIG2002, 02-03 octobre 2002, ESRI France, Paris, 15 pages.

TURCK C., WEBER C., THÔME D., 2003, *The contribution of morphological indexes to radio propagation modelling. Application to urban environment*, in Actes de la Conférence ECWT (European Conference on Wireless Technology) 2003, 06-10 octobre 2003, Munich, Allemagne, 5 pages.

TURCK C., BADARIOTTI D., 2004, *Apport de l'Analyse Fractale et des Indices de Forme à l'étude morphologique des espaces géographiques. Application en Milieu Urbain*, 6 pages. In Colloque GEOPOINT 2004 : La Forme en Géographie, 01-02 juin 2004, Université d'Avignon, France.

TURCK C., BADARIOTTI D., WEBER C., 2005, *Morphological indexes and fractal dimensions: a new type of geographical data for environmental classification*, 5 pages, PSIP'2005, Fourth International Conference on Physics in Signal and Image Processing, 31 janvier-02 février 2005, Institut National Polytechnique et CNES, Toulouse, France.

TURCK C., WEBER C., BADARIOTTI D., 2005, *The contribution of morphological indexes and fractal dimensions to radio propagation models in urban environment*, 8 pages. In Actes de la conférence ECPS'2005, European Conference on Propagation and Systems, 15-18 mars 2005, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Brest, France.

TURCK D., 1997, *Politiques publiques et mise en place des expérimentations dans le domaine des Technologies de l'Information et de la Communication*, Mémoire de DEA, Ecole Normale Supérieure, Département de Sciences Sociales et de Sciences Politiques, Cachan, 121 pages.

TURPIN E., 1999, *Des télécoms à l'Internet : économie d'une mutation*, Editions Eyrolles, Collection technique et scientifique des télécommunications, Paris.

UNION INTERNATIONALE DES TELECOMMUNICATIONS, 1965, *Du sémaphore au satellite*, Editions de l'IUT, Genève, Suisse. Ouvrage publié à l'occasion du centenaire de l'UIT.

VIALLA J.-L. *et al*, 2002, *Lexique des règles typographiques en usage à l'imprimerie nationale*, Presses de l'Imprimerie Nationale, 197 pages.

WEBER C., 1995, *Des chiffres et des images*, in DUREAU F., WEBER C. (eds), *Télédétection et Systèmes d'Information Urbains*, Anthropos, Paris, pages 295-307.

WEBER C., 1997, *Système urbain et information multisource*, *Habilitation à diriger des recherches*, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 147 pages + annexes.

WEBER C., 2000, *Remote sensing data used for urban agglomeration delimitation*, in J.P. Donnay, M.J. Barnsley, P.A. Longley (eds), *Remote Sensing and Urban Analysis*, GISData 9, Taylor & Francis, London, Pages 155 – 172.

WEBER C., 2002, *Images satellitaires et milieu urbain*, Ed. Hermès, Paris.

WEBER C. *et al.*, 2005, *Images satellites*, *Revue Internationale de Géomatique*, Ed. Hermes.

WHITNEY HALL J., 1995, *Japan from Prehistory to Modern Times*, Ed. Tut Books, Tokyo, 397 pages.

WU Y., BARDINET C., MAITRE H., 1992, *Intégration des bases de données 2-D et 3-D dans les SIG*, in *Bulletin de l'Association de Géographes français ; Télédétection et systèmes d'information géographique*, vol. 69, NO. 5, 1992, pages 380-392.

Lexique

Abscisse :

Sur un axe orienté, c'est la distance d'un point à l'origine (0), comptée algébriquement.

Abscisse curviligne :

Sur un axe courbe, c'est la distance d'un point à un autre, comptée algébriquement. Les abscisses curvilignes sont notamment utilisées dans la gestion des points de repères routiers, la position des émetteurs et récepteurs radiomobiles, etc.

Altitude :

1. Hauteur, en valeur Z ou altitude verticale d'un objet au-dessus (ou en dessous) d'un datum de référence donné (par exemple, le niveau de la mer).
2. Hauteur au-dessus de l'horizon (mesurée en degrés) à laquelle une source lumineuse éclaire une surface, servant à calculer l'ombre d'une colline ou à contrôler la position de la source lumineuse dans une scène pour un ombrage à la volée.

Altitude relative :

Élévation verticale d'un point par rapport à un autre.

Amplitude :

Ecart ou différence entre les valeurs extrêmes d'une grandeur (amplitude d'une classe d'affaiblissement radioélectrique ou d'un intervalle borné par exemple).

Analyse spatiale :

1. Etude de la position et de la forme des entités géographiques, ainsi que des relations entre elles.
2. Processus de modélisation, d'étude et d'interprétation des résultats de modèles. L'analyse spatiale est utile à l'évaluation des adéquations et des capacités, à la réalisation d'estimations et de prévisions, à l'interprétation et à la compréhension. Il existe quatre types d'analyses spatiales : analyse de superposition et de contiguïté topologiques ; analyse de surface ; analyse linéaire ; analyse de raster.

Arc :

Portion de courbe d'un seul tenant. Un arc est donc tout ou partie d'un segment de droite.

Aplatissement :

Mesure de l'écart entre un ellipsoïde et une sphère. L'aplatissement correspond au rapport entre le résultat de la soustraction du demi petit axe au demi grand axe par rapport au demi grand axe. Connu sous le nom de " f " et souvent exprimé sous forme de rapport. Exemple : 1/298.3. Connu également sous le nom d'ellipticité.

ATM :

(*Asynchronous Transfert Mode*) : avec cette technologie, mise au point par le CNET en 1980, une seule et même technique permet de transmettre des informations numériques de tous types (voix, images, données, etc.) à des débits très élevés (plusieurs mégaoctets par seconde). Afin de supporter des débits très importants, les cellules ATM doivent être transmises grâce à des liaisons en fibres optiques. Cette technique utilisée depuis 10 ans dans le monde entier, permet de créer des réseaux complètement ouverts capables de mettre en relation n'importe quel utilisateur du réseau Internet avec n'importe quel service multimédia.

Attribut :

1. Caractéristique d'une entité cartographique. Les attributs d'une région de recensement peuvent comprendre, par exemple, son étendue, sa population et le revenu moyen par habitant.
2. Caractéristique d'une entité géographique décrite par des nombres, des caractères, des images et des dessins DAO, généralement stockée dans une table et liée à l'entité qu'elle décrit par un identifiant que lui donne l'utilisateur ou que lui affecte le logiciel SIG. Par exemple, les attributs d'un puits peuvent inclure sa profondeur et son débit (litres par minute).
3. Colonne d'une table.

Barycentre :

Point unique d'un espace affine associé à une collection de points de cet espace affectés chacun d'un scalaire et défini par extension, de la notion de centre de gravité.

Base de données :

Ensemble de données organisées, logiquement reliées entre elles et accessibles au moyen d'un logiciel spécialisé : un gestionnaire de base de données. La base de données peut être hiérarchisée, relationnelle, en réseau ou orientée objet.

BLR :

Boucle Locale Radio

BSC :

le contrôleur de station de base, *Base Station Controller* en anglais.

BTS :

Base Transceiver Station en anglais ; une station d'émission-réception de base, aussi appelée un « relais », correspond à la station émettrice et réceptrice des ondes radioélectriques pour une cellule donnée du réseau de télécommunication radiomobile.

Canal :

Mesure de certaines caractéristiques ou qualités d'une entité observée dans un raster. Les rasters peuvent posséder un ou plusieurs canaux. Par exemple, l'imagerie satellite a généralement de multiples canaux correspondant aux différentes longueurs d'ondes énergétiques tirées du spectre électromagnétique.

Canal raster :

Mesure d'une caractéristique ou qualité des entités observées dans un raster. Certains rasters possèdent un seul canal, d'autres davantage. L'imagerie par satellite, par exemple, possède fréquemment plusieurs canaux représentant des longueurs d'onde d'énergie différentes provenant du spectre électromagnétique.

Caractère :

Les éléments (objets géographiques, pixels) d'un ensemble sont décrits par un caractère. Cela revient à établir une correspondance entre chaque élément i de l'ensemble E , appelé ensemble de départ de l'application et un seul élément x_i d'un ensemble x , appelé ensemble d'arrivée de l'application.

Caractère qualitatif :

Un caractère est qualitatif si ses modalités ne sont pas mesurables. Ces modalités peuvent alors être exprimées :

- Sur une échelle nominale : chaque modalité est exprimée par un nom, un code et les différentes modalités ne sont pas ordonnables.
- Sur une échelle ordinale : chaque modalité est explicitement significative du rang pris par chaque élément pour le caractère considéré (rang de la population couverte par une antenne, de la superficie des surfaces de visibilité par exemple).

Caractère quantitatif :

Les modalités d'un caractère quantitatif s'expriment par des nombres. Ils sont mesurables et repérables et toujours ordonnables :

- sur une échelle d'intervalle : on repère la position de chaque élément par rapport à une origine arbitraire. L'intervalle x_i qui sépare l'élément i de cette origine correspond à la modalité du caractère x pour l'élément i (altitude moyenne, affaiblissement moyen, écart de la part des cadres moyens par rapport à la part moyenne parisienne).
- Sur une échelle numérique quelconque (stock : population, superficie, affaiblissement radio, etc., rapport : densité, taux, part).

Carte :

- On appelle carte, une représentation géométrique plane, simplifiée et conventionnelle de tout ou d'une partie de la surface terrestre et ceci dans un rapport de similitude convenable qui est l'échelle.
- « Représentation conventionnelle, généralement plane, en positions relatives, de phénomènes concrets ou abstraits, localisables dans l'espace ». Comité Français de Cartographie.
- « Représentation réduite, généralisée, mathématiquement précise de la surface terrestre sur un plan montrant la situation, la distribution et les rapports des divers phénomènes naturels et sociaux, choisis et définis en fonction du but de chaque carte. La carte permet également de montrer les variations et les développements des phénomènes dans le temps ainsi que les facteurs de mouvement et de déplacement dans l'espace ». Salichtchev.

Cartographie :

Etablissement du levé, du dessin puis de l'édition de cartes et de plans.

Centile :

1. Chacune des quatre-vingt dix-neuf valeurs de la variable au-dessous desquelles se classent respectivement 1%, 2%, 3%, etc., 99% des éléments d'une distribution statistique. Le 50^{ème} centile se confond avec la médiane.
2. Chacune des cent parties d'effectif égal, d'un ensemble statistique ordonné.

Cellule :

Aussi appelée cellule raster ou cellule de grille. Unité uniforme ponctuellement (carré ou rectangulaire) représentant une portion du globe telle qu'un mètre carré ou un mile carré. Chaque cellule de grille est affectée d'une valeur qui correspond à l'entité ou à la caractéristique du site considéré (ex. type de sol, secteur de recensement, classe de végétation).

Cellule de grille :

Voir cellule raster.

Cellule raster :

Unité uniforme ponctuellement (carré ou rectangulaire) représentant une portion du globe telle qu'un mètre carré ou un mile carré. Chaque pixel a une valeur correspondant à l'entité ou caractéristique de ce site telle que le type de sol, le secteur de recensement ou la classe de végétation.

Cercle :

Forme géométrique dont tous les points sont situés à égale distance du centre.

Champ :

Colonne d'une table. Chaque champ contient les valeurs d'un seul attribut.

Champ de vision :

Le champ de vision identifie les cellules d'une grille d'entrée pouvant être visualisées à partir d'un ou de plusieurs points ou lignes d'observation. Il est utile dans les applications où la visibilité d'un objet est importante, par exemple afin de rechercher des emplacements bien en vue pour des tours de transmission ou des endroits discrets pour les parkings ou autres installations.

Chemin de plus grande pente :

Ligne suivant le sens de la plus grande pente sur une surface. Les chemins s'arrêtent au périmètre de la surface ou dans les concavités ou trous de la surface.

Classe :

1. Groupe ou catégorie de valeurs d'attributs.

Dans le cas d'une variable continue, les modalités du caractère ne peuvent être prises en compte une à une, puisqu'il en existe une infinité. On effectue donc une partition dans l'ensemble des valeurs possibles du caractère et l'on constitue ainsi des classes de valeur du caractère délimité par des bornes.

On appelle classe, les parties disjointes de l'ensemble des valeurs du caractère, parties obtenues par la subdivision du domaine de variation du caractère étudié (c'est-à-dire intervalle entre la plus petite valeur de x et la plus grande). Les bornes de la classe définissent l'intervalle ou l'étendue de la classe. Ces intervalles peuvent être égaux ou inégaux. La valeur caractéristique de la classe ou valeur centre de la classe est la moyenne arithmétique de ses valeurs limites.

2. Interface par laquelle un programme d'application accède au système d'exploitation et à d'autres services.

Classe d'entités :

1. Représentation conceptuelle d'une entité géographique. Lorsqu'elles se rapportent à des entités géographiques, les classes d'entités incluent : le point, la ligne, la surface et l'annotation. Dans une géodatabase, il s'agit d'une classe d'objets stockant les entités et ayant un champ de géométrie type.

2. Classification décrivant le format des entités géographiques et des données complémentaires d'une couverture. Les classes d'entités de couverture permettant de

représenter des entités géographiques incluent : le point, l'arc, le nœud, le système d'itinéraire, l'itinéraire, la section, le polygone et la région. Une ou plusieurs entités de couverture permettent de modéliser les entités géographiques. Les arcs et les nœuds peuvent notamment servir à modéliser des entités linéaires telles que les axes des rues. Les classes d'entités tic, annotation, lien et limite fournissent des données complémentaires permettant de gérer et d'afficher les données de couverture.

3. Ensemble de tous les points, lignes, entités polygones ou annotations contenues dans un jeu de données DAO.

Classe d'objets :

Les objets spatiaux (entités) sont stockés dans les classes d'entités d'une géodatabase. Les objets non spatiaux sont, quant à eux, archivés dans des classes d'objets. Une table est une classe d'objets si elle possède une colonne contenant le type de données OID et si chacune de ses lignes correspond à un objet. Dans une géodatabase, le comportement des objets non spatiaux peut être personnalisé.

Classe de relations :

Les objets d'un système du monde réel sont souvent associés de façon particulière à des objets de la base de données. Ces types d'associations entre objets dans la géodatabase s'appellent des relations. Il peut exister des relations entre des objets spatiaux (entités dans les classes d'entités) ou non spatiaux (lignes dans une table) ou entre des objets spatiaux et non spatiaux. Tandis que les objets spatiaux sont stockés dans la géodatabase dans des classes d'entités et que les objets non spatiaux sont stockés dans des classes d'objets, les relations sont stockées dans des classes de relations.

Classe d'entités cotes :

Dans la géodatabase, les cotes sont stockées dans une classe d'entités cotes. A l'instar d'autres entités de la géodatabase, toutes les entités d'une classe d'entités cotes possèdent une position géographique et des attributs et peuvent se trouver à l'intérieur ou à l'extérieur d'un jeu de classes d'entités.

Classe d'entités DAO :

Classe d'entités dans un jeu de données DAO. Un jeu de classes d'entités DAO inclut les classes d'entités correspondant à l'ensemble des points, lignes, polygones ou annotations figurant sur le dessin DAO. Par exemple, un dessin DAO peut contenir deux couches linéaires, l'une représentant des routes, l'autre des limites de parcelles. La classe des entités linéaires d'un jeu de données DAO représente toutes les entités contenues dans les couches routes et limites de parcelles.

Classement :

Processus de tri ou de regroupement de valeurs d'attribut en groupes ou catégories ; tous les membres d'un groupe sont représentés sur une carte par le même symbole.

Coefficient de corrélation :

Nombre mesurant le degré de dépendance de deux variables entre elles. Le coefficient de corrélation linéaire entre x et y est noté r .

$$r_{x,y} = \text{cov}(xy) / \sigma_x \sigma_y \quad \text{avec} \quad -1 \leq r_{x,y} \leq 1$$

Le coefficient de corrélation est une mesure de la relation linéaire.

- Si le coefficient de corrélation ≈ 1 , la relation est linéaire et positive, les deux variables varient dans le même sens.
- Si le coefficient de corrélation ≈ -1 , la relation est linéaire et négative, les deux variables varient dans le même sens.
- Si le coefficient de corrélation ≈ 0 , il n'y a pas de relation linéaire entre les deux caractères. Ils sont donc indépendants.

Coefficient de variation :

Paramètre de dispersion relative.

Le coefficient de variation est égal à l'écart-type divisé par la moyenne. Il est noté $CV(\mathbf{x})$.

Le coefficient de variation de $\mathbf{x} = \sigma_{\mathbf{x}}/\mathbf{x}_m = \sqrt{[1/n \sum (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_m)^2]} / \mathbf{x}_m = [\sum (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_m)^2 / N] / \mathbf{x}_m$

Coordonnées :

Renseignements servant à déterminer la position d'un point sur une surface ou dans l'espace par rapport à un système de référence (coordonnées rectilignes, curvilignes, sphériques).

Comportement :

Propriétés d'un objet dans une géodatabase qui décrit le mode d'édition et de dessin. Le comportement inclut, de manière non limitative, les règles de validation, les sous-types, les valeurs par défaut et les relations.

Comportement personnalisé :

Le comportement est la mise en œuvre d'une méthode de classe d'objets. Un ensemble de méthodes est associé aux objets fournis par ESRI. Un développeur peut choisir d'ignorer une de ces méthodes ou de créer des méthodes supplémentaires. Dans ce cas, on dit que l'objet a un comportement personnalisé.

Coordonnées :

Renseignements servant à déterminer la position d'un point sur une surface ou dans l'espace par rapport à un système de référence (coordonnées rectilignes, curvilignes, sphériques).

Covariance :

Moyenne des produits de deux variables centrées sur leurs espérances mathématiques et servant à définir leur coefficient de corrélation.

Décile :

1. Chacune des neuf valeurs de la variable au-dessous desquelles se classent respectivement 10%, 20%, etc., 90% des éléments d'une distribution statistique. Le 5^{ème} décile se confond avec la médiane.
2. Chacune des dix parties d'effectif égal d'un ensemble statistique ordonné.

DECT :

Digital European Cordless Telephone. Norme européenne de téléphone sans fil, sur la bande 1880-1900 MHz. Numérique et utilisant la compression, elle est de meilleure qualité que les systèmes analogiques précédents, et assure en plus la confidentialité des communications car les canaux ne se recouvrent plus.

Densité :

Fonction Spatial Analyst qui répartit la quantité ou l'amplitude des observations de points ou de lignes sur une unité de zone pour créer un raster continu, par exemple la population par kilomètre carré.

Déphasage :

Différence de phase entre deux phénomènes alternatifs de même fréquence. Dans notre cas le phénomène alternatif correspond à la propagation des ondes radioélectriques

Diagramme de profil :

Diagramme de la hauteur d'une surface le long d'une ligne spécifiée.

Domotique :

Technologies électroniques automatisant les fonctions de l'habitat : télésurveillance, énergie, gestion des stocks, mémoire des préférences (température du bain,...), éclairage déclenché automatiquement par des détecteurs de présence, salle de bains permettant un diagnostic quotidien (poids, pression sanguine, rythme cardiaque dans le prototype de Philips).

Extrusion :

Transformation d'un objet géographique en deux dimensions (polygone correspondant au bâti dans notre cas) en un objet géographique à trois dimensions (un cube, un volume).

Fading :

Terme anglais qui signifie « affaiblissement, dispersion », et qui désigne les phénomènes d'affaiblissement liés à des variations rapides du signal radioélectrique.

Fonction spatiale :

Opération effectuant une analyse spatiale. Toutes les opérations spatiales de l'interface utilisateur Spatial Analyst sont classées en fonctions spatiales : par exemple distance, pente ou densité.

Forme :

Définition du Petit Larousse Illustré (2002) : (Du Latin *forma*). Aspect, condition. Manière d'être extérieure, configuration des corps, des objets ; aspect particulier. « En forme de » : à l'aspect de ; « Prendre forme » : commencer à avoir une apparence reconnaissable.

En Philosophie : Principe qui détermine la matière et lui apporte une essence déterminée, chez Aristote et généralement en métaphysique. – Chez Kant, ce qui structure la connaissance (lois des pensées, intuitions a priori de la sensibilité), par opposition à *la matière* apportée par l'expérience.

GSM :

Le *Global System for Mobile Communications* ou *GSM* (historiquement « Groupe Spécial Mobile ») est une norme pour la téléphonie numérique mobile TDMA (définition : voir plus loin) européenne de seconde génération. Cette norme a été établie en 1982 par la CEPT (Conférence des Administrations Européennes des Postes et Télécoms), au sein du groupe de travail de l'ETSI (*European Telecommunications Standard Institute*), d'où le nom « Groupe Spécial Mobile » ou « Groupe System Mobile » qui deviendra ensuite « *GSM* ». Le GSM est une norme de communication radiomobile répandue en Europe, définissant un réseau cellulaire, qui utilise un multiplexage temporel. Les premiers réseaux GSM commerciaux ont été déployés à partir de 1991. Il existe deux fréquences : 900 et 1800 Mhz. Cette dernière,

plus tolérante aux appels émis ou reçus à l'intérieur des bâtiments, n'évite pas pour autant l'effet "cage de Faraday" qui y est associé. Début 1998, la téléphonie mobile comptait déjà 5,6 millions d'utilisateurs : Itinériss (France Télécom), devenu depuis Orange, comptait 3 millions d'abonnés, SFR (Cégétel) comptait 2,1 millions et Bouygues Télécom 0,5 millions.

GPRS :

General Packet Radio Service en anglais. C'est un service de transmission des données sans fil basé sur la transmission par paquets. Par exemple l'envoi d'un email depuis le téléphone portable par le biais du système GPRS entraîne sa division en « paquets » d'informations. Chaque paquet s'achemine vers le lieu de destination du message en empruntant l'itinéraire le plus rapide, puis les paquets sont à nouveau assemblés pour reconstituer le message initial.

GPS :

Global Positioning System, dispositif embarqué sur un véhicule permettant de donner sa position grâce à la triangulation d'informations fournies par 24 satellites du type Navstar. Développé par Rockwell avec l'aide du Pentagone, la précision a été dégradée (+ou- 100 m) pour des raisons de sécurité militaire, mais corrigée (+ou- 10 m) par le " dead-reckoning " mesurant vitesse et changements de direction du véhicule . Il est décliné par exemple en "Neverlost " chez Hertz, écran indiquant à l'aide de flèches et circuits la meilleure manière d'atteindre sa destination.

Hiéroglyphe :

Ce mot provient du grec *hieros*, qui signifie « sacré », et *glyphein*, qui signifie « sculpter, graver ». Il désigne les signes de l'écriture égyptienne, qui ornent les parois de tous les monuments égyptiens.

INA :

Institut Nationale de l'Audiovisuelle, localisée à Paris.

Indoor :

Terme anglais qui signifie « à l'intérieur » et qui désigne un milieu de propagation situé à l'intérieur de bâtiments ou d'espaces confinés comme par exemple les couloirs du métro.

MNT :

Modèle Numérique de Terrain.

1. Représentation numérique d'une variable continue sur une surface bidimensionnelle à l'aide d'une plage régulière de valeurs Z référencées par rapport à un datum commun. Les modèles numériques de terrain sont généralement destinés à représenter les reliefs. Ils sont aussi appelés modèles numériques de terrain (MNT).
2. Base de données d'altitudes issues des feuilles de carte élaborées par la National Mapping Division de l'USGS (U.S. Geological Survey).
3. Format des jeux de données numériques d'altitude de l'USGS.

Modèle :

1. Abstraction de la réalité utilisée pour représenter des objets des processus ou des événements.
2. Ensemble de procédures analytiques clairement définies utilisé pour déduire de nouvelles informations.
3. Représentation de données de la réalité (par exemple, modèle de données vectorielles, modèles de données TIN, modèles de données raster).

Modèle raster :

Représentation du monde sous forme de surface présentée selon un quadrillage régulier de cellules. Les modèles raster permettent de stocker des données variant continuellement comme dans une photographie aérienne, une image satellitaire, une zone présentant des concentrations chimiques ou une élévation.

Modèle vectoriel :

Représentation du monde utilisant des points, des lignes et des polygones. Les modèles vectoriels s'avèrent utiles pour représenter et stocker des entités discrètes telles que des limites des bâtiments, des canalisations ou des parcelles.

Modélisation d'adéquation :

Méthode de création d'un modèle pour trouver des emplacements optimaux. Un modèle d'adéquation identifie les emplacements adaptés à l'implantation d'une nouvelle complexe ou d'une route.

Modélisation spatiale :

Procédures d'analyse appliquées avec un SIG. Il est possible d'appliquer trois catégories de fonctions de modélisation à des entités géographiques d'un SIG :

- modèles géométriques (calcul de la distance euclidienne entre entités, génération de tampons, calcul des surfaces et périmètres)
- modèles de coïncidence (superposition topologique)
- modèles de contiguïté (recherche de chemin, redécoupage en secteurs et allocation)

Ces trois catégories prennent en charge des opérations sur les données spatiales et notamment sur des points, des lignes, des polygones, des TIN et des grilles. Les fonctions s'organisent selon une suite d'étapes permettant d'extraire les informations souhaitées à des fins d'analyse.

Morphologie :

Définition du Petit Larousse Illustré (2002) : (Du Grec *morphê*, forme, et *logos*, science). Etude de la forme et de la structure externe des êtres vivants.

Morphogenèse :

Définition du Petit Larousse Illustré (2002) :

1. En Géomorphologie : Création et évolution des formes du relief terrestre.
2. En Embryologie : Développement progressif des organes au cours de la vie embryonnaire.

Morphogène :

Définition du Petit Larousse Illustré (2002) : En Embryologie : Se dit des actions et des agents qui influencent la forme et la structure des organismes.

NTIC :

Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (Internet, Téléphonie mobile, Vidéo et Photographie numériques, etc.)

PDA :

Un assistant numérique personnel est un appareil numérique portable, souvent appelé par son acronyme anglais PDA pour *Personal Digital Assistant*. Le concept est inventé par la société

Apple avec son Newton (1993-1998). Il s'agit de petits ordinateurs, suffisamment légers pour être glissés dans une poche. Ils offrent des possibilités restreintes (agenda, répertoire téléphonique, note pad) mais sont de plus en plus puissants. Leur principal atout est de pouvoir se synchroniser avec un pc : les logiciels qu'ils utilisent sont des versions allégées de celles qui sont utilisées sur un pc traditionnel.

Pente :

Inclinaison ou déclivité d'une surface. La pente d'une face TIN est la pente la plus raide du plan défini par la face. La pente d'une cellule dans un raster est la descente la plus raide du plan défini par la cellule et ses huit voisins environnants. La pente peut se mesurer en degrés à partir de l'horizontale (0-90) ou en pourcentage, ce qui correspond à l'élévation divisée par l'étendue, multipliée par 100. Une pente de 45 degrés est égale à une pente de 100 pourcents. Lorsque l'angle d'une pente est proche de la verticale (90 degrés), la pente en pourcentage tend vers l'infini.

Pente en degrés :

Une des méthodes de mesure de la pente (de 0 à 821190 degrés).

Pente en pourcentage :

Méthode de mesure d'une pente. Avec cette méthode, l'élévation est divisée par le trajet.

Portables 3G ou 2G :

Téléphones portables de 2ème génération : GSM, de troisième génération : Wap, GPRS,

Propagation :

Définition du Petit Larousse Illustré (2002) : Du Latin *propagare*. Fait de se propager, de progresser, de s'étendre de proche en proche.

En Physique : Déplacement progressif d'énergie dans un milieu déterminé. *La propagation des ondes sonores, hertziennes.*

Radiocommunication :

Définition du Petit Larousse Illustré (2002) : Télécommunication réalisée à l'aide d'ondes radioélectriques.

Radioélectrique :

Définition du Petit Larousse Illustré (2002) : Qui se rapporte au rayonnement électromagnétique de longueur d'onde supérieure au millimètre. Synonyme : *hertzien*.

Radioélectricité :

Définition du Petit Larousse Illustré (2002) : Technique permettant la transmission à distance de messages et de sons à l'aide des ondes électromagnétiques.

Radioguidage :

Définition du Petit Larousse Illustré (2002) : Guidage d'un engin mobile (avion, bateau, voiture, etc.) par ondes radioélectriques.

Satellite géostationnaire :

Satellite positionné autour de la Terre, à orbite équatoriale circulaire, dont la période de révolution est égale à la période de rotation de la Terre (c'est à dire géosynchrone). Son altitude est d'environ 36 000 kilomètres.

Service universel :

Il correspond à un service minimum offert par tous les exploitants à tout client, tant au niveau de la téléphonie que de la télématique, et ce quelque soit le lieu de résidence du client, et à des conditions économiques abordables.

Surface :

1. Vue planimétrique d'une entité ou d'une surface polygone.
2. Jeu de données de surface d'une surface en 3D ou de la portion d'une surface au-dessus ou au-dessous d'un plan de référence. La surface se mesure le long de la pente d'une surface et elle est toujours supérieure à l'étendue planimétrique en 2D de la surface. Par rapport à la surface planimétrique, le jeu de données de surface vous donne une idée de l'inégalité de la surface.

Surface :

Ensemble de données continues telles que l'altitude ou la température de l'air sur une zone ou limite entre deux éléments ou processus.

Surface :

Phénomène géographique représenté comme un ensemble de données continues, tel que l'altitude ou la température de l'air sur une zone. Une pause brusque dans les valeurs du phénomène (lignes de fracture) indique un changement important de sa structure (par exemple, une falaise) et non un changement d'entité géographique. Les surfaces peuvent être représentées par des modèles construits à partir de points d'échantillonnage espacés ou non de façon régulière ou à partir de lignes de contour, d'isolignes, de bathymétrie ou d'autres équivalents.

Structure :

Définition du Petit Larousse Illustré (2002) : Du Latin *structura*, de *struere*, assembler.

- Manière dont les parties d'un ensemble concret ou abstrait sont arrangées entre elles ; disposition. *Structure d'une plante, d'une roche. Structure d'un réseau routier. Structure d'un discours.* En Géologie : Agencement des couches géologiques les unes par rapport aux autres.
- Organisation des parties d'un système, qui lui donne sa cohérence et en est la caractéristique permanente. *Structure d'un Etat, d'une entreprise.* En Economie : Ensemble des caractères relativement stables d'un système économique à une période donnée (par opposition à conjoncture).
- Organisation, systèmes complexes considérés dans leurs éléments fondamentaux.
- En Technologie : constitution, disposition et assemblage des éléments qui forment l'ossature d'un bâtiment, d'une carrosserie, d'un fuselage.
- En Philosophie : Ensemble abstrait, ordonné et autonome d'éléments interdépendants aux rapports régis par des lois, faisant fonction de modèle d'intelligibilité des objets étudiés, dans les diverses sciences humaines.
- En Mathématique : Relations dont est muni un ensemble. *Structures algébriques, topologiques.*

TDMA :

Time Division Multiple Access en anglais, ce qui signifie « Partage de liaison par multiplexage temporel ». Le TDMA correspond à une technique de télécommunication permettant de faire circuler plusieurs signaux simultanément sur un support physique ou virtuel. En matière de téléphonie, le TDMA est utilisé pour la téléphonie cellulaire (850 MHz) et PCS (1900 MHz) aux Etats-Unis, dans le réseau D-AMPS avec la norme IS-54/IS-136, ainsi que dans les

réseaux GSM et PDC et pour l'usage local DECT, avec toutefois des implémentations différentes dans chacun de ces réseaux.

Télécommunications :

La définition internationale du terme « télécommunication » qui fut donnée par l'Union Internationale des Télécommunications est la suivante : « On désigne par télécommunication toute transmission, émission ou réception de signes, de signaux, d'écrits, d'images, de sons ou de renseignements de toute nature par fil, radioélectricité, optique ou autres systèmes électromagnétiques ». Télé : « à distance », et « communication ».

Télex :

Le mot « télex » provient d'une contraction de deux termes *anglais Teleprinting Exchange*.

TIN :

Triangulated Irregular Network (réseau triangulé irrégulier). Représentation d'une surface par le biais de points d'échantillonnage espacés irrégulièrement et de lignes pointillées. Le jeu de données TIN comprend des relations topologiques entre des points et leurs triangles voisins. Chaque point d'échantillonnage a des coordonnées x, y et une surface ou valeur z. Ces points sont reliés par les bords pour former un jeu de triangles sans la moindre superposition afin de représenter la surface. Un TIN est également appelé maillage triangulaire irrégulier ou modèle surfacique triangulaire irrégulier.

Transfert à large bande :

On appelle « transfert à large bande » tout transfert d'informations intégrant la voix, les données et les images.

Transpac :

Réseau français de télécommunication numérique à haut débit dédié aux entreprises, qui effectue la transmission des données par paquets. Le réseau *Transpac* utilise le protocole de communication par paquet X 25. Les vitesses offertes varient de 50 bits par seconde à 2 mégabits par seconde. Ce réseau fut créé en juillet 1977, et constitua le premier service de Télématique que la Direction Générale des Télécommunications proposa aux entreprises. Le réseau *Transpac* appartient à la société Equant, qui est une filiale du groupe France Télécom.

UIT :

Union Internationale des Télécommunications. Organisme créé en 1865.

Valeur Z :

Valeur représentée sur l'axe z dans un système de coordonnées x, y, z en trois dimensions. Les valeurs à la surface d'un terrain ou des concentrations chimiques peuvent être utilisées comme des valeurs z lors du rendu de la surface en 3D. Les attributs numériques des entités, par exemple, le nombre d'étages d'un bâtiment peuvent également être utilisés en tant que valeurs z.

Volume :

Espace (exprimé en unités cubes) entre une surface TIN et un plan à une altitude donnée. Le volume peut être calculé au-dessus ou en dessous du plan.

WAP :

Passerelle de conversion de langages, *Wireless Application Protocol* en anglais.

Liste des Figures

Première Partie

Figure 1 : Extrait de la fresque de la Chapelle Sixtine réalisée par Michel-Ange.....	27
Figure 2 : Ecriture du mot « aimer » en langage idéographique chinois.....	31
Figure 3 : L'Alphabet hiéroglyphique.....	33
Figure 4 : L'Alphabet Grec.....	34
Figure 5 : Deux exemples d'écriture idéographique : les caractères chinois et japonais.....	35
Figure 6 : La transmission des nouvelles dans l'Antiquité : utilisation des feux.....	37
Figure 7 : Transmission d'un message par relais lumineux situés aux sommets de hautes montagnes.....	38
Figure 8 : Portrait de Claude Chappe.....	44
Figure 9 : Poste de télégraphie aérienne.....	45
Figure 10 : Ligne télégraphique reliant Paris à Strasbourg.....	46
Figure 11 : Portrait de Samuel Finley Morse.....	47
Figure 12 : Les agents du Télégraphe Electrique.....	48
Figure 13 : Le réseau de télégraphie électrique français : Les principales branches et nœuds du réseau à la fin des années 1870.....	49
Figure 14 : Pose d'un câble sous-marin : les hommes au travail sur le pont du navire câblé.....	51
Figure 15 : Portrait de Philipp Reiss.....	53
Figure 16 : Portrait de Charles Bourseul.....	53
Figure 17 : Portrait de Alexander Graham Bell, l'inventeur du téléphone.....	54
Figure 18 : Poste téléphonique expérimental de Bell.....	54
Figure 19 : Portrait de Clément Ader.....	55
Figure 20 : Poste téléphonique Midlé, 1893.....	55
Figure 21 : Arrivée des lignes téléphoniques sur les toits des bureaux de poste.....	56
Figure 22 : Les téléphonistes dans un central téléphonique à la fin du 19 ^{ème} siècle.....	57
Figure 23 : Nombre de postes téléphoniques de toute nature en France et dans le monde pour la période 1877-1890.....	59
Figure 24 : Première tour hertzienne pour faisceaux hertziens à large bande, située à Neuville d'Aumont entre Paris et Lille.....	75
Figure 25 : Banc de mesure de l'atténuation de transmissions d'une fibre optique.....	81
Figure 26 : Premier système de commutation entièrement électronique français, PLATON, développé par le CNET.....	87
Figure 27 : Cartographie de l'organisation territoriale de France Télécom sur le territoire français en 1993.....	89
Figure 28 : Répartition géographique des Centres de Constructions des Lignes (CCL) en Moselle.....	90
Figure 29 : Histogramme illustrant l'évolution du parc téléphonique en Lorraine entre 1884 et 1991.....	93
Figure 30: Extrait du Tableau de bord, Delta LP, en 1974: Réseau de faisceaux hertziens en Région Parisienne.....	94
Figure 31 : Les réseaux de téléphonie fixes : Croissance des plus grands réseaux mondiaux.....	96
Figure 32 : Les plus gros réseaux fixes à l'horizon 2000 (en milliers de lignes principales).....	96
Figure 33 : Le réseau Transpac en France : Réseau national de transmission de données par paquet.....	97
Figure 34 : Photographie d'un Minitel 1.....	100
Figure 35 : Photographie du premier modèle de poste téléphonique permettant la visioconférence.....	100
Figure 36 : Cartographie du réseau de transmission optique de France Télécom en 1990.....	105
Figure 37 : Exemples de données accessibles grâce au réseau téléphonique : les services du Minitel.....	112
Figure 38 : Le système de transmission satellite mis en place en 1992 par France Télécom pour la retransmission télévisée des Jeux Olympiques d'hiver à Albertville.....	114
Figure 39 : Naissance du réseau Internet.....	115
Figure 40 : Nombre de machines connectées à Internet.....	117
Figure 41 : Photographie des deux combinés Bi-Bop.....	118
Figure 42 : Photographie d'un combiné de téléphonie mobile par satellite.....	118
Figure 43 : Présentation du réseau de téléphonie par satellite Inmarsat.....	120
Figure 44 : Présentation du réseau de téléphonie par satellite Iridium.....	120
Figure 45 : Les réseaux de téléphonie mobile : croissance mondiale du nombre d'abonnés.....	121
Figure 46 : Les réseaux de téléphonie mobile : les principaux parcs d'abonnés (en milliers d'abonnés).....	122
Figure 47 : Répartition des abonnés en 1999 par grandes catégories de réseaux : câbles, mobiles et fixes.....	122
Figure 48 : Tableau de synthèse : Evolution chronologique des télécommunications.....	123

Deuxième Partie

Figure 49 : Inventaire des principaux types de services radioélectriques.....	151
Figure 50 : Exemple de téléphone portable de troisième génération (3G) utilisant la norme UMTS, et intégrant des services de navigation par GPS.....	152
Figure 51 : Classification des fréquences par longueur d'ondes.....	153
Figure 52 : Représentation schématique en 3D de la propagation d'une onde électromagnétique.....	155
Figure 53 : Schématisation d'une liaison radioélectrique.....	156
Figure 54 : Les différentes phases de résolution d'un problème scientifique.....	159
Figure 55 : Le Multi échelle : les cellules du réseau en nid d'abeille.....	162
Figure 56 : Les différentes échelles du réseau radiomobile.....	162
Figure 57 : Exemple de réseaux cellulaires omnidirectionnel, et directionnel.....	163
Figure 58 : Le fonctionnement d'un téléphone mobile.....	164
Figure 59 : Visualisation en 3D, sous SIG (ArcView 8, module ArcScene), des diagrammes d'antenne pour 3 antennes directives implantées sur le même relais.....	166
Figure 60 : Utilisation d'un mobile dans différents types d'environnement géographique.....	169
Figure 61 : Exemple de signal radio mesuré le long d'un parcours routier, avec en vert les mesures brutes (sur lesquelles a été superposé le champ moyen) et en noir la courbe des évanouissements rapides seule (fading)...	170
Figure 62 : Les différents mécanismes de propagation radioélectrique.....	175
Figure 63 : Mécanismes de propagation des ondes radioélectriques en milieu urbain.....	175
Figure 64 : Mécanismes de propagation des ondes radioélectriques en milieu montagneux.....	176
Figure 65 : La Diffraction des ondes.....	178
Figure 66 : Modélisation des obstacles au moyen de « lames de couteaux » en vue 2D et 3D.....	178
Figure 67 : Exemple de profil de diffraction (trait en bleu) calculé par le modèle FTR&D à partir du Modèle Numérique de Terrain (en rouge) et du Modèle Numérique de Surface (en vert).....	179
Figure 68 : La Réflexion des ondes.....	180
Figure 69 : De la réflexion spéculaire à la réflexion diffuse.....	180
Figure 70 : Vue de profil - Critère de Rayleigh : déphasages créés par une irrégularité de surface de hauteur h.....	181
Figure 71 : Vue du dessus - Géométrie d'une réflexion sur une façade de bâtiment.....	182
Figure 72 : La Diffusion des ondes.....	183
Figure 73 : Les différents modèles d'analyse de la diffusion atmosphérique.....	184
Figure 74 : Le guidage des ondes.....	185
Figure 75 : Visualisation en 2D d'un Modèle Numérique de Terrain avec une résolution de 100 mètres, Zone de Strasbourg Centre-ville.....	187
Figure 76 : Visualisation d'un Modèle Numérique de Terrain en 2,5 D, Zone géographique de moyenne montagne.....	187
Figure 77 : Visualisation du Clutter 4 thèmes avec une résolution de 25 mètres, Strasbourg Centre-ville.....	188
Figure 78 : Extraction de la coupe topographique et du profil de diffraction entre l'Émetteur et le Récepteur.....	190
Figure 79 : Visualisation en 2D d'un Modèle Numérique de Surface avec une résolution de 25 mètres, Zone de Strasbourg Centre-ville.....	191
Figure 80 : Visualisation 2D des données géographiques vectorielles : La BD TOPO® de l'IGN - Strasbourg Centre Place Kléber.....	192
Figure 81 : Visualisation 3D de la BD TOPO® de l'IGN - Strasbourg Centre.....	192
Figure 82 : Principe de la mesure du champ radioélectrique en extérieur.....	194
Figure 83 : Méthode d'échantillonnage spatial.....	195
Figure 84 : Exemple de parcours de mesure à Strasbourg.....	195
Figure 85 : Comparaison entre l'altitude du sol et le champ radio prédit par un modèle macro cellulaire rural.....	199
Figure 86 : Modèle macro cellulaire rural CNET-UHF : Coupe de profil entre l'Émetteur et le Récepteur.....	200
Figure 87 : Comparaison entre mesure et prédiction avec un modèle de propagation d'ondes radio classique, Zone géographique : Chamonix, Savoie.....	201
Figure 88 : Comparaison entre mesure et prédiction avec un modèle de propagation d'ondes radio macro cellulaire qui calcule les réflexions sur les flancs des montagnes - Zone géographique : Chamonix, Savoie.....	203
Figure 89 : Profil E-R considéré par le modèle COST-CNET.....	204
Figure 90 : Exemple de profil E-R réel rencontré sur le terrain.....	205
Figure 91 : Paramètres du modèle de Lee.....	206
Figure 92 : Détermination des différentes hauteurs équivalentes de l'antenne d'émission.....	207
Figure 93 : Schématisation du calcul de l'affaiblissement dans le plan horizontal avec le modèle microcellulaire - CNET.....	209
Figure 94 : Visualisation en 2D et en 2,5D du graphe des rues pour un modèle micro cellulaire.....	210

Figure 95 : Profil pour un modèle micro cellulaire.....	212
Figure 96 : Principes du lancer de rayons mis en œuvre dans le modèle RAYON-CNET.....	214
Figure 97 : Lancers de rayons en environnement urbain dense avec le modèle RAYON-CNET.....	216
Figure 98 : Modèle à Tracé de Rayons Outdoor - FTR&D en milieu urbain dense.....	217
Figure 99 : Pertes moyennes mesurées au niveau du signal radioélectrique par transmission pour différents matériaux de construction dans la bande des 1-2 GHz.....	220
Figure 100 : Visualisation des différents trajets de propagation pris en compte dans le calcul de l'affaiblissement radio pour un modèle de pénétration dans un bâtiment.....	221
Figure 101 : Coupe de verticale de profil et coupe horizontale, entre l'émetteur et le récepteur : les variables influentes pour un modèle de pénétration.....	221
Figure 102 : Exemple d'autres contributions radioélectriques reçues par le mobile.....	222
Figure 103 : Phénomènes de propagation des ondes radio en Indoor.....	223
Figure 104 : Exemple de couverture de champ radioélectrique calculée avec un modèle en distance.....	224
Figure 105 : Couverture de champ radioélectrique calculée avec le modèle de Motley-Keenan.....	225
Figure 106 : Visualisation en 2,5D du Tracé de Rayons en indoor avec le modèle à Tracé de Rayons Indoor - FTR&D.....	226
Figure 107: Visualisation en 2D des calculs de tracé de rayons pour l'intérieur des bâtiments à partir du Modèle à Tracé de Rayons CWINS.....	227
Figure 108 : Visualisation de la couverture de champ radioélectrique en indoor obtenue avec le modèle à Tracé de Rayons CWINS.....	227
Figure 109 : Relations entre la position des réflecteurs et diffuseurs dans l'environnement de propagation radioélectrique, et la forme du profil de puissance temporel.....	229
Figure 110 : Utilisation d'un réseau de neurones dans les modèles de propagation.....	230
Figure 111 : Synthèse : Tableau récapitulatif des différents modèles de propagation d'ondes radioélectriques pour les réseaux radiomobiles du type GSM.....	231

Troisième Partie

Figure 112 : Visualisation de la démarche scientifique adoptée dans la thèse.....	241
Figure 113 : Visualisation du Modèle Numérique de Terrain pour la France.....	244
Figure 114 : Visualisation du fichier altitude et sursol pour la ville de Nantes.....	245
Figure 115 : Visualisation du fichier Belfort.ssl.....	247
Figure 116 : Visualisation du fichier axes des routes pour la ville de Belfort.....	248
Figure 117 : Visualisation d'un fichier de facettes de montagne dans les Alpes.....	249
Figure 118 : Visualisation du fichier de facettes de montagnes et du MNT.....	250
Figure 119 : Visualisation en 3D d'un fichier de facettes de montagnes.....	250
Figure 120 : Visualisation du clutter 17 thèmes pour la rade de Brest.....	252
Figure 121 : Visualisation du fichier de sursol localisé pour toute la France : Données de sursol des 16 plus grandes agglomérations françaises.....	254
Figure 122 : Visualisation des données de sursol au pas de 100 mètres pour la ville de Nantes.....	254
Figure 123 : Visualisation du fichier de données géographiques de sursol délocalisé au pas de 400 mètres sur l'ensemble du territoire français.....	256
Figure 124 : Visualisation du fichier d'occupation du sol au pas de 10 mètres pour la ville de Nice.....	258
Figure 125 : Visualisation du fichier d'occupation du sol (reclassification de la couche C 3) et de l'altitude (couche C1) au pas de 10 mètres pour la ville de Nice.....	258
Figure 126 : Visualisation du graphe des rues.....	259
Figure 127 : Visualisation des facettes de montagnes.....	261
Figure 128 : Visualisation de données géographiques bitmap : image scannée de la carte topographique de la commune de Saint-Martin d'Oydes dans le département de l'Ariège.....	262
Figure 129 : Exemple de données géographiques maillées.....	263
Figure 130 : Visualisation de données géographiques vectorielles.....	264
Figure 131 : Visualisation de données attributaires : tableau de chiffres (attributs des bâtiments).....	265
Figure 132 : Visualisation de données attributaires : graphique (diagramme d'antenne).....	265
Figure 133 : Gains de volumes obtenus grâce à une compression appliquée à des données géographiques maillées.....	268
Figure 134 : Exemples de contours vectoriels anormaux.....	270
Figure 135 : Visualisation de la correction automatique sous SIG des données contours de bâtiments au format vectoriel pour la ville de Malmö en Suède.....	272
Figure 136 : Exemples d'anomalies des axes des rues.....	273

Figure 137 : Exemple d'incohérence d'altitude.....	274
Figure 138 : Extraits des contours de base vectoriels en milieu urbain dense.....	278
Figure 139 : Exemple de généralisation du bâti par une méthode d'agrégation.....	278
Figure 140 : Photographie de façades Place Kléber à Strasbourg.....	278
Figure 141 : Principe d'un Modèle Numérique de Terrain.....	279
Figure 142 : Recherche des mailles en visibilité optique.....	279
Figure 143 : Génération des facettes de montagne, à partir des mailles en visibilité, Zone de Chamonix.....	280
Figure 144 : Visualisation des facettes de montagnes en visibilité depuis l'émetteur et le mobile.....	280
Figure 145 : Principe de création d'un TIN : réseau de triangles irréguliers en 2D.....	281
Figure 146 : Principe de création d'un TIN pour une montagne : réseau de triangles irréguliers en 3D.....	282
Figure 147 : Visualisation en 3D de la plaine d'Alsace et des contreforts des Vosges au format TIN. Zone de Phalsbourg – Strasbourg.....	282
Figure 148 : Image à Très Haute Résolution Spatiale (1 mètre) sur Strasbourg.....	283
Figure 149 : Plan topographique de la voirie de surface à grande échelle, Quartier Saint-Michel à Toulouse.....	285
Figure 150 : Visualisation en gros plan des données vectorielles pour le plan topographique de la voirie de surface - Quartier Saint-Michel à Toulouse.....	286
Figure 151 : Exemple de données socio-économiques géolocalisées fournies par l'INSEE : Extrait du fichier SIRENE pour la ville de Caen.....	288
Figure 152 : Image vectorielle source : la BD Topo IGN qui correspond aux contours des bâtiments, avec une résolution métrique.....	290
Figure 153 : Image rastérisée à 1 mètre de résolution.....	290
Figure 154 : Image rastérisée à 5 mètres de résolution.....	291
Figure 155 : Image rastérisée à 10 mètres de résolution.....	291
Figure 156 : Modèle Numérique de Sursol maillé à 25 mètres de résolution sur Strasbourg et sa région.....	292
Figure 157 : Image vectorisée du Modèle Numérique de Sursol sur Strasbourg – Vue en 3 D.....	293
Figure 158 : Modèle Numérique de Terrain Pointé à 25 mètres de résolution – Strasbourg et sa région.....	294
Figure 159 : les différentes catégories de variables géographiques utilisées en modélisation radio.....	298
Figure 160 : Démarche scientifique adoptée afin de valider l'utilisation des indicateurs morphologiques en modélisation des ondes radio.....	299
Figure 161 : Principe du lancer de rayon	300
Figure 162 : Exemple de courbe hypsométrique.....	303
Figure 163 : Profil et rugosité Z_0 en milieu urbain, pour les villes françaises de taille moyenne	307
Figure 164 : Profils et rugosité en milieu urbain : profils différents selon le continent.....	307
Figure 165 : Les principaux indices de forme géométrique.....	308
Figure 166 : Indices de forme : référentiels.....	309
Figure 167 : Valeurs des indices pour les formes de référence.....	310
Figure 168 : visualisation des cercles inscrit et circonscrit.....	310
Figure 169 : valeurs de référence pour l'indice de compacité I_C	311
Figure 170 : Exemples de coefficients de compacité.....	312
Figure 171 : valeurs de référence pour l'indice de circularité.....	314
Figure 172 : Formes caractéristiques présentant la même valeur d'indice I_M	314
Figure 173 : valeurs de référence pour l'indice de forme.....	315
Figure 174 : Valeurs de l'indice I_K pour les formes de référence.....	317
Figure 175 : Exemples de valeurs d'indice I_K	317
Figure 176 : visualisation du rayon circonscrit à un polygone.....	320
Figure 177 : visualisation du rayon inscrit dans un polygone.....	320
Figure 178 : Valeurs des rayons inscrit et circonscrit pour quelques formes géométriques de référence.....	321
Figure 179 : Illustration du Cercle Inscrit et du Cercle Circonscrit à un polygone quelconque.....	321
Figure 180 : Illustration de cercles pseudo inscrit et pseudo circonscrit à une figure.....	322
Figure 181 : Visualisation de la largeur Maximale d'un polygone quelconque.....	323
Figure 182 : Les 9 indices de forme géométrique optimisés (formule calculatoire).....	325
Figure 183 : Visualisation 2D des données géographiques utilisées pour le lancer de rayon : La BD TOPO de l'IGN sur Strasbourg Centre-ville.....	326
Figure 184 : Visualisation en 3D de la BD TOPO de l'IGN sur Strasbourg Centre-ville.....	327
Figure 185 : Visualisation des lancers de rayon : vue générale de Strasbourg, 360 lancers effectués pour chaque point de calcul.....	327
Figure 186 : Visualisation des lancers de rayon : gros plan sur la Place Kléber, 360 lancers effectués pour chaque point de calcul.....	328
Figure 187 : Visualisation des surfaces de visibilité : vue générale de Strasbourg, 360 lancers effectués chaque point de calcul.....	328

Figure 188 : Visualisation des secteurs de visibilité : gros plan sur la Place Kléber, 360 lancers effectués pour chaque point de calcul.....	329
Figure 189 : Calcul de la surface de visibilité en 2D pour la Place Kléber.....	329
Figure 190 : Calcul de la surface libre, vue en 2,5 D pour la Place Kléber.....	329
Figure 191 : surface de visibilité rue "22 novembre" et "Hallebardes".....	330
Figure 192 : surface de visibilité rue "des grandes arcades".....	330
Figure 193 : Visualisation des 285 points de mesure sous ArcView 3 - Strasbourg Centre Place Kléber.....	331
Figure 194 : Visualisation des lancers de rayon et des points de mesures correspondant : Vu générale de Strasbourg Centre Ville - 360 lancers effectués pour chaque point de calcul.....	332
Figure 195 : Visualisation des lancers de rayon : gros plan sur la Place, 360 lancers effectués pour chaque point de calcul.....	332
Figure 196 : Visualisation des surfaces de visibilité optique pour Strasbourg Centre Ville, pour une distance de visibilité maximale de 100 mètres et dans une direction de 140 degrés.....	333
Figure 197 : Vue globale sur l'ensemble de la Communauté Urbaine de Strasbourg : Visualisation du parcours de mesure sous ArcView - Campagne IMPG - 1392 points de mesure.....	334
Figure 198 : Visualisation des lancers de rayon : zoom - 360 lancers effectués pour chaque point de calcul....	335
Figure 199 : Visualisation des surfaces de visibilité: zoom, 360 lancers effectués pour chaque point de calcul.	335
Figure 200 : Extrait de la table attributaire sous SIG pour 9 points de calcul d'indices morphologiques.....	336
Figure 201 : Extrait de la table attributaire sous SIG pour 10 points de calcul d'indices morphologiques. Pour la campagne de mesure VOODLY en milieu urbain dense – Strasbourg Centre-ville.....	337
Figure 202 : Extrait de la table attributaire sous SIG pour 10 points de calcul d'indices morphologiques. Pour la campagne de mesure IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg.....	338
Figure 203 : Corrélations de Bravais - Pearson entre l'affaiblissement radio et les indices de forme, Trajet IMPG.....	339
Figure 204 : Matrice des corrélations de Pearson – Trajet IMPG.....	341
Figure 205 : Tableau des statistiques descriptives – Trajet IMPG.....	342
Figure 206 : Courbe de l'affaiblissement mesuré – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg.....	344
Figure 207 : Courbe du coefficient de forme – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg.....	345
Figure 208 : Surfaces de visibilité et types de milieu géographique présent le long du trajet IMPG dans la CUS.....	348
Figure 209 : Synthèse : surfaces de visibilité et indicateurs morphologiques associés selon le type de milieu géographique présent le long du trajet IMPG dans la CUS.....	349
Figure 210 : Surfaces de visibilité et indicateurs morphologiques associés selon le type de milieu géographique présent le long du trajet IMPG dans la CUS.....	350
Figure 211: Récapitulatif de la démarche adoptée afin d'améliorer la qualité de l'Information Géographique utilisée dans les modèles et les outils d'ingénierie radiomobile.....	353
Figure 212 : Equations de calcul de l'affaiblissement radioélectrique par le modèle de propagation de Okumura-Hata selon le type de milieu géographique.....	360
Figure 213 : Configuration logicielle d'OpenMorph pour le calcul de l'affaiblissement radio par le modèle de Okumura-Hata sous ArcInfo 8.....	363
Figure 214 : Principe d'extraction des classes d'occupation du sol radio dépendantes dans le module d'Analyse Spatiale du modèle OpenMorph (sous le SIG ArcGIS 8)	365
Figure 215 : La démarche méthodologique mise en œuvre : Procédé d'attribution d'une classes d'occupation du sol radio dépendante - Calcul des coefficients de correction du modèle de Okumura-Hata.....	366
Figure 216 : Couverture de champ radio calculée par le modèle de Okumura-Hata sous ArcInfo 8 , Strasbourg Centre-ville - Milieu urbain dense.....	367
Figure 217 : Profil : Localisation de l'Emetteur et du Récepteur, Campagne de mesure COST-CNET2 Trajet IMPG _ Strasbourg 1997.....	368
Figure 218 : Visualisation de la zone d'étude : la Communauté Urbaine de Strasbourg.....	369
Figure 219 : Visualisation d'un modèle numérique de Terrain avec une résolution de 100 mètres, Zone de Strasbourg Centre-ville.....	370
Figure 220 : Visualisation des parcours de mesure en milieu urbain très dense – Strasbourg Centre-ville.....	372
Figure 221 : Nombre de points de mesures pris en compte en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur.....	373
Figure 222 : Evolution de l'affaiblissement mesuré (AMES) et de l'affaiblissement prédit par le modèle de Okumura-Hata (Aff O-H) en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur.....	373
Figure 223 : Variation de l'erreur moyenne de l'affaiblissement radio calculé par le modèle de Okumura-Hata par rapport aux mesures d'affaiblissement collectées sur le terrain.....	374
Figure 224 : Variation de l'écart-type de l'erreur pour l'affaiblissement radio calculé par le modèle de Okumura-Hata par rapport aux mesures d'affaiblissement collectées sur le terrain.....	374

Figure 225 : Tableau récapitulatif des résultats des performances du modèle de Okumura-Hata en milieu urbain très dense (Strasbourg Centre-ville).....	375
Figure 226 : Visualisation des parcours de mesure en milieu urbain dense – Agglomération de Strasbourg.....	376
Figure 227 : Nombre de points de mesures pris en compte en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur.....	377
Figure 228 : Evolution de l'affaiblissement mesuré (AMES) et de l'affaiblissement prédit par le modèle de Okumura-Hata (Aff O-H) en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur.....	377
Figure 229 : Variation de l'erreur moyenne de l'affaiblissement radio calculé par le modèle de Okumura-Hata par rapport aux mesures d'affaiblissement collectées sur le terrain.....	378
Figure 230 : Variation de l'écart-type de l'erreur pour l'affaiblissement radio calculé par le modèle de Okumura-Hata par rapport aux mesures d'affaiblissement collectées sur le terrain.....	378
Figure 231 : Tableau récapitulatif des résultats des performances du modèle de Okumura-Hata en milieu urbain dense (faubourgs de Strasbourg).....	379
Figure 232: Visualisation des parcours de mesure en milieu périurbain, Communauté Urbaine de Strasbourg.....	380
Figure 233 : Nombre de points de mesures pris en compte en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur.....	381
Figure 234 : Evolution de l'affaiblissement mesuré (AMES) et de l'affaiblissement prédit par le modèle de Okumura-Hata (Aff O-H) en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur.....	381
Figure 235 : Variation de l'erreur moyenne de l'affaiblissement radio calculé par le modèle de Okumura-Hata par rapport aux mesures d'affaiblissement collectées sur le terrain.....	382
Figure 236 : Variation de l'écart-type de l'erreur pour l'affaiblissement radio calculé par le modèle de Okumura-Hata par rapport aux mesures d'affaiblissement collectées sur le terrain.....	382
Figure 237 : Tableau récapitulatif des résultats des performances du modèle de Okumura-Hata en milieu urbain dense (faubourgs de Strasbourg).....	383
Figure 238: Visualisation des parcours de mesure en milieu périurbain, Communauté Urbaine de Strasbourg.....	384
Figure 239 : Nombre de points de mesures pris en compte en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur.....	385
Figure 240 : Evolution de l'affaiblissement mesuré (AMES) et de l'affaiblissement prédit par le modèle de Okumura-Hata (Aff O-H) en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur.....	385
Figure 241 : Variation de l'erreur moyenne de l'affaiblissement radio calculé par le modèle de Okumura-Hata par rapport aux mesures d'affaiblissement collectées sur le terrain.....	386
Figure 242 : Variation de l'écart-type de l'erreur pour l'affaiblissement radio calculé par le modèle de Okumura-Hata par rapport aux mesures d'affaiblissement collectées sur le terrain.....	386
Figure 243 : Tableau récapitulatif des résultats des performances du modèle de Okumura-Hata en milieu rural (Communauté Urbaine de Strasbourg).....	387
Figure 244 : Tableau récapitulatif des coefficients de correction à rajouter à l'équation de calcul de l'affaiblissement radioélectrique pour recentrer le modèle de Okumura-Hata selon le type de milieu géographique.....	388
Figure 245 : Tableau récapitulatif des performances du modèle de Okumura-Hata à 900 Mhz.....	388
Figure 246 : Equations générales de calcul de l'affaiblissement radioélectrique par le modèle de propagation de Okumura-Hata optimisé selon le type de milieu géographique présent sur le territoire français.....	389
Figure 247 : Profil E-R considéré par le modèle COST-CNET.....	393
Figure 248 : Tableau récapitulatif des coefficients de correction à rajouter à l'équation de calcul de l'affaiblissement radio pour recentrer le modèle COST-LD selon le type de milieu géographique.....	395
Figure 249 : Récapitulatif des performances du modèle COST-LD à 900 Mhz avant et après optimisation à l'aide des coefficients de correction.....	395
Figure 250: Récapitulatif des performances du modèle COST-LD optimisé, sur Strasbourg, en quantiles (%).395	395
Figure 251 : Equations générales de calcul de l'affaiblissement radioélectrique par le modèle de propagation de COST-LD optimisé selon le type de milieu géographique présent sur le territoire français.....	396
Figure 252 : Récapitulatif des principaux résultats des performances du modèle COST-LD et du modèle de Okumura-Hata en milieu urbain dense.....	397
Figure 253 : Récapitulatif des principaux résultats des performances du modèle COST-LD et du modèle de Okumura-Hata en milieu urbain.....	398
Figure 254 : Récapitulatif des principaux résultats des performances du modèle COST-LD et du modèle de Okumura-Hata en milieu périurbain.....	399
Figure 255 : Récapitulatif des principaux résultats des performances du modèle COST-LD et du modèle de Okumura-Hata en milieu rural.....	400
Figure 256 : Présentation des deux modules composant le modèle OpenMorph, ainsi que les résultats de calculs obtenus à l'aide du modèle.....	402

Figure 257 : Plan DXF en 3D chargé sous ArcView : Visualisation des murs et des fenêtres du bâtiment à l'aide des fonctionnalités du SIG.....	404
Figure 258 : Exemple d'utilisation de données radio dans le modèle OpenMorph : visualisation du diagramme d'antenne en 2D et 3D pour un relais bien précis.....	404
Figure 259 : Modèle de Hata optimisé – Visualisation sous SIG en 3D – Strasbourg Centre-ville - Pour une antenne relais - (Module 3D Analyst).....	405
Figure 260 : Modèle de Hata optimisé – Visualisation sous SIG en 3D – Zone montagneuse.....	406
Figure 261 : Modèle de Hata optimisé – Visualisation sous SIG en 2D – Communauté Urbaine de Strasbourg. Pour 5 antennes relais - (Module Spatial Analyst).....	406
Figure 262 : Visualisation sous ArcView 8 : Modèle de propagation d'ondes radio de Okumura-Hata. En mode Couverture de champ radio (affaiblissements prédits) et en mode Profil émetteur-récepteur (affaiblissements mesurés).....	407
Figure 263 : pour le profil : Localisation de l'Émetteur et du Récepteur. Campagne de mesure Strasbourg –Trajet VOODLY2_1994.....	407
Figure 264 : Modèle COST-LD optimisé sous SIG - Visualisation en 2D – Strasbourg Centre-ville.....	408
Figure 265 : Visualisation d'un autre type de calcul radio effectué à l'aide du SIG : le calcul de la carte de trafic radioélectrique (Module ArcMap et Spatial Analyst).....	409
Figure 266 : Chargement de fichiers de mesures radio sous ArcView 3 - Strasbourg Centre-ville.....	410
Figure 267 : Statistiques de l'erreur calculées par OpenMorph.....	411
Figure 268 : Modélisation vectorielle en 3D sous ArcView : Visualisation des bâtiments et des différents types de places à l'aide des fonctionnalités du SIG.....	418
Figure 269: Visualisation en 2,5 D de la surface de visibilité pour la place Kléber à Strasbourg. Calcul maillé.....	419
Figure 270 : Exemple de fonctions disponibles dans le SIG : la visibilité optique en mode plan et en mode profil (Module 3D Analyst) : le profil de visibilité.....	420
Figure 271 : Visualisation des surfaces de visibilité dans le plan vertical (façades).....	420
Figure 272 : Visualisation d'un demi volume de visibilité dans le plan vertical (profil).....	421
Figure 273 : Modélisation vectorielle des arbres.....	421
Figure 274 : vue 2D1/2 des surfaces de visibilité, Strasbourg.....	422
Figure 275 : Visualisation d'un volume de visibilité en 2,5 D pour une place située au centre d'un îlot bâti.....	423
Figure 276 : Modulation morphologique de la densité.....	424
Figure 277 : Modélisation d'un immeuble par cellules et par étages : l'exemple de la Sears Tower à Chicago aux USA.....	425
Figure 278 : Modélisation vectorielle du bâti : les étages et les façades.....	426

Annexes

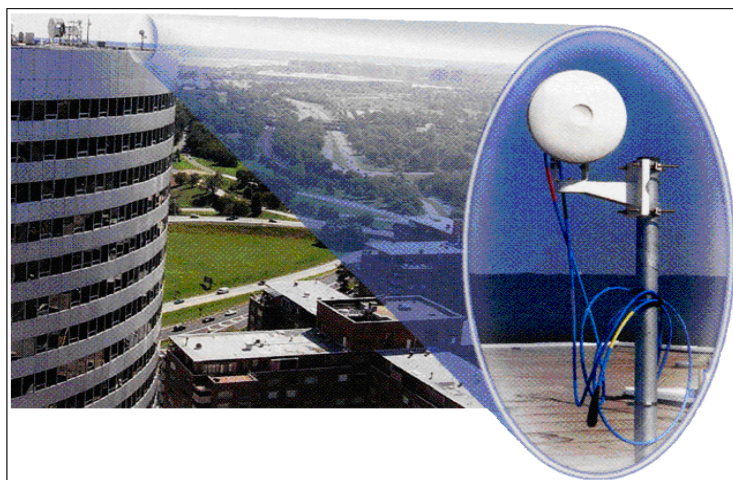
Figure 1.1 : Photographie d'une Station de Base (BTS) implantée au dessus d'un toit d'immeuble et comportant une antenne dédiée à la Boucle Locale Radio (BLR).....	471
Figure 1.2 : Photographie d'une MicroBTS (petite station de base, à portée limitée) en Indoor.....	471
Figure 1.3 : Exemple d'antenne directive implantée au dessus d'un toit d'immeuble (Préfecture du Bas-Rhin) Campagne de mesure COST-CNET2.....	472
Figure 1.4 : Exemple d'antenne omnidirectionnelle implantée au dessus d'un toit d'immeuble (Préfecture du Bas-Rhin) lors de la campagne de mesure radio COST-CNET2	472
Figure 2.1 : Exemple de mesures de réponses impulsionnelles en zone de haute montagne. Zone géographique de Grenoble.....	473
Figure 4.1 : Courbe de l'aire des surfaces de visibilité – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg.....	476
Figure 4.2 : Courbe du périmètres des surfaces de visibilité – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg.....	477
Figure 4.3 : Courbe de l'indice de Miller – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg.....	478
Figure 4.4 : Courbe de l'indice de Gravélius – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg.....	479
Figure 4.5 : Courbe de l'indice d'aplatissement – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg.....	480
Figure 4.6 : Courbe de l'indice de compacité – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg.....	481
Figure 4.7 : Courbe de l'indice de Morton – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg.....	482
Figure 4.8 : Courbe de l'indice d'élongation – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg.....	483
Figure 4.9 : Courbe de l'indice elliptique – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg.....	484
Figure 4.10 : Courbe de l'indice de Kostrubiec – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg.....	485

Annexes

Sommaire des Annexes

<i>1 – Les différents types d’antennes radio émettrices</i>	467
<i>2 – Exemple de mesures radio impulsives</i>	469
<i>3 – Les formats des données géographiques</i>	470
3.1 – Les fichiers ASCII.....	470
3.2 – Les fichiers pour ArcView.....	471
<i>4 – Les courbes des valeurs calculées pour les indices de formes, l’aire des surfaces de visibilité et l’affaiblissement mesuré pour les campagnes de mesures sur Strasbourg, Trajet IMPG</i>	472
<i>5 – Implémentation du modèle de Hata</i>	482
<i>6 – Algorithme de calcul de l’élongation (la Longueur Maximale) pour un polygone quelconque</i>	483
<i>7 – Programmation sous ArcView 3, en langage Avenue, des formules calculatoires des indices de forme</i>	484
<i>8 – Présentation des scripts « Avenue » pour le calcul des indices de forme géographiques</i>	486
<i>9 – Estimation du temps de calcul des surfaces de visibilité, du lancer de rayon et des indices de forme</i>	487

1 – Les différents types d’antennes radio émettrices



Sources : ESRI, Redland, USA, 2001.

Figure 1.1 : Photographie d'une Station de Base (BTS) implantée au-dessus d'un toit d'immeuble et comportant une antenne dédiée à la Boucle Locale Radio¹⁹⁰ (BLR)



Sources : TDF, France, 2000.

Figure 1.2 : Photographie d'une MicroBTS (petite station de base, à portée limitée) en Indoor¹⁹¹

¹⁹⁰ La Boucle Locale Radio, couramment appelée BLR, correspond à la partie du réseau de télécommunications située entre la prise téléphonique de l'abonné et le central téléphonique, les données (voix, sons, images, autres données) transitent dans ce cas par des ondes hertziennes (radio).

¹⁹¹ *Indoor* signifie que le milieu de propagation des ondes radio est situé à l'intérieur d'un bâtiment, ou d'un espace confiné (un couloir de métro dans notre cas).



Sources : France Télécom, CNET, 1997.

Figure 1.3 : Exemple d'antenne directive implantée au dessus d'un toit d'immeuble (Préfecture du Bas-Rhin) Campagne de mesure COST-CNET2¹⁹²



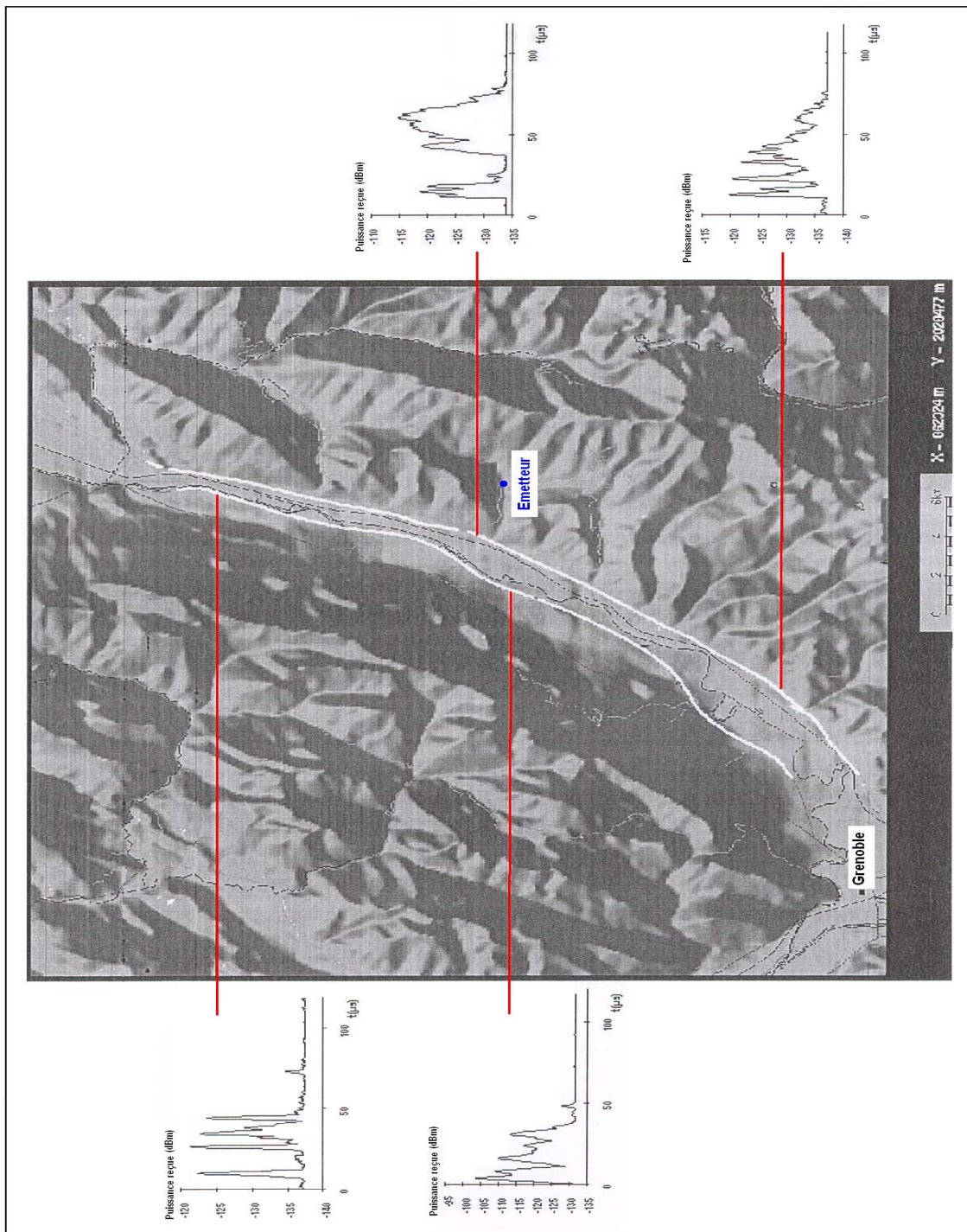
Sources : France Télécom, CNET, 1997.

Figure 1.4 : Exemple d'antenne omnidirectionnelle implantée au dessus d'un toit d'immeuble (Préfecture du Bas-Rhin) lors de la campagne de mesure radio COST-CNET2

Les figures 1.3 et 1.4 présentent des photographies des deux types d'antennes utilisées pour l'émission/réception des ondes radioélectriques dans les réseaux radiomobiles GSM 900MHz.

¹⁹² COST-CNET2 : campagne de mesures effectuée en 1997 dans la Communauté Urbaine de Strasbourg. Les mesures, effectuées par le Centre National d'Etude des Télécoms, portaient sur l'affaiblissement du signal radio, pour une fréquence d'émission de 900 MHz.

2 – Exemple de mesures radio impulsionnelles



Sources : CNET, 1995.

Figure 2.1 : Exemple de mesures de réponses impulsionnelles en zone de haute montagne.
Zone géographique de Grenoble.

La figure 2.1 présente des résultats de mesures de la réponse impulsionnelle en quatre points situés le long d'un parcours routier dans la vallée de Grenoble. Les courbes de la réponse impulsionnelle mesurées illustrent bien la variation de la puissance reçue, qui est due à la réflexion des ondes sur les flancs des montagnes.

3 - Les formats des données géographiques

3.1 – Les fichiers ASCII

Dans le paragraphe ci-dessous nous donnons un exemple de fichier fourni à l'opérateur national par l'IGN, dans les années 1995-1998, au format ASCII.

Les fichiers IGN maillés à 5 champs :

C'est un fichier ASCII fourni par l'IGN. Il contient des données géographiques maillées de relief et de sursol. Chaque ligne décrit un nœud de maillage. Le pas de maillage peut être de 25 mètres, de 5 mètres ou d'une autre valeur.

Chaque ligne de ce fichier se compose ainsi :

X	Y	Z	Nature du sursol	Hauteur du sursol
---	---	---	------------------	-------------------

Les données géographiques contenues dans le fichier : 5 couches d'informations sont stockées dans ce type de fichier :

désignation	unité	format
X (abscisse)	mètres	nombre réel à 1 décimale
Y (ordonnée)	mètres	nombre réel à 1 décimale
Z (altitude)	mètres	nombre réel à 1 décimale
Nature du sursol	-	1 chiffre
Hauteur du sursol	mètres	nombre réel à 1 décimale

Remarques :

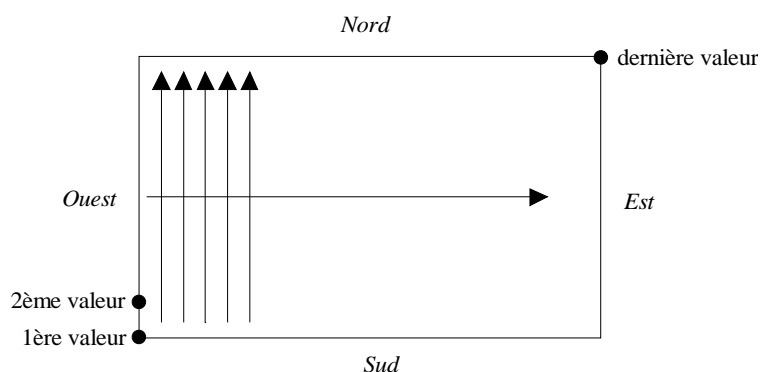
- Les valeurs sont séparées par un espace.
- Z = -9999.0 si absence de données pour ce point
- Les coordonnées X et Y sont en Lambert 2 étendu.

Les 4 classes d'occupation du sol :

n° du thème	désignation
0	Sol
1	Bâtiment ou Pont
3	Végétation
4	Eau

Ordre de rangement des données :

Les données partent du sud-ouest vers le nord-est. Les Y varient d'abord, puis les X.



3.2 - Les fichiers pour ArcView

Ce sont des fichiers en ASCII qui sont générés par le convertisseur de données géographiques GDGM à partir des BD géographiques de France Télécom Mobile, afin de pouvoir être importés dans le Système d'Information Géographique ArcView 3 et 8.

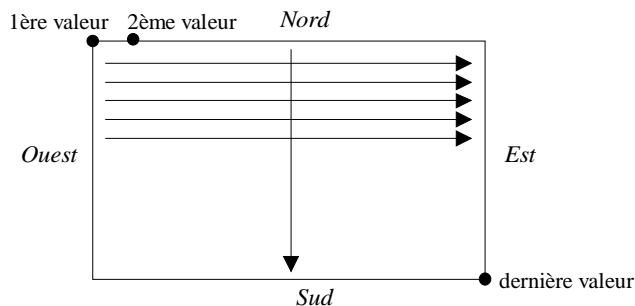
Caractéristiques :

- Un fichier ne contient qu'un seul type de données : altitude, ou hauteur de sursol, ou nature du sursol.
- Indication de 6 lignes en en-tête
- Une seule valeur par ligne
- Les valeurs peuvent être des nombres entiers ou réels.

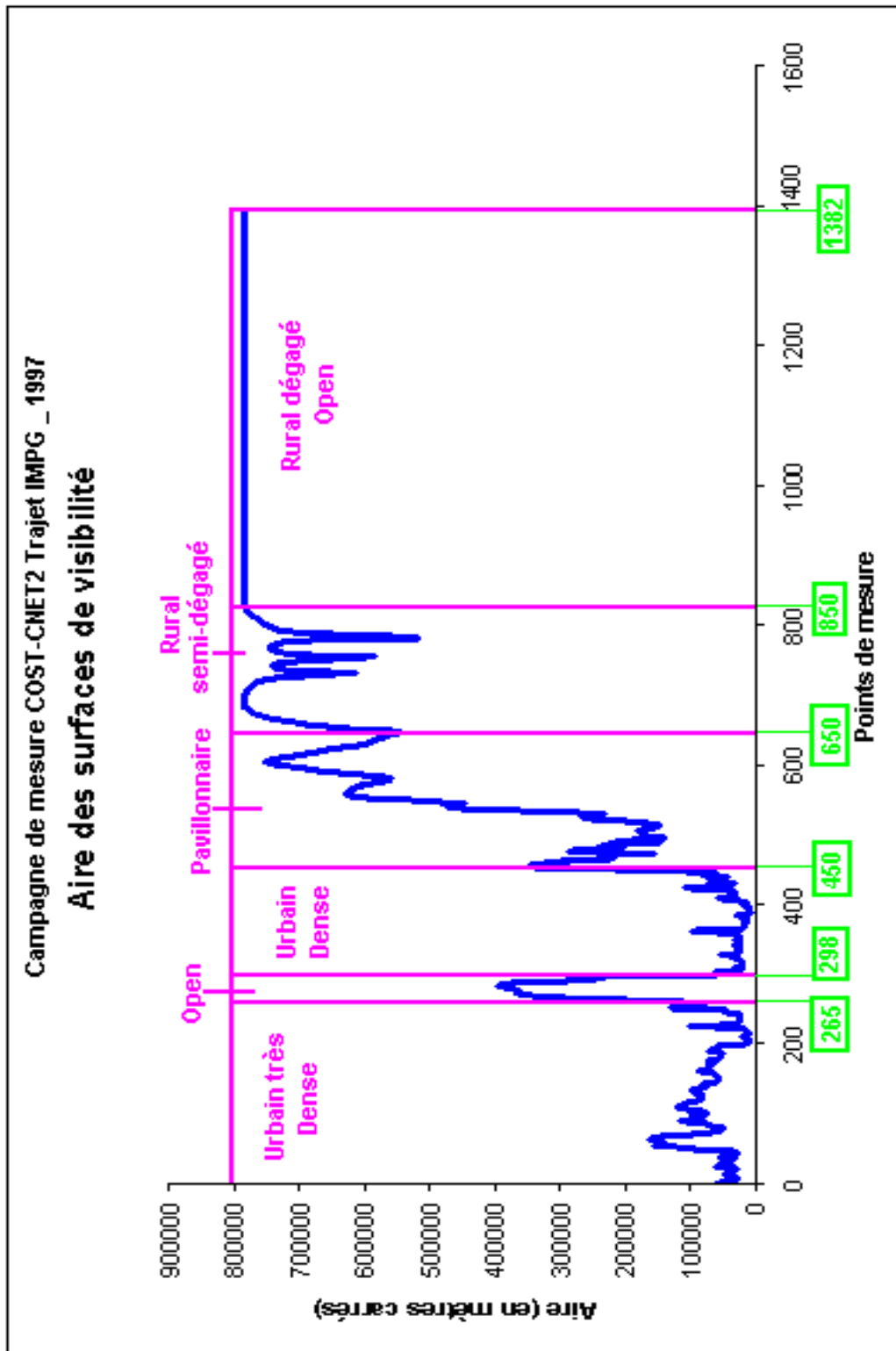
Exemple de fichier pour ArcView :

<code>ncols 655</code>	→ nombre de colonnes
<code>nrows 1255</code>	→ nombre de lignes
<code>xllcorner 585975</code>	→ coordonnée X de la cellule inférieure gauche
<code>yllcorner 2092645</code>	→ coordonnée Y de la cellule inférieure gauche
<code>cellsize 5</code>	→ taille de la cellule
<code>no_data_value -9999</code>	→ valeurs manquantes (par défaut : -9999)
<code>560.4</code>	→ 1ère valeur
<code>562.2</code>	→ 2ème valeur
<code>-9999.0</code>	
<code>-9999.0</code>	
<code>565.2</code>	
•	
•	
•	
<code>589.0</code>	
<code>585.5</code>	
<code>584.7</code>	→ dernière valeur

Ordre de rangement des valeurs : Les X varient d'abord, puis les Y.

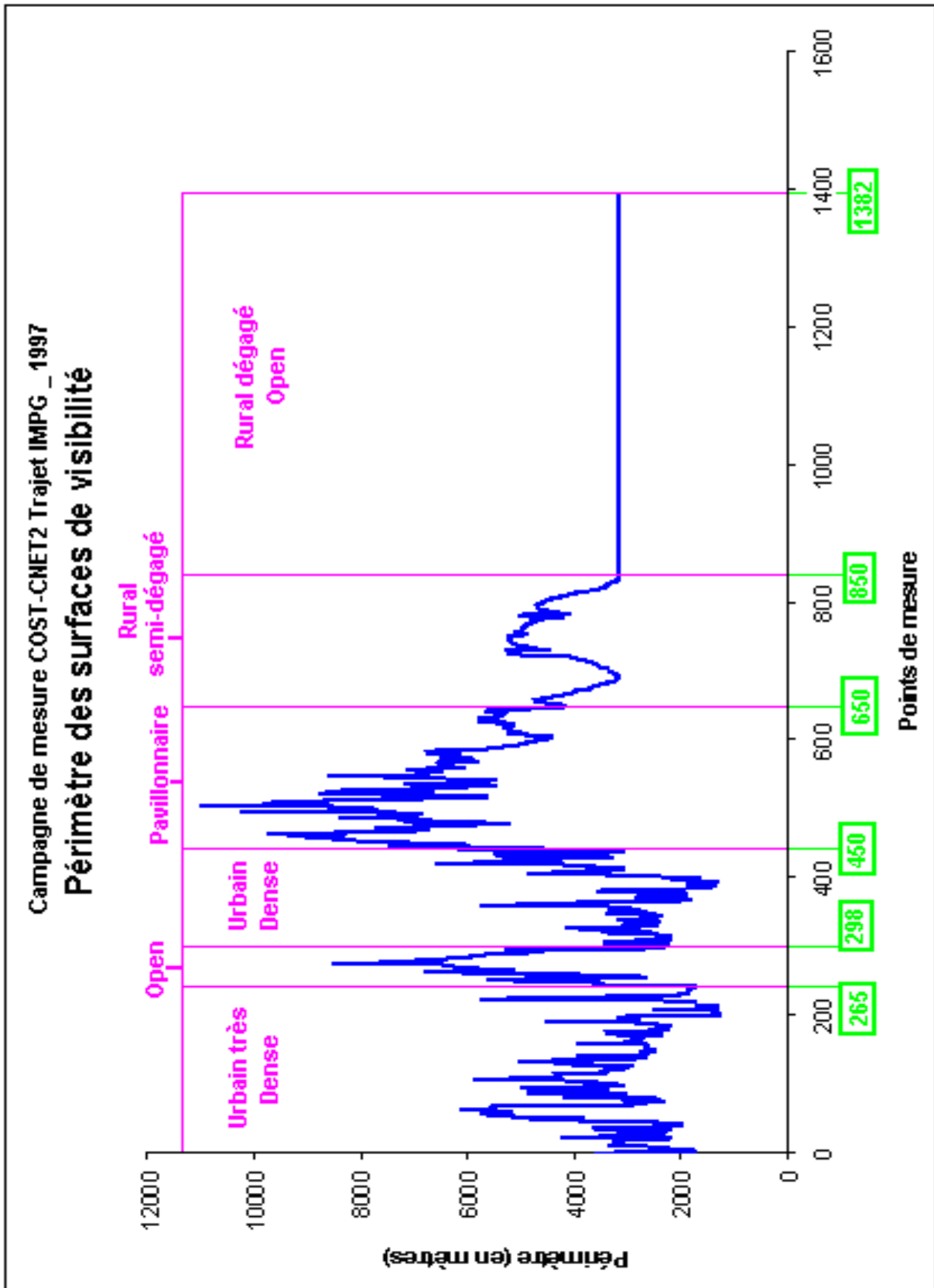


4 – Les courbes des valeurs calculées pour les indices de formes, l'aire des surfaces de visibilité et l'affaiblissement mesuré pour les campagnes de mesures sur Strasbourg, Trajet IMPG



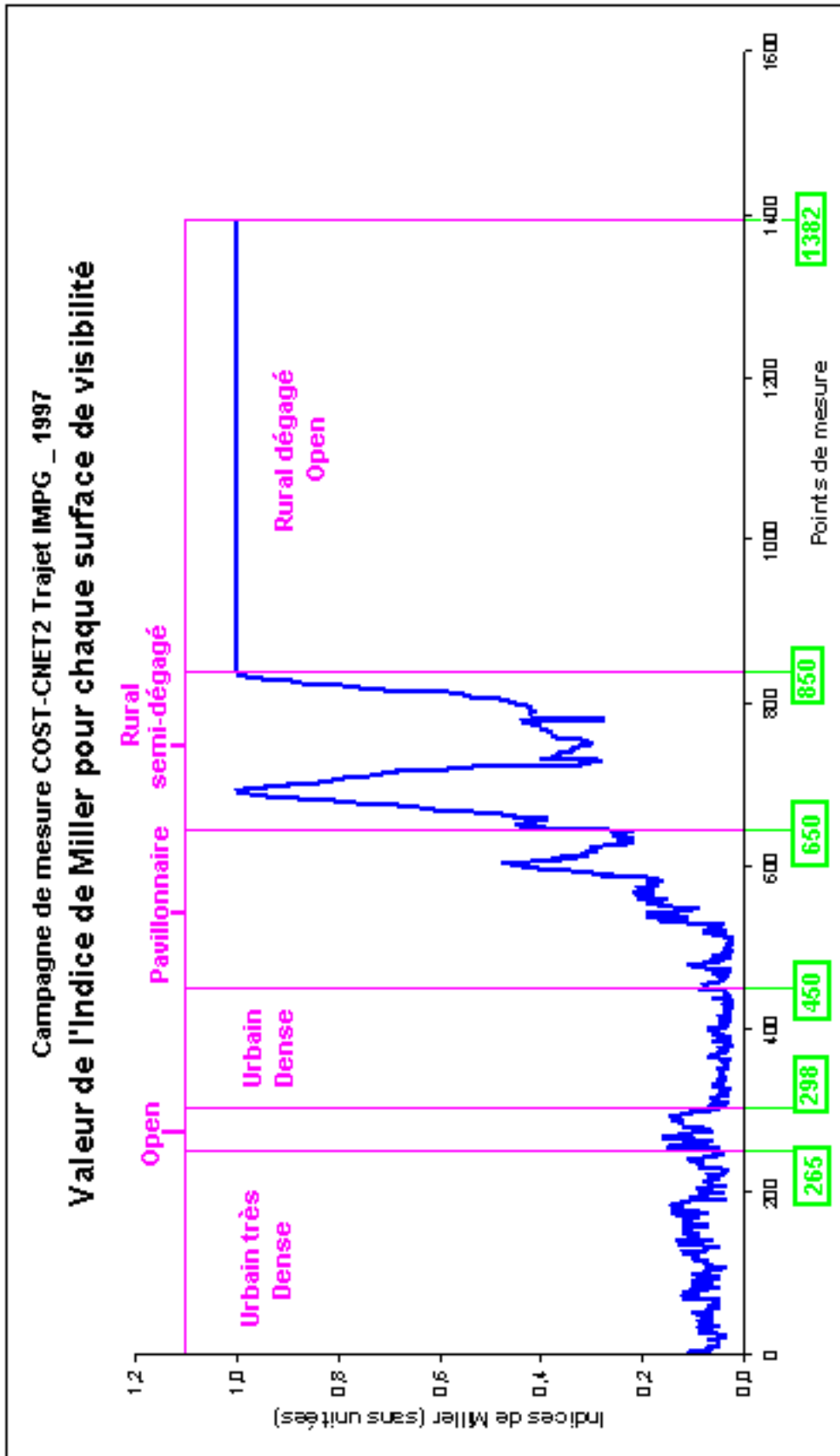
Sources : C. Turck, LIV, 2003.

Figure 4.1 : Courbe de l'aire des surfaces de visibilité – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg



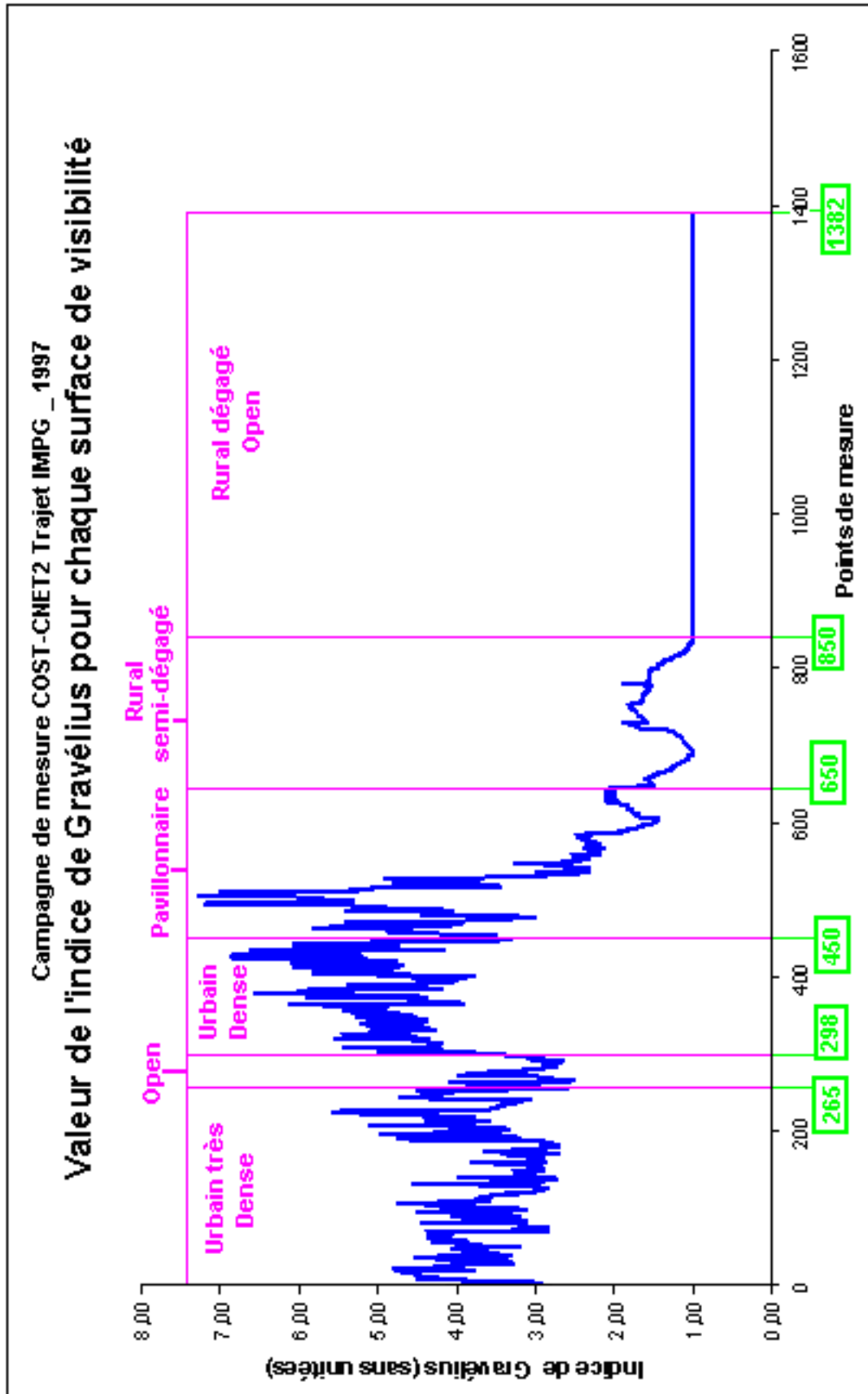
Sources : C. Turck, LIV, 2003.

Figure 4.2 : Courbe du périmètres des surfaces de visibilité – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg



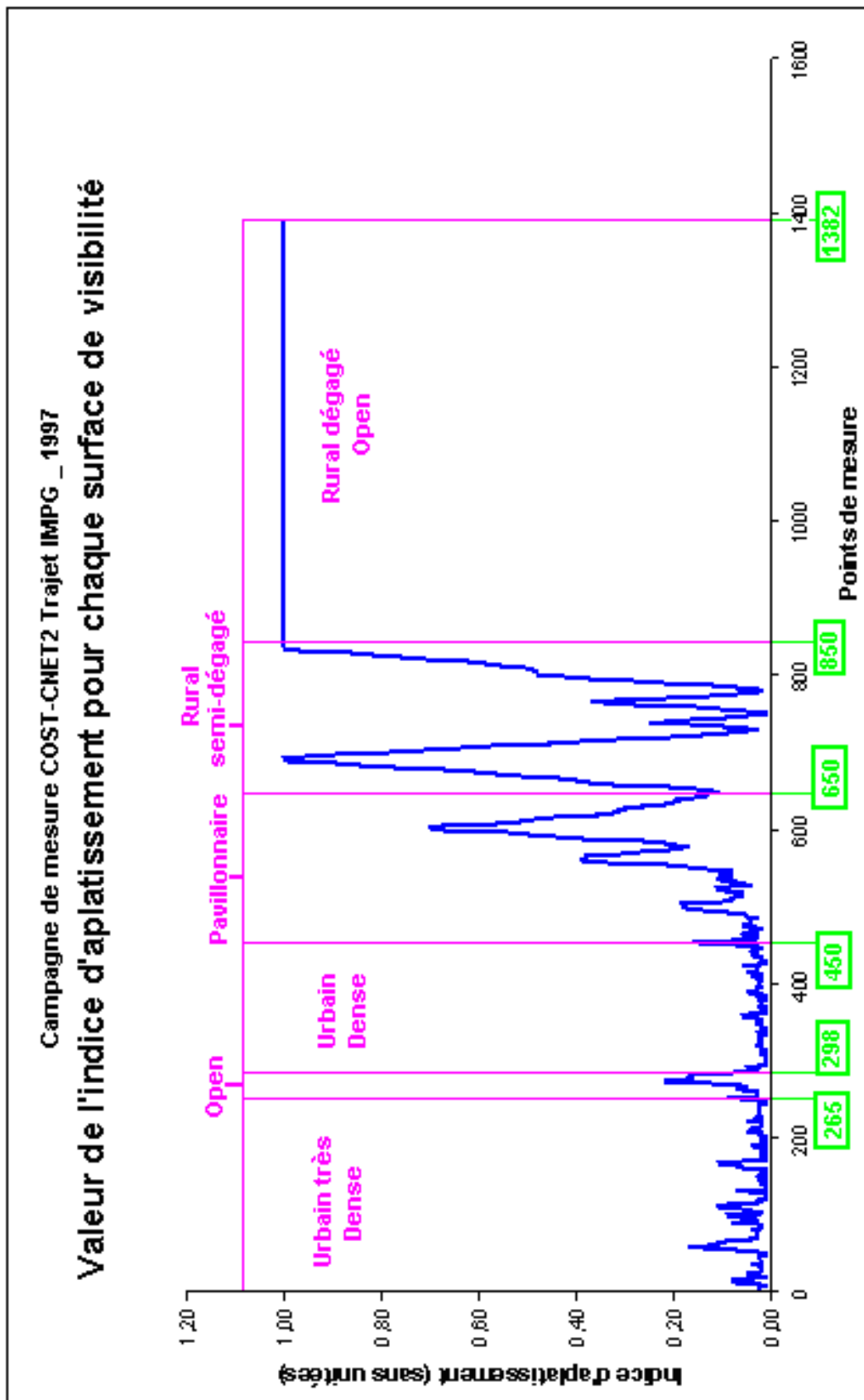
Sources : C. Turck, LIV, 2003.

Figure 4.3 : Courbe de l'indice de Miller – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg



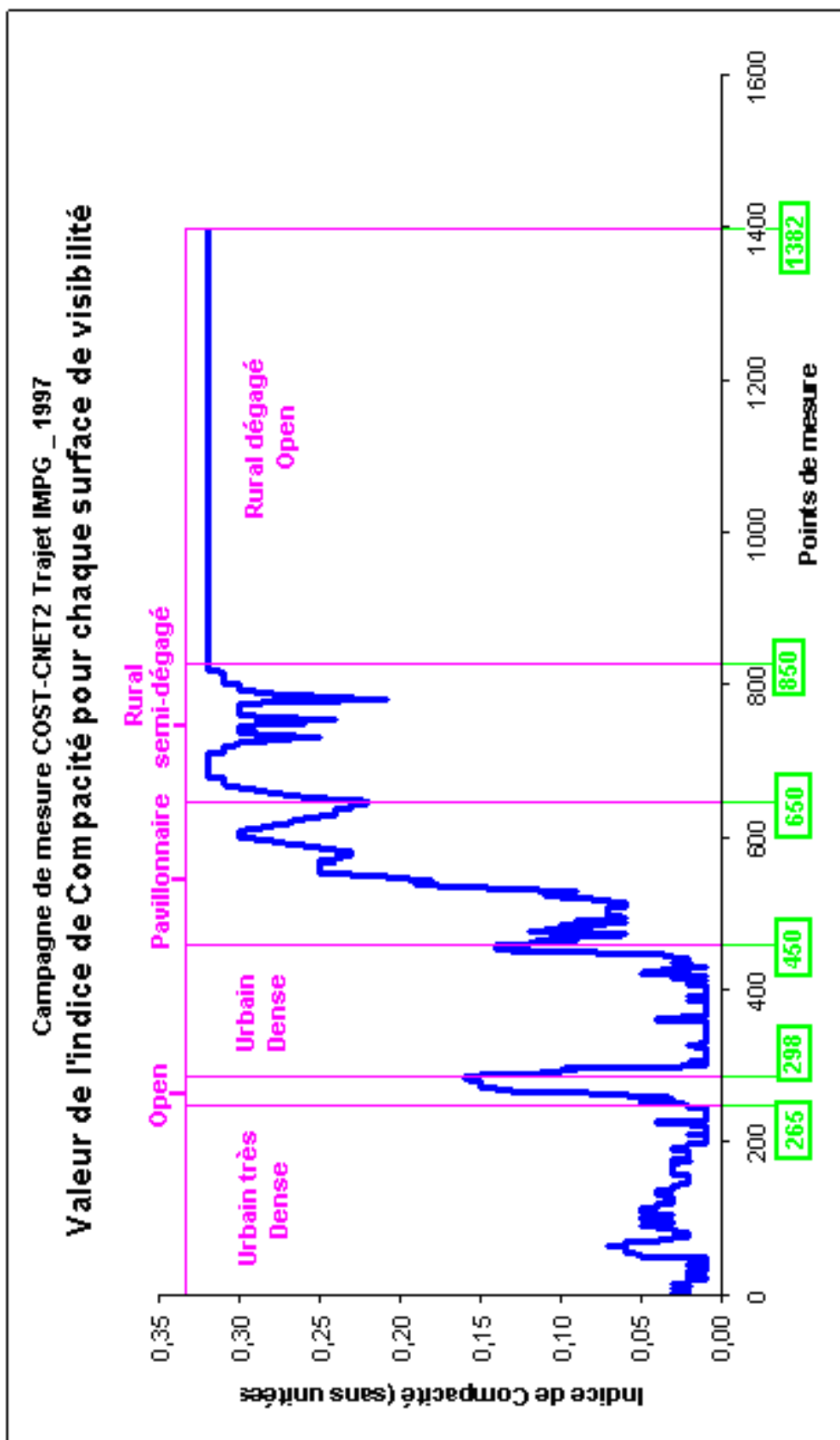
Sources : C. Turck, LIV, 2003.

Figure 4.4 : Courbe de l'indice de Gravélius – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg



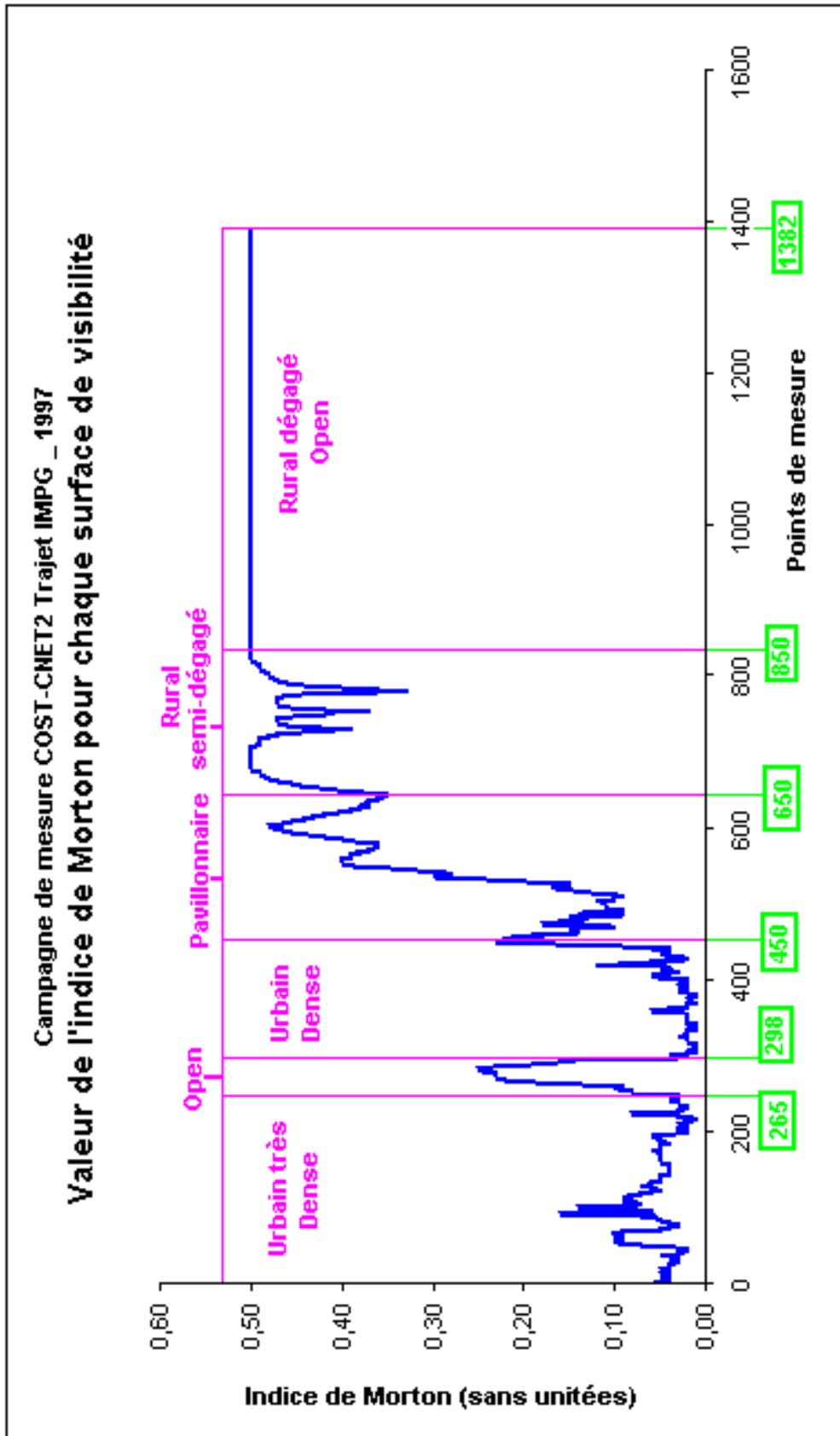
Sources : C. Turck, LIV, 2003.

Figure 4.5 : Courbe de l'indice d'aplatissement – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg



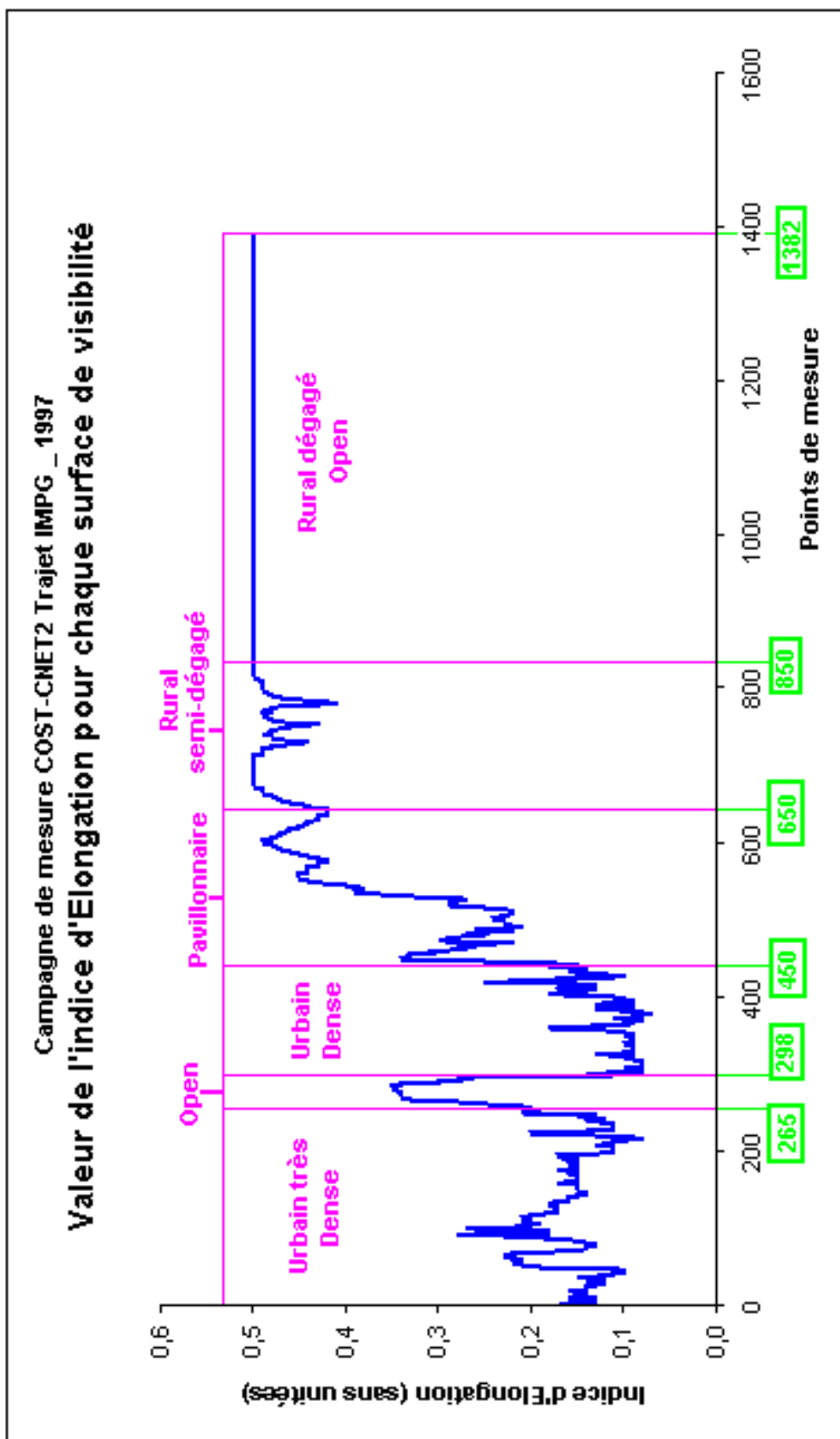
Sources : C. Turck, LIV, 2003.

Figure 4.6 : Courbe de l'indice de compacité – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg



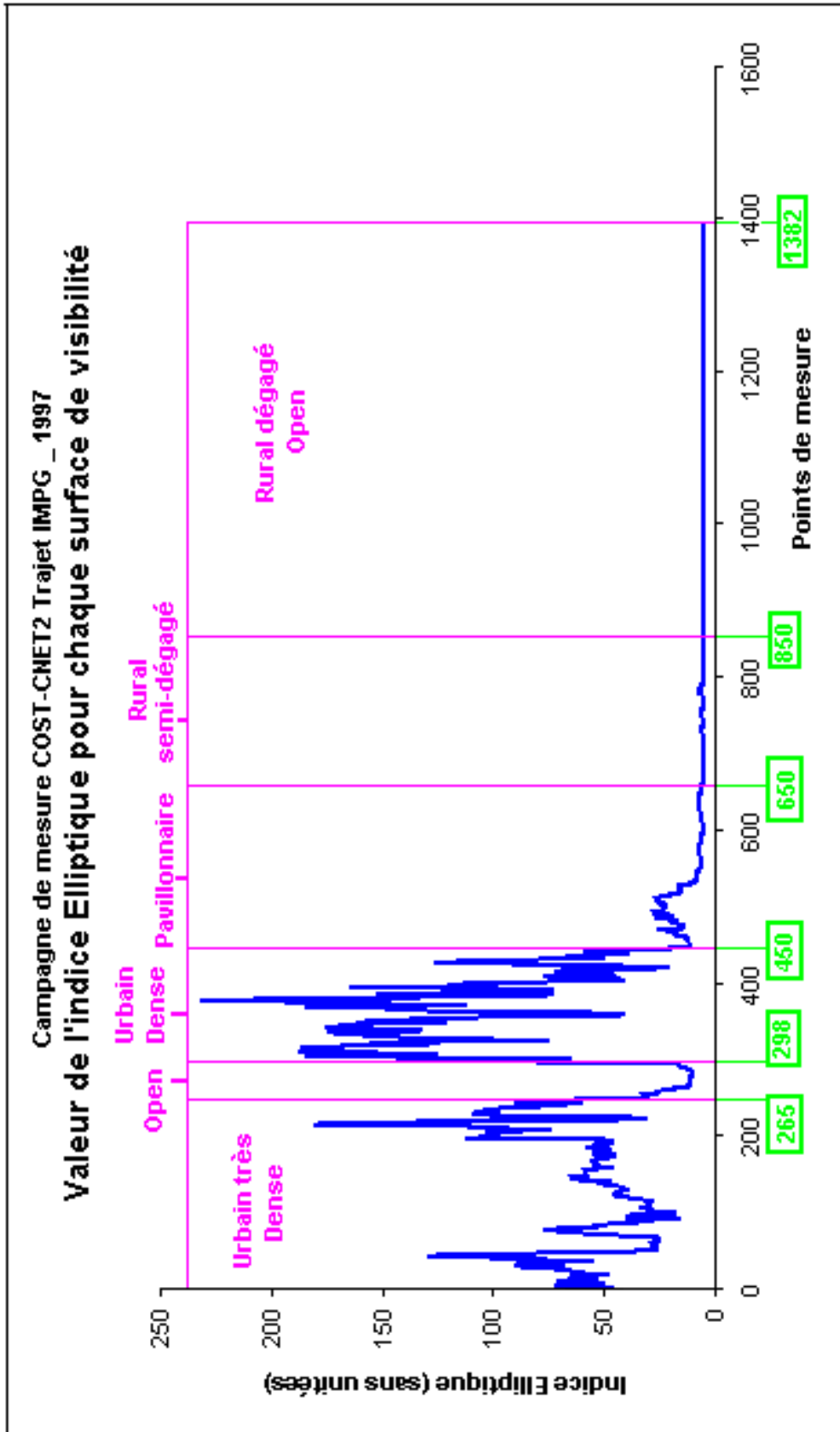
Sources : C. Turck, LIV, 2003.

Figure 4.7 : Courbe de l'indice de Morton – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg



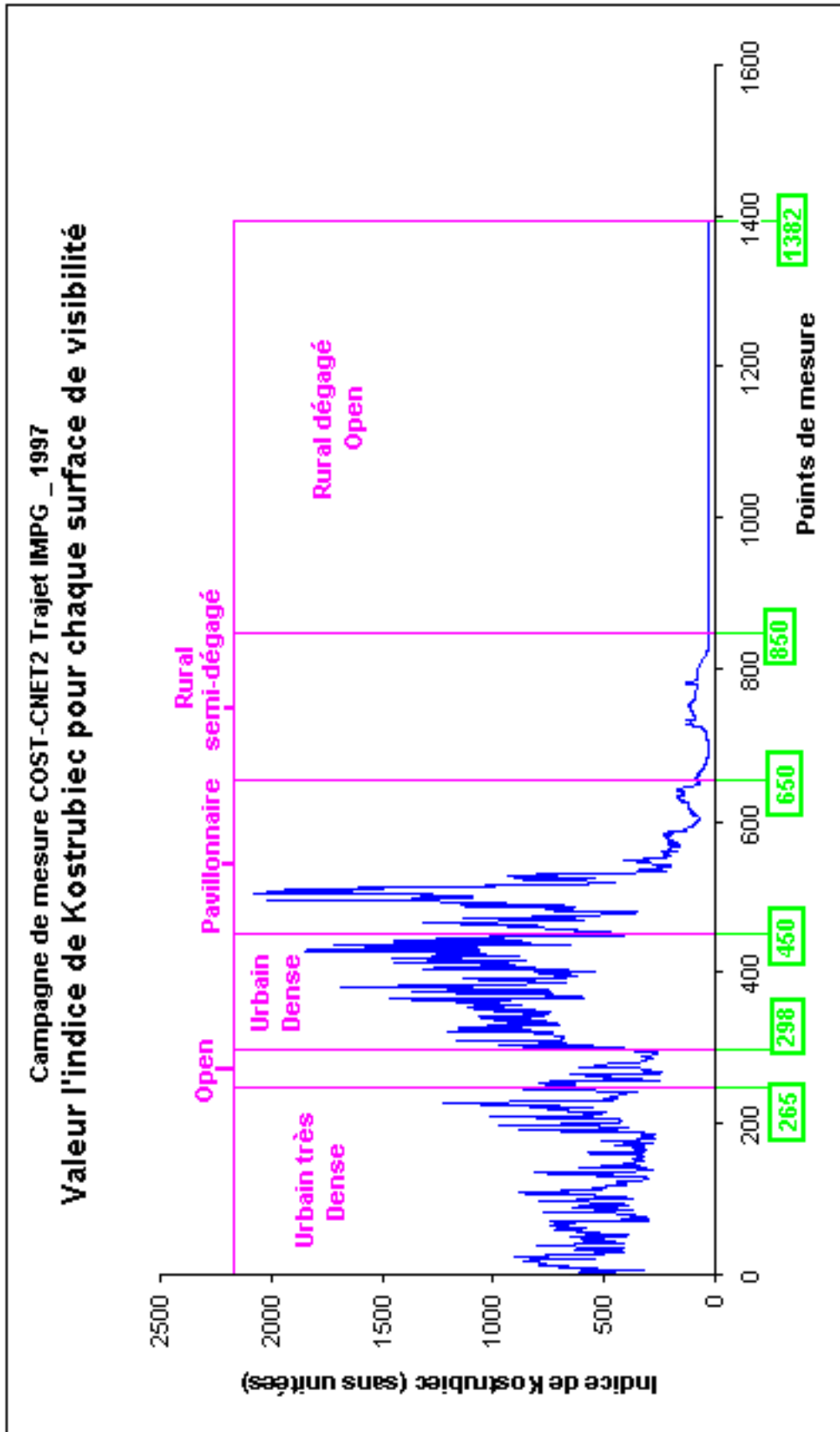
Sources : C. Turck, LIV, 2003.

Figure 4.8 : Courbe de l'indice d'élongation – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg



Sources : C. Turck, LIV, 2003.

Figure 4.9 : Courbe de l'indice elliptique – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg



Sources : C. Turck, LIV, 2003.

Figure 4.10 : Courbe de l'indice de Kostrubiec – Trajet IMPG – Communauté Urbaine de Strasbourg

5 – Implémentation du modèle de Hata

But : calculer l'affaiblissement du signal radio (mode couverture de champ radio) en fonction des caractéristiques géographiques en présence, et le profil radio entre l'émetteur et le récepteur (mode profil).

D'un point de vue géographique : On dispose d'un MNT (maillé), d'un MNS (maillé) et du Contour de base du bâti (vectoriel).

On va coder certains paramètres concernant ce modèle, en langage de programmation *Avenue et C++*, pour pouvoir intégrer le modèle de propagation dans le projet SIG, et simuler le calcul radio sur un échantillon test sur Strasbourg.

Le pas est de 25 mètres en milieu urbain et 100 mètres en milieu rural
On calcul la valeur de l'affaiblissement du signal pour chaque maille.

Le modèle de Hata utilise uniquement des antennes omnidirectionnelles, c'est-à-dire que le relais radio comporte une seule antenne, qui émet sur 360 degrés, ce qui explique la visualisation du diagramme d'antenne et de l'affaiblissement du signal radio sous la forme de cercle.

La fréquence d'émission sera de 900 Mégahertz pour ce calcul.

Les paramètres d'entrée du modèles correspondent à :

f : la fréquence d'émission
 Z_H : la hauteur du bâti par rapport au sol,
 Z_{Hb} : la hauteur de l'antenne de base,
 Z : l'altimétrie (MNT),
 Z_{Hm} : la hauteur du mobile,
 d : la distance de l'émetteur au mobile,

La hauteur de l'antenne de base : $Z_{Hb} = Z_H + Z + 2$, on ajoute 2 mètres, ce qui correspond à la hauteur de perche de l'antenne.

On pose : $Z_{Hm} = Z + 1.5$, ce qui correspond à un piéton marchant dans la rue.

La distance émetteur-récepteur d , prise en compte dans le calcul ne dépasse pas 1 kilomètre :
 $d_{max} = 1 \text{ Km}$

Le paramètre $a(Z_{Hm})$ (confère équation de calcul de l'affaiblissement de Okumura-Hata) est un facteur de correction dépendant de la hauteur de l'antenne de la station mobile et de l'environnement (type d'occupation du sol), sa valeur varie selon qu'on se situe dans une ville de taille moyenne ou bien une grande ville comme c'est le cas à Strasbourg.

Dans notre cas on considère que l'utilisateur de téléphone mobile est localisé au niveau du sol, c'est-à-dire pour une hauteur de 1,5 mètre, le coefficient $a(Z_{Hm})$ est alors tout à fait négligeable. Donc, a = une constante quand $Z_{Hm} = 1.5$

On obtient alors la formule :

$$a(Z_{Hm}) = [1.1 \text{ Log}(f) - 0.7].Z_{Hm} - [1.56 \text{ Log}(f) - 0.8]$$

Cette formule est négligeable dans notre cas ($Z_{Hm} = Z + 1.5$).

On choisie un Z_{Hb} et un Z_{Hm} .

On s'intéresse à ce qui n'est pas constant, c'est-à-dire les variables Z et d .

6 – Algorithme de calcul de l'élongation (la Longueur Maximale) pour un polygone quelconque

Les données sont de type vectoriel.

Soit P un polygone quelconque.

Choisir un des points du polygone comme "point d'ancrage" $P_0 (X_0, Y_0)$.

On calcul la longueur des segments de droites (arcs) reliant P_0 à tous les autres nœuds P_n du polygone. On stocke la valeur du segment le plus grand.

On fait une boucle : On effectue le même calcul de longueur de segment pour tous les points P_n du polygone.

On obtient alors n segments les plus grands.

On stocke la valeur du segment le plus grand parmi ces n plus grands segments.

Ce segment de droite correspond à l'élongation du polygone, c'est-à-dire à la longueur maximale du polygone.

Les indices de forme sont calculés pour des surfaces de visibilité, qui correspondent à des polygones vectoriels irréguliers.

Le langage de programmation utilisé est le langage orienté objet d'ArcView : AVENUE.

On calcul dans un premier temps les variables de base, puis on calcul les 9 indices de forme correspondant.

Les variables : Longueur maximale, largeur maximale, Rayon inscrit, Rayon circonscrit, Surface, Périmètre.

7 - Programmation sous ArcView 3, en langage Avenue, des formules calculatoires des indices de forme

Calcul et écriture du rayon (segment) minimum :

```
If (DistanceMin < RayonInscrit) Then
  RayonInscrit = DistanceMin
End
If (DistanceMin > RayonCirconscriit) Then
  RayonCirconscriit = DistanceMin
End

ExtremRayon = Point.Make(X4,Y4)
ListeExtremRayon.Add(ExtremRayon)
```

Calcul du Rayon Maximum et du Rayon Minimum

$$\text{Rayon Maximum} = R_{Max} = \text{Distance}_{Max}$$
$$\text{Rayon Minimum} = R_{Min} = \text{Distance}_{Min}$$

Calcul des surfaces de visibilité

Calculs de la Surface de visibilité (Aire), du Périmètre (Arc), du Rayon (Segment),

$$\text{Aire} = (\text{DistanceMin} * \text{DistanceMin} * \text{PiRad}) / \text{NbRayonsnum}$$
$$\text{Arc} = (\text{DistanceMin} * \text{PiRad} * 2) / \text{NbRayonsnum}$$
$$\text{Segment} = (\text{DistanceMin} - \text{DistanceMin}^2). \text{Abs}$$

Remarque : L'aire calculée est celle de la surface de visibilité totale, donc pour 360 lancers de rayons. La formule calculatoire de l'aire et du périmètre (arc) est donc celle d'un cercle : Surface = Rayon² * PiRad , Périmètre = 2* PiRad*Rayon

Calcul de la Longueur Maximale :

```
For each n in 1..(NbRayonsnum)
  Point1 = ListeExtremRayon.Get(n-1)
  X1 = Point1.GetX
  Y1 = Point1.GetY
  For each m in 1..(NbRayonsnum)
    Point2 = ListeExtremRayon.Get(m-1)
    X2 = Point2.GetX
    Y2 = Point2.GetY
    Xdis = (X2-X1)^2
    Ydis = (Y2-Y1)^2
    Distance = (Xdis+Ydis).Sqrt
    if (Distance > LongueurMax) Then
      LongueurMax = Distance
    End
  End
End
End
```

Calcul des 9 indices de forme :

```
Perimetre = Arctotal + SegmentTotal
IndiceMiller = 4*PiRad*AireTotal/((Perimetre)^2)
IndiceGravelius = Perimetre/2/((PiRad*AireTotal).Sqrt)
IndiceAplatissement = RayonInscrit/RayonCirconscriit
IndiceCompacite = AireTotal/(PiRad*(RayonCirconscriit)^2)
IndiceMorton = AireTotal/(PiRad*(1/2)*(LongueurMax^2))
IndiceElongation = (AireTotal.Sqrt)/(LongueurMax*(PiRad.Sqrt))
IndiceElliptique = (4*(LongueurMax)^2)/(4*AireTotal)
IndiceKostrubiec = ((Perimetre)^2/AireTotal)-4*PiRad
CoefficientForme = AireTotal/(LongueurMax^2)
```

8 - Présentation des scripts « Avenue » pour le calcul des indices de forme géographiques

- Scripts « **Script2Dvisibilité_Rayons** » et « **Script2Dvisibilité_Surfaces** » :

Ces deux scripts permettent le lancement de rayons dans des directions choisies (en degrés). Le premier crée un thème avec les polygones. Le deuxième crée un arc de cercle autour des polygones pour un meilleur confort visuel. Après compilation d'un des deux scripts, il est nécessaire de sélectionner un thème « points » et un thème « bâtis » avant de l'exécuter.

Les paramètres d'entrée des scripts sont :

- 1) La direction de départ pour le lancer des rayons.
- 2) Le champ de vue pour le lancer de rayon.
- 3) Le nombre de rayons à lancer.
- 4) La distance maximum de lancer de rayons.

Remarque : plus le nombre de points du thème « point » est grand, plus le temps de calcul sera long. Ce sera d'autant plus long si le nombre de rayons à lancer est grand.

- Scripts « **Calcul_9Indices** » et « **Distance Max** » :

Ces deux scripts sont issus des résultats de calculs provenant du script « Script2Dvisibilité_Rayons », corrigés, optimisés et écrits pour les calculs d'indices de forme. Le script « Calcul_9Indices » permet de calculer les surfaces de visibilité, ainsi que les 9 indices de Forme des points dans le thème « point ». Le champ de vue est de 360°.

Les entrées du script sont alors :

- 1) Le nombre de rayons à lancer.
- 2) La distance maximale de lancer.

Le script « Distance Max » fait de même mais lance les calculs avec une distance maximale échantillonnée avec un pas de 50 mètres. Par exemple, si la distance maximale de lancer est de 500 mètres, le calcul des indices morphologiques est effectué avec une distance maximale de 50 mètres, suivie de 100 mètres, 150 mètres, ..., jusqu'à 500 mètres.

Généralisation du calcul des indices à l'ensemble des mailles d'une grille :

- Scripts « **Call_2DpointNetworkCreator** » et « **2DpointNetworkCreator** » :

Ces deux scripts permettent de créer une grille de points avec une résolution spatiale définie. Ils permettent de calculer la valeur des 9 indices de forme en chaque point de la grille, donc pour l'ensemble d'une zone géographique.

Les entrées de ce script sont :

- 1) Les coordonnées (x, y) de la grille.
- 2) Le pas d'échantillonnage.

On obtient ainsi les valeurs numériques des 9 indices de forme en chaque point de la grille, donc pour l'ensemble d'une étendue géographique.

Les données géographiques utilisées dans les modèles de propagation radio étant stockées sous forme de mailles et non de points, il est donc nécessaire de calculer les valeurs numériques des indices pour l'ensemble des mailles d'une grille de cellule.

Pour cela, on effectue une opération d'interpolation spatiale en chaque point de la grille (sous ArcView version 8), puis on applique une table de transcodage, afin d'obtenir les valeurs des indices de forme pour l'ensemble des mailles d'une grille, d'une zone géographique, et non seulement en mode point. Le fichier géographique en sortie est un fichier maillé (« Grille » sous ArcView). Il permet de visualiser les surfaces en espace libre (Open) sur l'ensemble de la zone géographique. Ce fichier comporte une table attributaire (*.dbf) contenant la valeur numérique des 9 indices pour chaque maille.

9 - Estimation du temps de calcul des surfaces de visibilité, du lancer de rayon et des indices de forme

Machine utilisée pour le test : Hewlett_Packard, série Kayak XU800, processeur Pentium III cadencé à 800 Mégahertz.

Calcul du lancer de rayon :

Paramètres en entrée: 360 rayons lancers avec un champ de vue de 360 degrés et une distance maximale de lancer de 500 mètres pour 9 points de mesure.

Temps de calcul : **2 minutes par point** pour 360 rayons et D.Max = 500 mètres.

(Script2Dvisibilité_Rayons)

Campagne de mesure "Voodly 2_7" : **285 points de mesure : temps de calcul = 9 heures 30 minutes.**

Campagne de mesure "9IMP_rcn4Omni_13med" : **1392 points de mesure : temps de calcul = 46 heures et 24 minutes.**

Calcul du lancer de rayon par secteur (surface de visibilité) :

Paramètres en entrée: 360 rayons lancers avec un champ de vue de 360 degrés et une distance maximale de lancer de 500 mètres pour 9 points de mesure.

Temps de calcul : **3 minutes par point** pour 360 rayons et D.Max = 500 mètres.

(Script2Dvisibilité_Surfaces)

Campagne de mesure "Voodly 2_7" : **285 points de mesure : temps de calcul = 14 heures 15 minutes.**

Campagne de mesure "9IMP_rcn4Omni_13med" : **1392 points de mesure : temps de calcul = 69 heures et 36 minutes.**

Calcul des indices de Miller et Gravélius :

Paramètres en entrée: 360 rayons lancers avec un champ de vue de 360 degrés et une distance maximale de lancer de 500 mètres pour 9 points de mesure.

Temps de calcul : **4 minutes par point** pour 360 rayons et D.Max = 500 mètres.

(Script Calcul_9Indices)

Campagne de mesure "Voodly 2_7" : **285 points de mesure : temps de calcul = 19 heures.**

Campagne de mesure "9IMP_rcn4Omni_13med" : 1392 points de mesure : temps de calcul = 92 heures et 48 minutes.

Remarque : L'utilisation d'un PC pourvu d'un Processeur Pentium IV 2 Gigahertz permet de diviser ce temps de calcul par 5.

Résumé

Résumé : Le développement des réseaux de télécommunications radiomobiles nécessite de la part des opérateurs une prise en compte de plus en plus fine du milieu géographique dans lequel les ondes radioélectriques se propagent. Afin d'optimiser la qualité des télécommunications mobiles et la localisation des antennes relais, une étude sur les données géographiques utilisées en ingénierie radiomobile GSM a été menée. La demande est surtout concentrée en milieu urbain, or l'implantation des antennes y est plus difficile du fait de la complexité du milieu et de la présence de nombreux objets géographiques (bâtiments, infrastructures, etc.) qui jouent le rôle d'obstacle pour la propagation des ondes radio.

Les possibilités d'Analyse Spatiale et d'intégration de données pertinentes au sein d'un Système d'Information Géographique, ont permis d'appréhender l'influence des données géographiques (qualité, typologie, échelle, morphologie, etc.) sur la qualité (justesse de la prédiction radio, temps de calcul) de la modélisation de la propagation des ondes radio. Nous avons également introduit de nouvelles variables géographiques indirectes (indicateurs morphologiques, surfaces de visibilité, etc.) dans la modélisation, afin de caractériser plus efficacement le milieu géographique en présence. L'ensemble de ces résultats a été implémenté dans des algorithmes basés sur une approche géographique. Ils ont permis d'optimiser les calculs de couverture de champ dans les modèles radio. Les résultats obtenus ont servi à la réalisation d'un prototype informatique : le modèle OpenMorph. Le modèle OpenMorph a été mis en œuvre en articulation avec un Système d'Information Géographique. Il se compose de deux parties : un module d'Analyse Spatiale qui permet de calculer les données géographiques et un module de calcul radio qui implémente deux modèles de propagation (Okumura-Hata et COST-LD). Afin de valider le modèle OpenMorph, une simulation a été effectuée sur la Communauté Urbaine de Strasbourg.

Mots-clés : Information Géographique, Analyse Spatiale, Géomatique, Système d'Information Géographique, Télécommunications radiomobiles, Modélisation, Indicateurs Morphologiques, Milieu urbain.

Abstract: Radiomobile phone networks developments aims to study geographic constraints on wave propagation. In order to optimize the quality of the mobile telecommunications and of the antennas localization, a study of the geographic data used in GSM 900 MHz radio mobile engineering has been improved. That is particularly the case in urban areas, where any antenna placement meets a great number of constraints dues to numerous buildings and lots of debates, which play the rule of obstacle for radio waves.

Considerations on Spatial analysis and appropriate information integration have been used inside the Geographical Information System in order to measure the correlation between geographic data (quality, typology, scale, morphology, structure...) and the quality (radio prediction accuracy, computing time) of the model of radio wave propagation. Moreover, new variables like morphological indicators and line of sight surfaces have been incorporated to improve the geographic model. With those variables, coverage capability computations have been improved in propagation models. Our results have served to design an informatics' prototype: the model OpenMorph.

OpenMorph project is developed as a module of a Geographical Information System. It is splitted into two parts: a spatial analysis module allowing computing geographic data and a radio computation module which improve two waves' propagation models (Okumura-Hata and COST-LD). Our project has been tested on the Urban Community of Strasbourg.

Keywords: Geographical Information, Spatial Analysis, Geomatics, Geographical Information System, Radiomobile Telecommunications, Modelling, Morphological Indicators, Urban areas.