

THÈSE

Pour l'obtention du grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE POITIERS
UFR des sciences fondamentales et appliquées
XLIM-SIC
(Diplôme National - Arrêté du 25 mai 2016)

École doctorale : Sciences et ingénierie pour l'information, mathématiques - S2IM (Poitiers)
Secteur de recherche : Électronique des hautes fréquences, photonique et systèmes

Présentée par :
Mame Diarra Bousso Lô

Étude paramétrique et analyse conjointe modélisations / mesures pour la définition d'indicateurs d'expositions aux ondes électromagnétiques en environnement urbain

Directeur(s) de Thèse :
Yannis Pousset, Pierre Combeau

Soutenue le 12 janvier 2017 devant le jury

Jury :

Président	Bernard Uguen	Professeur des Universités, Université de Rennes 1
Rapporteur	Frédéric Favreau	Professeur des Universités, INSA de Rennes
Rapporteur	Joe Wiart	Directeur de recherche, Télécom ParisTech
Membre	Yannis Pousset	Professeur des Universités, Université de Poitiers
Membre	Pierre Combeau	Maître de conférences, Université de Poitiers
Membre	Nicolas Noé	Ingénieur de recherche, CSTB de Marne-la-Vallée
Membre	Jean-Benoît Agnani	Chef du département exposition du public, ANFR, Maisons-Alfort
Membre	François Gaudaire	Ingénieur de recherche, CSTB de Marne-la-Vallée

Pour citer cette thèse :

Mame Diarra Bousso Lô. *Étude paramétrique et analyse conjointe modélisations / mesures pour la définition d'indicateurs d'expositions aux ondes électromagnétiques en environnement urbain* [En ligne]. Thèse Électronique des hautes fréquences, photonique et systèmes. Poitiers : Université de Poitiers, 2017. Disponible sur Internet <<http://theses.univ-poitiers.fr>>



THÈSE

**pour l'obtention du Grade de DOCTEUR DE
L'UNIVERSITE DE POITIERS**

**(Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées)
(Diplôme National - Arrêté du 7 août 2006)**

Préparée au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) dans le cadre de l'École
Doctorale

Sciences et Ingénierie pour l'Information

Secteur de Recherche : Électronique des Hautes Fréquences, Photonique et systèmes

Présentée par

Mame Diarra Bousso Lô

Sujet de la thèse

**Étude paramétrique et analyse conjointe modélisations / mesures
pour la définition d'indicateurs d'expositions aux ondes
électromagnétiques en environnement urbain**

Directeur de Thèse : M. Yannis Pousset
Co-Directeur de Thèse : M. Pierre Combeau

Soutenue le 12 janvier 2017

devant la Commission d'Examen :

M. Joe WIART, Titulaire de la chaire C2M, Télécom ParisTech, habilité
M. Ghais EL ZEIN, Professeur des Universités, INSA de Rennes
M. Jean-Benoît AGNANI, Chef du département exposition du public, ANFR
M. Bernard UGUEN, Professeur des Universités, Université de Rennes 1
M. François GAUDAIRE, Ingénieur de recherche, CSTB
M. Yannis POUSSET, Professeur des Universités, Université de Poitiers
M. Pierre COMBEAU, Maître de conférences, Université de Poitiers
M. Nicolas NOÉ, Ingénieur de recherche, CSTB

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Directeur de thèse
Co-encadrant de thèse
Co-encadrant de thèse

Dédicaces

Je dédie ce travail :

à Cheikhoul Khadim,

à mon père Omar Sénéba Lô, ma mère Ndeye Aminata Sylla, mon mari Serigne Modou

Bouso Ndiaye, ma fille Fanta Ndiaye,

à mon Tonton Moussa MBAYE,

à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin durant toutes ces années d'études

particulièrement, mes frères et sœurs ainsi que mon beau frère Mamadou Lamine AW.

Je ne peux pas terminer ces dédicaces sans penser à mon ami Daouda Ndong, doctorant en télécom comme moi, avec qui j'ai partagé pleins de moment de discussion autour de ce sujet de thèse et qui a perdu la vie ce 2 mai 2016 à Nouakchott suite à un accident sur la route vers le Sénégal, sa thèse ne sera jamais soutenue. Que le bon Dieu l'accueille dans son paradis.

Remerciements

Mes premiers remerciements sont adressés à M. Christophe Martinsons, responsable de la division éclairage et électromagnétique, pour m'avoir offert la possibilité de faire ma thèse au CSTB.

J'exprime ma profonde reconnaissance envers l'initiateur et encadrant de cette thèse, Nicolas Noé, sa confiance, son écoute, ses encouragements, ses conseils, durant toutes ces années, ont été des éléments moteurs dans l'accomplissement de cette thèse.

Je tiens à exprimer aussi toute ma reconnaissance à M. Yannis Pousset mon directeur de thèse, M. Pierre Combeau mon co-directeur et M. François Gaudaire mon co-encadrant pour leurs compétences, leurs grandes disponibilités et leurs conseils durant toute la période de cette thèse. Leurs points de vue toujours pertinents et leurs nombreuses idées ont régulièrement orienté mon travail. Je leur suis profondément reconnaissante pour leurs rôles qu'ils ont parfaitement tenus.

Je tiens également à remercier M. Joe Wiart responsable du laboratoire commun de l'Institut Mines Telecom et de Orange labs et le professeur M. Ghais El Zein de l'INSA de Rennes pour avoir accepté de rapporter ce travail de thèse.

J'adresse également tous mes remerciements au professeur M. Bernard Uguen de l'ISIR de Rennes et M.

Jean-Benoît Agnani chef du département exposition de l'ANFR pour avoir accepté de participer à ce jury.

Je remercie toute l'équipe de l'éclairage et électromagnétique de Nantes pour l'accueil et la bonne ambiance, particulièrement Michel avec qui j'ai partagé beaucoup de moments d'échanges ainsi que toutes les personnes ayant séjourné dans mon bureau et avec qui nous avons discuté longuement sur divers sujets.

Table des matières

Résumé

Avec la multiplication des antennes radios, due à l'augmentation du nombre des abonnés et des nouveaux services et usages, l'exposition aux ondes électromagnétiques est devenue un sujet interpellant toute une catégorie de personnes, notamment les collectivités locales, les opérateurs, les associations, etc. Dans le domaine de l'exposition des populations aux champs électromagnétiques radiofréquences en milieu urbain, la modélisation numérique a pris depuis quelques années de plus en plus d'importance du fait de la montée en puissance des outils de calcul et de la quantité et qualité des données topographiques disponibles. Elle est utilisée conjointement avec plusieurs types de mesures pour l'analyse et la gestion de risques, comme support d'aide à la décision publique, comme méthode réglementaire et plus largement pour la concertation entre public, industriels, collectivités territoriales, associations, etc. Les résultats de ces méthodes ont donc de plus en plus d'importance. Ce manuscrit permet d'améliorer les connaissances sur la quantification de l'exposition due aux antennes relais en associant mesures et simulations et en prenant en considération la notion de variabilité du champ électrique.

Une première partie du travail réalisé a permis de déterminer les avantages et les limites des méthodes de calcul, et de même pour les mesures, dans le cadre de l'évaluation de l'exposition à l'échelle urbain. Une seconde partie du travail réalisé a permis de caractériser la variabilité spatiale et temporelle de l'exposition réelle, un point essentiel du fait de la grande variabilité du champ électrique et de la difficulté de trouver un indicateur pertinent pour quantifier l'exposition réelle.

Abstract

With the increasing number of mobile phone users, new services and mobile applications, the proliferation of radio antennas has raised concerns about human exposure to electromagnetic waves. This is now a challenging topic to many stakeholders such as local authorities, mobile phone operators, citizen and consumer groups, etc. The assessment of human exposure to radiofrequency electromagnetic fields in the urban environment is mainly based on numerical modeling. The improvement of computational tools together with the quantity and quality of available topographic data has strongly promoted this approach. Numerical modeling is now used in combination with several types of measurements to perform risk analysis and management. It is the basis of decision-making tools and local regulations. It is also used during consultations between the public, the industry, local authorities, governments and associations. The results of these methods are therefore increasingly important. This research contributes to gain knowledge about quantifying the human exposure from base stations through the combination of measurements and simulations, while taking into account the concept of variability of the electrical field.

A first part of this work establishes the benefits and limitations of computational methods as well as measurements when assessing exposure to electric fields in urban environment. A second part of this work is allowed the characterizing the spatial and temporal variability of the actual exposure, which is a very important requirement because of the high variability of the electrical field and the difficulty of finding a relevant indicator to quantify the real exposure.

Mots clé : Modélisations, mesures, exposition réelle, champ électrique, zone d'exposition, incertitudes, sensibilité

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Créé en 1947, le CSTB est un établissement public à caractère industriel et commercial placé sous la tutelle du ministre du logement et du ministre de l'écologie, du développement durable et des transports. Il exerce son activité en toute indépendance vis-à-vis des industriels et des professionnels de la construction, dont il est partenaire. Il exerce quatre activités clés : la recherche, l'expertise, l'évaluation, et la diffusion des connaissances, organisées pour répondre aux enjeux du développement durable dans le monde de la construction. Son champ de compétences couvre les produits de construction, les bâtiments et leurs intégrations dans les quartiers et les villes. Cette thèse s'est effectuée à Nantes dans la division Éclairage Électromagnétisme de la direction Santé Confort du CSTB. Cette direction comprend plusieurs équipes qui poursuivent des recherches de pointe dans les domaines de la modélisation et de la caractérisation de la propagation des ondes sonores, lumineuses et électromagnétiques dans les environnements intérieurs et extérieurs, et dans la reconstruction virtuelle des ambiances associées.

La division Éclairage Électromagnétique a acquis depuis plus de quinze ans une grande expérience dans le domaine de la modélisation et de la mesure des phénomènes radioélectriques. Son expertise dans ce domaine a abouti au développement d'un logiciel de simulation de l'exposition au rayonnement électromagnétique à l'échelle d'une ville, utilisé pour aider à la concertation entre les riverains, les collectivités locales et les opérateurs téléphoniques. Il est également, de par son volet recherche, un grand acteur sur les débats concernant la caractérisation de l'exposition. Ainsi, de cette vision de l'équipe de consolider ses outils de simulation dans un contexte général de la caractérisation de l'exposition et d'apporter des solutions sur les problématiques actuelles de l'exposition, est né le sujet de cette thèse, intitulée "Étude paramétrique et analyse conjointe modélisations / mesures pour la définition d'indicateurs d'expositions aux ondes électromagnétiques en environnement urbain".

Un champ électromagnétique est par définition un couplage d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Les champs électromagnétiques se propagent par les ondes électromagnétiques. Pour des fréquences comprises entre 0 et 300 GHz, on distingue trois types de champs :

- les champs statiques ;
- les champs basses fréquences ;
- les radiofréquences.

Le domaine qui nous intéresse dans cette thèse est celui des radiofréquences. Les champs électromagnétiques radiofréquences (RF) sont ceux dont la fréquence est comprise entre 10 kHz et 300 GHz. Ils ont pour principale origine les antennes de radio, de télévision, de radar et de communication mobile mais également les fours à micro-ondes. Ils sont à la base des télécommunications en général et notamment des systèmes radioélectriques sur toute la planète. L'exposition à ces sources radiofréquences est aujourd'hui d'actualité depuis l'utilisation intensive des objets communicants sans fil. La présence d'antennes de stations de base de téléphonie mobile ou d'émetteurs wifi inquiète les riverains. Les manifestations d'associations contre ces ondes électromagnétiques sont devenues fréquentes. Dans le monde, à fin 2016, ce sont plus de 7 milliards d'abonnements mobiles qui étaient souscrits (voir figure ??), soit quasiment la totalité de la population mondiale, selon l'ITU (International Telecommunication Union). Le nombre d'abonnés à la téléphonie mobile s'élevait à 73,0 millions en France au 31 décembre 2016 selon l'ARCEP (Autorité de Régulation des Communications Électroniques et des Postes). Beaucoup de personnes demandent aux pouvoirs publics d'appliquer le principe de précaution, de modifier les normes d'exposition actuelles et de réduire les niveaux d'émissions. Dans ce principe de dualité entre qualité de services et risques sanitaires, les études de couverture doivent être complétées par une quantification de l'exposition, en vue de réduire les inquiétudes. Le sujet de cette thèse est né de l'idée d'exploiter la complémentarité des connaissances du CSTB et du laboratoire XLIM-SIC de Poitiers pour associer efficacement techniques de modélisation de l'exposition et méthodes d'analyses statistiques.



FIGURE 1 – Évolution de nombre des utilisateurs de téléphone portable dans le monde

La question de l'exposition aux OEMs (Ondes Électromagnétiques) a fait l'objet de nombreuses études dans la littérature lors de cette dernière décennie. Depuis, le seul risque avéré est l'augmentation de la température des tissus du corps humain. Les premiers actes concrets dans le monde entier pour limiter ces risques ont été l'établissement de normes et recommandations comme la norme ANSI (American National Standards Institute) ou la norme ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). ANSI est la norme de base américaine permettant de réguler l'exposition des humains aux champs électromagnétiques et ICNIRP, celle utilisée par la plupart des pays européens. L'historique de ces normes est présentée en annexe, voir ?? (??). Ces normes et recommandations n'ont cessé d'évoluer depuis leurs établissements. Cette évolution a permis ainsi de prendre en compte différents aspects de l'exposition et d'orienter les débats actuels sur la question. Cependant, malgré les nombreux efforts consentis sur le plan mondial sur le rayonnement électromagnétique, l'exposition continue à alimenter le débat d'autant plus qu'on assiste aujourd'hui à une augmentation continue de l'usage des technologies radios. Cette question interpelle aujourd'hui plusieurs acteurs, à savoir les ministères, les agences de l'état, les centres techniques, les scientifiques académiques, les opérateurs, les associations, les entreprises, ... Les débats actuels font systématiquement apparaître une grande difficulté à forger des constats objectifs des situations rencontrées (caractérisation d'une situation, comparaison entre situation, ...) du fait de l'absence d'indicateurs objectifs et robustes de l'exposition. Ceci dit, les normes à elles seules ne suffisent plus pour traiter les problématiques de l'exposition, la connaissance des niveaux réels est devenue une nécessité. La diversité sur les valeurs de référence, la multiplicité des normes, les nombreux cas de configurations d'exposition, montrent la complexité du problème et l'impossibilité de pouvoir traiter la question de l'exposition en une seule approche exhaustive. Cela montre qu'il est nécessaire d'augmenter les efforts de recherche pour une meilleure connaissance de l'exposition réelle au rayonnement électromagnétique d'une part et d'autre part de pouvoir prendre en compte les éventuelles évolutions des technologies et applications radios qui inondent le marché des télécoms.

Actuellement par rapport aux normes nous pouvons faire référence à deux grandeurs de base permettant de vérifier l'exposition aux OEMs :

- **le champ électrique ;**
- **le DAS** (Débit d'Absorption Spécifique).

Ces deux grandeurs se distinguent par leurs méthodes d'évaluations que ce soit en mesure ou en simulation. En termes de propagation le DAS, de par sa définition littéraire indique une relation d'interaction entre un

usager (récepteur) et un appareil radio (émetteur). Le champ électrique quant à lui mesure simplement la force électrique reçue d'un émetteur en tout point de l'espace (récepteur), il n'y a pas la notion d'interaction. Ainsi au coeur de ce sujet de grande envergure se dessinent deux importantes questions : comment étudier ces deux grandeurs (mesure, simulation, DAS, champ électrique, champ proche, champ lointain, ...) ? et comment définir les niveaux d'expositions réels en fonction de ces grandeurs au vu des nombreux cas de configuration que l'on peut rencontrer (long-terme, court-terme, personnelle, grande échelle, publique, professionnelle, variabilité spatio-temporelle, type de technologie, environnement intérieur-extérieur, ...) ? Cette thèse s'inscrit en partie sur ces deux axes et plus particulièrement sur la caractérisation de l'exposition réelle en champ lointain. En France, le débat s'est focalisé sur les antennes relais de téléphonie mobile pour le public et sur les systèmes de type wifi en milieu professionnel. Les outils de simulation en champ lointain sont une solution appropriée pour étudier l'exposition du public due aux rayonnements des antennes relais de téléphonie mobile.

L'exposition aux ondes peut être étudiée par des mesures ou des simulations. Les améliorations des capacités informatiques permettent aujourd'hui une évaluation de l'exposition à l'aide de simulations numériques. Les outils de simulation champ proche et champ lointain sont souvent utilisés pour étudier l'exposition par exemple la méthode numérique des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) [?] pour l'estimation du DAS et la méthode de lancer de rayons pour le champ électrique. La modélisation numérique donne une approche à grande échelle et permet de s'affranchir des coûts liés aux campagnes de mesure. D'autant plus que les mesures deviennent très rapidement obsolètes avec la configuration du réseau des opérateurs qui peut subir des modifications à tout moment. Ces modifications sont dues à la densité de la population ou des usages (nouvelles antennes, nouveaux bâtiments, événements ponctuels : match de football, concert, passage à la nouvelle année). Les mesures sont coûteuses lorsqu'on veut les faire sur plusieurs sites. L'autre aspect lié aux mesures de l'exposition est l'impossibilité de pouvoir en faire dans des zones comme par exemple les façades où encore dans les rues à cause d'une forte variabilité de l'environnement (passage de voitures, piétons). La modélisation présente l'avantage de pouvoir être faite partout et à moindre coût ; cependant à cause des incertitudes qui sont d'ordres diverses (précision du modèle géométrique, précision sur les paramètres d'antenne, précision sur les paramètres du modèle de calcul), l'utilisation des mesures sur des zones précises est nécessaire pour une meilleure prise en compte de l'exposition. De même, les conclusions tirées du projet DICER [?] ont montré clairement que l'évaluation de l'exposition nécessite la prise en compte mutuelle des mesures et des simulations, l'une ne pouvant pas aller sans l'autre surtout pour l'exposition à grande échelle. Dès lors, il est important d'analyser la précision des modèles utilisés pour la simulation de même que celle des mesures. Et enfin de compte chercher comment exploiter mutuellement les mesures et les simulations pour apporter des éléments de réponse sur la caractérisation de l'exposition.

Au-delà du problème de conformité, qui est important d'un point de vue réglementaire et de la nécessité de trouver des outils adéquats pour étudier l'exposition réelle, sa quantification constitue aujourd'hui un défi majeur pour la communauté exposition. Des efforts importants ont été menés lors de ces dernières années pour quantifier l'exposition réelle. Dans [?], l'auteur a approfondi ce sujet en s'intéressant au phénomène de la variabilité pour la dosimétrie et la gestion et la propagation des incertitudes liées. Ce qui lui a permis de poser ainsi des fondements de techniques statistiques poussées en dosimétrie numérique pour l'évaluation du DAS. Également, des projets nationaux comme DICER [?] dont l'objectif était d'étudier les différentes méthodologies permettant de proposer des indicateurs pertinents caractérisant l'exposition des populations aux champs électromagnétiques radiofréquences, ont permis de poser des bases techniques consensuelles dans les discussions et débats en cours et de faciliter les comparaisons de scénarios. Ce projet a en particulier permis de définir un indicateur global d'exposition (**IGE**) qui fait le lien entre le **DAS** et le **champ électrique** en fonction des scénarios d'exposition. Cet indice prend en considération la durée de communication "voix" et la durée d'utilisation "data" des mobiles. Ce nouvel indice de l'exposition donne une nouvelle envergure dans la manière de traiter l'exposition en visant à combler l'écart entre les deux façons distinctes de traiter de l'exposition à savoir l'exposition induite par les points d'accès ou stations de base (champ lointain) et l'exposition induite par les équipements sans fil personnels (champ proche). Un projet Européen encore plus récent LEXNET [?] dont l'objectif était de développer des solutions efficaces qui permettraient de réduire d'au moins 50% l'exposition du public aux champs électromagnétiques radiofréquences, sans compromettre la qualité de service a permis la définition d'un indice d'exposition (**IE : Indice d'Exposition**) de la population aux champs électromagnétiques radiofréquences combinant l'exposition induite par les points d'accès ou stations de base et l'exposition induite par les équipements personnels (ordinateur portable, mobile, tablette, ...) pour différentes technologies radio. L'Indice d'Exposition LEXNET a été mis en œuvre afin d'analyser la performance et la pertinence des technologies radio à faibles champs électromagnétiques grâce à une méthodologie d'évaluation commune.

L'ensemble des études citées ci-dessus montrent l'importance de la zone de propagation (champ proche, champ lointain) sur la caractérisation de l'exposition. Ceci nous interpelle sur l'importance de la zone d'exposition sur la quantification de l'exposition réelle. Ainsi dans ce contexte de caractérisation de l'exposition, on s'intéressera à la question de la variabilité de l'exposition en champ lointain en utilisant conjointement les mesures et les simulations.

Afin de participer à une meilleure connaissance de l'exposition, les grands thèmes de cette thèse peuvent être divisés en deux volets, à savoir : l'utilisation conjointe de mesures et de simulations et l'exploitation de la notion de zone d'exposition sur la variabilité de l'exposition. En vue d'apporter des éléments de réponse sur la caractérisation de l'exposition à travers ces deux axes, ce manuscrit est organisé en quatre grandes parties.

Le premier chapitre est axé sur les méthodes de modélisation de la propagation des ondes. Un rappel sur les notions et outils de simulation à grande échelle est effectué, ensuite nous présentons la méthode de simulation utilisée dont les principes de base reposent sur les méthodes de lancer de rayon et enfin nous nous focalisons sur le concept de zone d'exposition qui constitue l'un des gros avantages de ces méthodes de lancer de rayon.

Le second chapitre s'intéresse à la mesure de l'exposition et aux critères qui permettent de faire la comparaison avec les simulations. Nous exposons dans un premier temps les problématiques liées à la mesure de l'exposition, ensuite nous introduisons le protocole de mesure réglementaire en France et nous présentons l'ensemble des mesures exploitées dans le cadre de cette thèse. Enfin une dernière partie est consacrée aux critères permettant de comparer les mesures et les simulations de façon pertinente.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse conjointe des mesures et simulations pour l'estimation des incertitudes, erreurs et variabilité liée aux paramètres du modèle de simulation et l'incertitude des mesures. Nous faisons dans un premier temps une étude paramétrique du modèle de calcul pour connaître sa fiabilité, ensuite sa sensibilité par rapport à ses paramètres et enfin nous étudions l'impact des incertitudes de mesures sur la comparaison mesures et modélisations.

Le chapitre quatre analyse la variabilité du champ électrique selon les zones d'exposition pour participer à une meilleure caractérisation de l'exposition. La première partie axée sur la variabilité temporelle de l'exposition et la seconde sur la variabilité spatiale (locale et globale).

Chapitre 1

MODÉLISATION DE L'EXPOSITION AUX OEMs

1.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à la modélisation de l'exposition aux OEMs en champ lointain. Pour modéliser la propagation en champ lointain, les méthodes asymptotiques sont les plus pertinentes. L'outil de prédiction utilisé pour étudier les problématiques de l'exposition est basé sur ces méthodes. De ce fait, il est nécessaire de comprendre leurs concepts pour mieux appréhender le sujet. Nous présentons ainsi dans la première section de ce chapitre les différentes méthodes existantes en analysant leurs avantages et inconvénients par rapport à l'étude de l'exposition à l'échelle urbaine. Cette analyse motive le choix du modèle de calcul utilisé. Nous nous focaliserons ensuite sur la méthode de calcul et enfin nous présentons le concept de zone de visibilité qui est l'un des principaux avantages de la méthode utilisée et qui peut aider à participer à la définition d'un indicateur d'exposition en champ lointain.

1.2 Modélisation de la propagation des ondes en environnement urbain

1.2.1 Zone de propagation et outils de caractérisation

Les outils de caractérisation de la propagation des ondes électromagnétiques diffèrent selon la zone de propagation considérée car l'onde électromagnétique n'a pas les mêmes propriétés de propagation dans tout l'espace entourant une source.

1.2.1.1 Zone de propagation

En fonction de l'éloignement de l'antenne émettrice, on distingue classiquement quatre zones de propagation [?] définies comme suit :

- **La zone de champ réactif**

Cette zone est très "mince" et se situe à une distance de l'antenne inférieure à $\frac{\lambda}{2\pi}$, ce qui fait environ 5 cm pour une antenne GSM rayonnant à 900 MHz. λ est la longueur d'onde de l'antenne, exprimée en fonction de la fréquence d'émission et de la vitesse de propagation de l'onde dans le vide. Dans cette zone, les ondes sont évanescentes et les phénomènes de propagation sont négligeables devant les phénomènes radiatifs. Cette zone peut donc ne pas être spécifiquement prise en compte dans un outil de simulation sans porter atteinte à sa globalité ou à sa fiabilité.

- **La zone de Rayleigh**

Elle se situe à des distances de l'antenne comprises entre $\frac{2\lambda}{2\pi}$ et $\frac{D^2}{2\lambda}$, D étant la plus grande dimension de l'antenne (pour une antenne GSM 900 MHz de 1 m de diamètre, $\frac{D^2}{2\lambda} = 1,50$ m). L'énergie électromagnétique est confinée dans un cylindre autour de l'ouverture rayonnante. Il y a peu de divergence de l'onde.

- **La zone de Fresnel**

C'est une zone intermédiaire située entre $\frac{D^2}{2\lambda}$ et $\frac{2D^2}{\lambda}$. L'onde diverge naturellement. A la limite supérieure de la zone de Fresnel, l'ouverture vue de l'antenne est égale à la largeur angulaire du lobe principal $\frac{2\lambda}{D}$.

Cette règle permet de déterminer la limite supérieure L de la zone de Fresnel :

$$L = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1.1)$$

Associée à la zone de Rayleigh, ces deux zones constituent la **zone de champ proche** de l'antenne.

- **La zone de Fraunhofer**

Elle se situe au delà de $\frac{2D^2}{\lambda}$ et constitue ce qu'on appelle la **zone de champ lointain** de l'antenne. L'énergie rayonnée est confinée dans un faisceau conique et les ondes sont localement quasiment planes.

En considérant les distances sources-récepteurs et au vu des situations intéressantes d'exposition que l'on peut étudier dans un environnement urbain (par exemple l'étude de l'exposition des façades (récepteurs) d'une école due à une station de base (source) se trouvant en haut d'un bâtiment en face ou de l'exposition des rues d'une ville due aux stations de base se trouvant dans la zone), nous nous plaçons naturellement dans la **zone de champ lointain**.

1.2.1.2 Outils de caractérisation de la propagation

Il existe plusieurs méthodes numériques permettant de modéliser la propagation des ondes électromagnétiques. En fonction des besoins et des objectifs recherchés certains modèles peuvent être plus adaptés que d'autres. On peut les classer ici en trois catégories :

- Les méthodes rigoureuses,
- Les méthodes statistiques,
- Les méthodes asymptotiques.

Les méthodes rigoureuses sont des méthodes adaptées pour la caractérisation en zone de champ proche mais impossibles en zone de champ lointain. Il faut des méthodes simplifiées en zone de champ lointain compte tenu du volume des zones de calcul.

Les méthodes statistiques sont intéressantes pour l'étude de la couverture radio, mais pas pour l'étude de l'exposition car trop peu précises localement.

Dans la zone de champ lointain, ce sont les méthodes asymptotiques qui prédominent. Ces méthodes sont bien adaptées à la modélisation de l'exposition aux OEM en environnement urbain au vu de la dimension des objets. De plus, elles permettent de prendre en compte facilement les diagrammes de rayonnement des antennes en champ lointain (à la différence des méthodes rigoureuses, où le rayonnement doit être modélisé à l'aide de dipôles). L'outil utilisé ici pour la modélisation de l'exposition à l'échelle urbaine est donc basé sur l'utilisation de méthodes asymptotiques, à l'image de l'optique géométrique, où la propagation des ondes est modélisée par des "rayons". Les méthodes asymptotiques, au delà de leur adéquation à la modélisation à grande échelle, présentent aussi l'avantage de pouvoir analyser les différentes contributions de chaque émetteur grâce à l'identification des trajets directs, réfléchis et diffractés. Cette propriété des méthodes asymptotiques sera exploitée pour la caractérisation de l'exposition en un point donné ou à grande échelle grâce à la notion de **Zone de visibilité** ou **Zone d'exposition** que nous aborderons dans la section ??.

Avant la présentation de ces différentes méthodes nous rappelons d'abord les concepts fondamentaux de l'électromagnétisme.

1.2.2 Le formalisme électromagnétique

1.2.2.1 Rappel sur les Équations de Maxwell

Établies en 1870, les équations de Maxwell sont des lois fondamentales de la physique. Elles constituent les théories de base de l'électromagnétisme. Ces équations fournissent des relations entre les variations des quatre vecteurs caractéristiques du champ électromagnétique à savoir le champ électrique $\vec{E}$ (Volt/mètre), le champ magnétique $\vec{H}$ (Ampère/mètre), l'induction électrique $\vec{D}$ (Coulomb/mètre²), l'induction magnétique $\vec{B}$ (Tesla) en tout point de l'espace. Les variations temporelles s'expriment par la dérivée partielle par rapport au temps, les variations spatiales par l'intermédiaire des opérateurs différentiels : rotationnel et divergence.

Pour un milieu homogène et isotrope, les équations de Maxwell s'écrivent :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (1.2)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (1.4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.5)$$

avec $\vec{J}$ la densité de courant électrique et ρ la densité de charges électriques.

Les champs électrique $\vec{E}$ et magnétique $\vec{H}$ sont reliés aux inductions électrique $\vec{D}$ et magnétique $\vec{B}$ par les capacités inductives du milieu de propagation : la perméabilité μ et la permittivité ϵ .

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1.6)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1.7)$$

En régime harmonique les équations de Maxwell se réécrivent :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = j\omega\epsilon\vec{E} + \vec{J} \quad (1.8)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (1.9)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (1.10)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0 \quad (1.11)$$

avec $\omega = 2\pi f$ la vitesse angulaire de l'onde et f sa fréquence. La divergence de la première équation de Maxwell (??) permet de construire l'équation de conservation des charges électriques :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -j\omega\rho \quad (1.12)$$

Le rotationnel des deux premières équations de Maxwell (??) et (??) permet de construire les équations de propagation vérifiées par le champ électrique et le champ magnétique :

$$\vec{\nabla} \wedge \nabla \vec{E} - k^2 \vec{E} = -j\omega\mu\vec{J} \quad (1.13)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \nabla \vec{H} - k^2 \vec{H} = -\vec{\nabla} \wedge \vec{J} \quad (1.14)$$

avec k (rad.m⁻¹) le vecteur d'onde défini par :

$$k = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \quad (1.15)$$

La célérité c de l'onde électromagnétique dans le milieu de caractéristiques ω et μ est définie par :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (1.16)$$

Le vecteur d'onde k s'écrit donc aussi :

$$k = \frac{\omega}{c} \quad (1.17)$$

Les équations de conservation des charges électriques et les équations de propagation permettent d'avoir une nouvelle forme des équations de propagation des champs électrique et magnétique soumis à des conditions aux limites spécifiques. Elles se définissent comme suit :

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = j\omega\mu \left(\vec{J} + \frac{1}{k^2} \vec{\nabla} \vec{\nabla} \cdot \vec{J} \right) \quad (1.18)$$

$$\vec{\nabla}^2 \vec{H} - k^2 \vec{H} = \vec{\nabla} \wedge \vec{J} \quad (1.19)$$

1.2.2.2 Conditions aux limites

Les conditions aux limites permettent d'établir les relations de continuité des champs au passage de l'interface entre deux milieux. Elles imposent au passage de cette interface les relations de continuité suivantes :

$$\hat{n}_{21} \wedge (\vec{E}_1 - \vec{E}_2) = -\vec{K}_s \quad (1.20)$$

$$\hat{n}_{21} \wedge (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = -\vec{J}_s \quad (1.21)$$

avec $\hat{n}_{21}$ la normale sortante du milieu 1 au milieu 2, $\vec{J}_s$ la densité surfacique de courant électrique à l'interface et $\vec{K}_s$ la densité surfacique de courant magnétique équivalent à l'interface. La résolution des questions liées à l'électromagnétisme peut revenir dans certains cas à pouvoir résoudre les équations de type (??), (??). Cependant selon le type de problème que l'on souhaite étudier, il existe plusieurs façons de réécrire les équations de

Maxwell. Aujourd'hui avec la montée en puissance des outils de calcul, il existe plusieurs outils et méthodes numériques permettant de traduire le comportement de ces équations comme évoqué dans la précédente section. Un aperçu sur les deux premières méthodes sera d'abord présenté, ensuite nous nous focaliserons sur les méthodes asymptotiques qui ont connu des évolutions passant de l'optique géométrique à la théorie uniforme de la diffraction.

1.2.3 Méthodes rigoureuses de résolution des équations de Maxwell

Il existe plusieurs méthodes de résolution numérique de ces équations. Nous aborderons la FDTD, la TLM et la méthode des moments.

1.2.3.1 Méthode FDTD

Les méthodes basées sur les différences finies temporelles (Finite Difference Time Domain : FDTD) constituent une approche très populaire qui a d'abord été développée par Yee, en 1966, et initialement conçue pour la résolution numérique des équations différentielles et qui par la suite a été largement adoptée dans la modélisation des problèmes électromagnétiques. Cette approche a été aussi utilisée dans plusieurs autres domaines scientifiques comme la biologie, l'optique, l'acoustique et les vibrations. Fondée sur le schéma explicite de Yee, son principe consiste à approximer par différences finies les variations spatiales et temporelles des variables recherchées. Cela permet de pouvoir calculer à chaque pas de temps le champ en tout point de l'espace discrétisé, ce qui permet de bien modéliser des phénomènes transitoires, des bruits aléatoires, des impulsions et de bien prendre en compte des effets non linéaires. La formulation de base suppose une discrétisation spatiale sous forme d'un maillage cartésien avec un pas d'échantillonnage constant de la région modélisée. Son principe et son implémentation sont relativement simples et adaptables à divers types de problèmes. Le choix du pas d'échantillonnage influe toutefois sur la précision des résultats. Pour garantir la convergence des résultats, la discrétisation spatio-temporelle adoptée doit vérifier une condition de stabilité appelée « critère de Courant-Friedrich-Levy » [?],[?], qui établit une relation entre un maillage fin et un pas temporel réduit. La condition de stabilité constitue une des limitations des méthodes FDTD, car elle contraint d'avoir un échantillonnage fin pour éviter des effets de dispersion numérique. Par conséquent, elle peut exiger beaucoup de ressources informatiques. Aussi, les approximations de différences finies introduisent des inexactitudes dans la description des champs, surtout dans les régions de discontinuité et sur les frontières. Le maillage cartésien ne favorise pas non plus la modélisation de géométries et de conditions limites complexes. Plusieurs alternatives ont été développées ces dernières années pour optimiser la formulation de base des méthodes FDTD, afin de s'affranchir des limitations et de la rendre plus performante.

1.2.3.2 Méthode TLM (“Transmission Line Matrix”)

La méthode TLM (“Transmission Line Matrix”) est une méthode basée sur une discrétisation dans l'espace et dans le temps du champ électromagnétique. Elle est basée sur une analogie avec des lignes de transmission, connectées par des noeuds. Des impulsions électriques sont générées sur certains noeuds, et ces impulsions sont partiellement réfléchies et transmises aux interfaces, en fonction de l'impédance de la ligne de transmission. Cette méthode, originellement en 2D, a été étendue à la 3D. Moins répandue que la FDTD, cette méthode présente des performances équivalentes.

1.2.3.3 Méthode des moments

La méthode des moments est une méthode fréquentielle basée sur la résolution de la formulation intégrale des équations de Maxwell en courant. Elle permet de déterminer directement, et de manière précise, la distribution du courant dans les structures étudiées et de remonter ensuite au champ rayonné en tout point de l'espace [?]. Cela consiste en l'application du principe d'équivalence (surfactive ou volumique), principe grâce auquel la réponse d'un corps caractérisé par ses propriétés diélectriques, peut être assimilée à une distribution de courant équivalente dans le volume ou à la surface de l'hétérogénéité en question (ce qui revient par ailleurs à l'application du principe de Huygens) [?].

1.2.3.4 Synthèse

La méthode FDTD est principalement utilisée pour la quantification du DAS (champ proche) car elle présente l'avantage de pouvoir modéliser un corps humain avec un pas de maillage relativement fin (de l'ordre d'un millimètre) en tenant compte des caractéristiques diélectriques des tissus [?]. Cependant, comme évoqué précédemment (cf. ??), elle n'est pas adaptée à la modélisation en environnement urbain compte tenu du volume des zones de calcul (par exemple exposition d'un quartier). Quant à la méthode des moments, elle est adaptée à

la résolution des problèmes linéaires et gourmande en temps de calcul, ce qui n'est donc pas adaptée à la modélisation de l'exposition à grande échelle. Nous allons présenter dans la partie suivante les méthodes statistiques correspondant à la seconde famille de méthode de modélisation de la propagation.

1.2.4 Méthodes statistiques

Les méthodes empiriques sont des modèles de propagation reposant sur une formulation statistique dont les paramètres inconnus sont obtenus à partir de l'analyse d'un grand nombre de mesures expérimentales.

1.2.4.1 Modèle empirique macro-cellule Okumura-Hata

Ce modèle est adapté au réseau cellulaire en environnement rural ou urbain. Il tient compte de la fréquence, de la distance entre l'émetteur et le récepteur et de la hauteur de la station de base et du mobile. Il prend en considération également la nature de l'environnement en qualifiant son degré d'urbanisation (Urbain, Suburbain ou Rural).

Il est défini pour un environnement urbain par :

$$L_{urbain} = 69,55 + 26,16 \cdot \log_{10} f(MHz) - 13,82 \cdot \log_{10} h_{Base}(m) - a(h_{Mobile}) + (44,9 - 6,55 \cdot \log_{10} h_{Base}(m)) \cdot \log_{10} d(km) \quad (1.22)$$

où

$$a(h_{Mobile}) = (1,1 \cdot \log_{10} f(MHz) - 0,7) h_{Mobile}(m) - (1,56 \cdot \log_{10} f(MHz) - 0,8) \quad (1.23)$$

Pour un environnement suburbain, les pertes ont pour expression :

$$L_{suburbain} = L_{urbain} - 2 \left(\log_{10} \left(\frac{f}{28} \right) \right)^2 - 5,4 \quad (1.24)$$

Pour un environnement rural, les pertes ont pour expression :

$$L_{rural} = L_{urbain} - 4,78 \left[(\log_{10}(f))^2 + 18,33 \log_{10}(f) - 40,94 \right] \quad (1.25)$$

Le modèle Okumura-Hata a la plage de validité suivante :

- fréquence f : 150 MHz ... 1500 MHz ;
- distance d : 1 km ... 30 km ;
- hauteur de l'antenne émettrice h_{Base} : 30 m ... 200 m ;
- hauteur de l'antenne de réception h_{mobile} : 1 m ... 10 m.

1.2.4.2 Modèle empirique macro-cellule COST231-Hata

Il s'agit d'une réutilisation du modèle macro-cellule Okumura-Hata développé pour étendre son utilisation sur les bandes 1500 à 2000 MHz [?]. L'affaiblissement de parcours en environnement urbain est donné par l'expression suivante :

$$L_{urbain} = 46,3 + 33,9 \log_{10} f(MHz) - 13,82 \log_{10} h_{Base}(m) - a(h_{Mobile}) + (44,9 - 6,55 \log_{10} h_{Base}(m)) \log_{10} d(km) + C_m \quad (1.26)$$

où $a(h_{Mobile})$ est définie par l'équation (??) et

$$C_m = \begin{cases} 0 \text{ dB} & \text{pour des villes de taille moyenne et les banlieues} \\ 3 \text{ dB} & \text{pour les grands centres métropolitains} \end{cases} \quad (1.27)$$

Une extension du Modèle empirique macro-cellule COST231-Hata existe pour la prise en compte des bandes 2000-2100 MHz. Le modèle de Hata et ses dérivées ne doivent pas être utilisés sur des micro-cellules [?].

1.2.4.3 Modèle empirique macro/micro cellule COST231 Walfish-Ikegami

Il s'agit d'une fusion des modèles de Walfish et d'Ikegami par le groupe de travail COST231 [?], en vue d'un modèle de propagation pour environnement urbain avec antennes sur les toits. Ce modèle prend en compte les propriétés de diffraction et de réflexion par les bâtiments, ce qui lui permet d'offrir une bonne précision. Seul l'effet de guide d'onde par des bâtiments rapprochés n'est pas pris en compte. Il est adapté au macro, micro et picocellule. Il est adapté au cas LOS (Line Of Sight) et NLOS (Non Line Of Sight) entre antennes émettrice et réceptrice. Il prend en compte les hauteurs et séparations moyennes des bâtiments, ainsi que les largeurs moyennes des rues. Ce modèle fait la distinction entre les situations d'atténuation L_{LOS} et L_{NLOS} .

$$L_{LOS} = 42,6 + 26 \cdot \log d(km) + 20 \cdot \log f(MHz) \quad (1.28)$$

$$L_{NLOS} = L_0 + \max(0, L_{rts} + L_{msd}) \quad (1.29)$$

Avec, L_o : la perte de propagation en espace libre; L_{rts} : le facteur de correction lié aux rayons diffractés et diffusés par les bâtiments se dirigeant vers les rues; L_{msd} : le facteur de correction lié aux multiples diffractions (par diffraction, on entend ici créé par l'interaction avec un objet) par les alignements de bâtiments.

Il existe bien d'autres modèles empiriques, tels que : 3GPP TR 36.942 version 8.2.0 (LTE), ERCEG (adopté par le groupe IEEE 802.16), Lee, etc.. mais nous n'avons présenté que les plus connus.

1.2.4.4 Synthèse

Les méthodes empiriques présentent l'avantage d'être rapides en temps de calcul. Néanmoins, leurs résultats sont fortement liés aux environnements dans lesquels les mesures ont été effectuées. Ainsi, le modèle doit être calibré par rapport à l'environnement étudié. De plus, ces méthodes sont appliquées pour l'étude de la couverture et n'offrent pas de connaissance spatiale locale et ne sont donc pas adaptées à la modélisation de l'exposition. Nous allons maintenant aborder les méthodes asymptotiques qui correspondent à la troisième famille de méthodes permettant de modéliser le rayonnement électromagnétique. Nous allons décrire l'évolution de ces méthodes de l'optique géométrique à la théorie uniforme de la diffraction.

1.2.5 L'optique géométrique

L'optique géométrique fut la première méthode asymptotique mise au point pour décrire l'interaction d'une onde avec un objet. C'est une méthode hautes fréquences donc les longueurs d'onde sont faibles. Typiquement, la longueur d'onde doit être petite par rapport aux dimensions de la scène. La propagation des ondes, que ce soit en optique, en électromagnétisme, en acoustique, peut être assimilée à la construction géométrique de fronts d'onde : ce sont les surfaces sur lesquelles une perturbation est reçue. A partir de ces surfaces on peut construire les lignes de flux associées, que l'on appelle rayons.

La méthode de l'optique géométrique appliquée à l'électromagnétisme vise alors à décrire les champs électriques et magnétiques au voisinage de ces rayons. Les principes de l'optique géométrique appliqués à l'électromagnétisme ont été découverts en grande partie par analogie à la propagation de la lumière et ont donné lieu à des théorèmes généraux tels que la loi de Snell-Descartes, le principe de Huygens, le principe de Fermat notamment. Le fondement mathématique de l'optique géométrique est une approximation hautes fréquences des équations de Maxwell qui permet de prédire le champ en zone éclairée. Une extension importante du formalisme a été apportée par l'introduction de la théorie géométrique de la diffraction pour expliquer la pénétration du champ dans les zones d'ombre [?]. Cette généralisation de l'optique géométrique permet de rendre compte des phénomènes de diffraction notamment dans les zones d'ombres du champ incident, grâce à l'introduction d'un nouveau type de rayon, le rayon diffracté.

La théorie et la mise en oeuvre des méthodes asymptotiques en EM (électromagnétisme) a été largement détaillée dans [?]. Un aperçu plus synthétique de l'optique géométrique et de la TUD est donné par Conil dans [?]. Les notions importantes utilisées par la suite seront présentées dans ce document.

1.2.5.1 Principe de localité

L'optique géométrique se base sur le principe de localité selon lequel, aux hautes fréquences, le champ diffracté par un objet ne dépend pas du champ en tout point de l'objet mais uniquement du champ au voisinage de certains points particuliers que l'on appellera points de diffraction. De ce principe de localité, découle la notion de rayon qui représente la trajectoire suivie par l'onde. Le domaine de validité des méthodes asymptotiques en général, et de l'optique géométrique en particulier, est celui des champs de rayons. Un champ électromagnétique sera qualifié de champ de rayons lorsque l'onde pourra être assimilée à une onde plane le long d'un rayon et les lignes de flux perpendiculaires aux fronts d'ondes. Sa phase et son amplitude varient lentement perpendiculairement à la direction de propagation. Dans cette hypothèse, l'étude du champ électromagnétique consiste à déterminer les rayons et à calculer les champs électromagnétiques qui y sont associés.

1.2.5.2 Principe de Fermat

En 1657, Fermat pose les bases de l'optique géométrique en énonçant le premier principe fondamental de l'optique : **"La nature agit toujours par les voies les plus courtes"**.

Le principe de Fermat s'énonce aussi sous la forme suivante, moins générale mais plus explicite : **"la lumière se propage d'un point à un autre suivant une trajectoire telle que la durée du parcours soit stationnaire"** (Fermat 1657). Ce principe permet de déterminer les trajectoires des rayons. Ainsi, dans un milieu homogène, les rayons se propagent suivant des lignes droites. Il permet également de retrouver les lois de Snell-Descartes établies en 1637 qui régissent la réflexion et la réfraction d'une onde.

Considérons, comme illustré sur la figure ??, une interface entre deux milieux homogènes de permittivités relatives ϵ_1 et ϵ_2 et d'indices de réfraction $n_1 = \sqrt{\epsilon_1}$ et $n_2 = \sqrt{\epsilon_2}$, et un rayon incident de direction $\vec{u}_i$. On définit $\vec{u}_r$ la direction de propagation du rayon réfléchi et la direction du rayon réfracté $\vec{u}_t$. Ces notations permettent d'introduire les plans d'incidence, de réflexion et de réfraction définis par la normale à l'interface au point d'interaction et respectivement le rayon incident, le rayon réfléchi et le rayon réfracté (transmis) (voir figure ??).

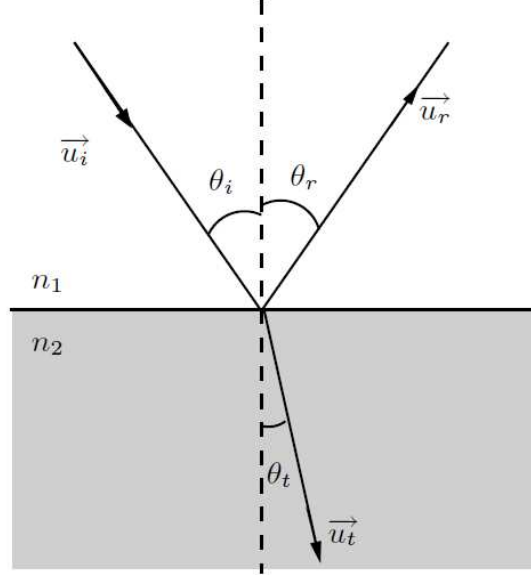


FIGURE 1.1 – Lois de Snell-Descartes : une onde incidente de direction $\vec{u}_i$ donne naissance à l'interface entre deux milieux homogènes d'indices n_1 et n_2 à, au plus, une onde réfractée de direction $\vec{u}_t$ et une onde réfléchie de direction $\vec{u}_r$.

Lois de Snell-Descartes (1637)

- **1ère loi** : pour un rayon incident, il existe un seul rayon réfléchi et, au plus, un seul rayon réfracté et, les plans d'incidence, de réflexion et de réfraction sont confondus.
- **2ème loi** : les angles de réflexion et de réfraction vérifient les équations (??) et (??).

$$\sin \theta_i = \sin \theta_r \quad (1.30)$$

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (1.31)$$

1.2.5.3 Champ direct

La propagation d'une onde électromagnétique le long d'un rayon se caractérise par les lois d'évolution de la phase et de l'amplitude des champs électrique et magnétique. Ces lois sont obtenues en traduisant l'hypothèse de hautes fréquences dans les équations de Maxwell et la conservation de l'énergie le long d'un rayon. L'hypothèse hautes fréquences correspond au domaine des faibles longueurs d'onde puisqu'on rappelle que la longueur d'onde est inversement proportionnelle à la fréquence. Le facteur de proportionnalité étant la vitesse c de l'onde dans le milieu :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.32)$$

Le seuil de fréquence au delà duquel on suppose être en haute fréquence dépend du rapport longueur d'onde - dimensions des objets. Cette limite fluctue donc en fonction des domaines. On considère qu'au delà de 300 MHz ($\lambda = 1$ m), on se situe dans le domaine des hautes fréquences pour toutes les applications de télécommunication mobile.

- **L'Eikonal** : l'approche eikonale permet d'introduire la notion d'un faisceau optique à partir des ondes électromagnétiques. Il permet ainsi faire le lien entre la théorie des ondes électromagnétiques et l'optique géométrique. On exprime alors les champs électrique $\vec{E}(\vec{r})$ et magnétique $\vec{H}(\vec{r})$ à l'aide d'enveloppes

vectérielles $\vec{e}(\vec{r})$ (équation (??)) et $\vec{h}(\vec{r})$ (équation (??)) réelles, lentement variables par rapport à la longueur d'onde et d'une quantité réelle scalaire $S(\vec{r})$ appelée eikonal.

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{e}(\vec{r}) \exp(-jk_0 S(\vec{r})) \quad (1.33)$$

$$\vec{H}(\vec{r}) = \vec{h}(\vec{r}) \exp(-jk_0 S(\vec{r})) \quad (1.34)$$

La phase Φ des champs est directement reliée à l'eikonal par l'équation (??).

$$\Phi(\vec{r}) = k_0 S(\vec{r}) \quad (1.35)$$

En reportant ces expressions de $\vec{E}$ et $\vec{H}$ dans les équations de Maxwell (??) - (??), on obtient le système d'équations (??), (??), (??), (??).

$$\nabla S \wedge \vec{e} - \frac{1}{jk_0} \nabla \wedge \vec{e} = c\mu_0 \vec{h} \quad (1.36)$$

$$\vec{e} \cdot \nabla S = \frac{1}{jk_0} \nabla \cdot \vec{e} \quad (1.37)$$

$$\vec{e} \cdot \nabla S = \frac{1}{jk_0} \cdot \vec{h} \quad (1.38)$$

$$\nabla S \wedge \vec{h} + c\epsilon_0 \vec{e} = -\frac{1}{jk_0} \nabla \wedge \vec{h} \quad (1.39)$$

- **Approximation de l'optique géométrique** : l'optique géométrique est une méthode asymptotique hautes fréquences. Le domaine des hautes fréquences correspond à des faibles longueurs d'onde et donc à des grands nombres d'onde k_0 puisque

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.40)$$

. L'approximation de l'optique géométrique consiste à négliger les termes en $\frac{1}{k_0}$ dans le système d'équations établi précédemment (??)-(??) qui devient alors le système d'équations défini par (??), (??), (??), (??).

$$\nabla S \wedge \vec{e} - c\mu_0 \vec{h} = \vec{0} \quad (1.41)$$

$$\vec{e} \cdot \nabla S = 0 \quad (1.42)$$

$$\vec{h} \cdot \nabla S = 0 \quad (1.43)$$

$$\nabla S \wedge \vec{h} + c\epsilon_0 \vec{e} = \vec{0} \quad (1.44)$$

On remarque dans ce nouveau système d'équations que les champs électrique et magnétique sont perpendiculaires au gradient de l'eikonal S . La phase de l'onde est déterminée par le terme en $k_0 S$. Les surfaces d'ondes, ou surfaces équiphases, sont donc perpendiculaires au gradient de S porté par la direction de propagation locale.

- **Loi de propagation de la phase** : à partir de l'équation (??), on exprime l'enveloppe du champ magnétique $\vec{h}$ en fonction de celle du champ électrique $\vec{e}$.

$$\vec{h} = \frac{1}{c\mu_0} \nabla S \wedge \vec{e} \quad (1.45)$$

La dernière équation (??) du système devient alors l'équation (??).

$$\nabla S \wedge (\nabla S \wedge \vec{e}) + \vec{e} = \vec{0} \quad (1.46)$$

En développant le double produit vectoriel et en utilisant l'équation (??), on obtient l'équation dite eikonale.

$$|\nabla S|^2 = 1 \quad (1.47)$$

Cette équation et le lien (??) entre la phase de l'onde et l'eikonal permettent de déterminer la loi de propagation de la phase entre deux points $\vec{r}$ et $\vec{r}_0$.

$$\phi(\vec{r}) = \phi(\vec{r}_0) + k_0 \left\| \vec{r} - \vec{r}_0 \right\| \quad (1.48)$$

- **Loi de conservation de l'énergie** : sur la figure ??, on a représenté un faisceau astigmatique quelconque formé de quatre rayons notés r_1, r_2, r_3 et r_4 . L'axe de ce faisceau est en pointillé sur la figure et le front d'onde a été représenté en gris pour deux positions différentes P_0 et P séparées d'une abscisse curviligne s . Le faisceau est dit astigmatique car il n'est pas issu d'un point focal qui serait situé sur l'axe du faisceau mais de deux caustiques F_1F_2 et F_3F_4 . Le faisceau est caractérisé par ses deux distances caustiques ρ_1 et ρ_2 . La conservation de l'énergie du champ $\vec{U}$ (qui représente indifféremment le champ électrique $\vec{E}$ ou le champ magnétique $\vec{H}$) dans le faisceau se traduit par l'équation (??).

$$|\vec{U}(P)|^2 dS(P) = |\vec{U}(P_0)|^2 dS(P_0) \quad (1.49)$$

où $dS(P_0)$ et $dS(P)$ représentent les aires du front d'onde aux points P_0 et P .

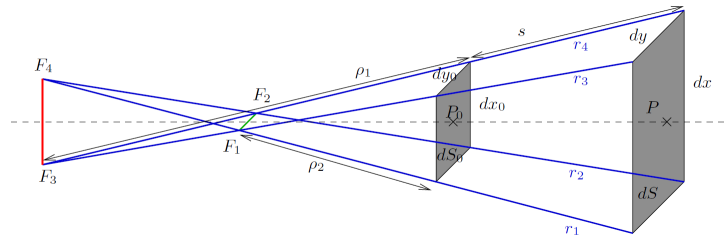


FIGURE 1.2 – Faisceau d'onde plane : il est composé de 4 rayons r_1, r_2, r_3 et r_4 . F_1F_2 et F_3F_4 sont les deux caustiques caractérisées par ρ_1 et ρ_2 , dS_0 et dS sont les surfaces du front d'onde pour le point de référence P_0 et le point P d'abscisse curviligne s .

Le rapport entre les surfaces du front d'onde permet d'établir le facteur de divergence géométrique A associé à la propagation du champ $\vec{U}(P)$ en espace libre.

$$A(P_0, P) = \frac{|\vec{U}(P)|}{|\vec{U}(P_0)|} = \sqrt{\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + s)(\rho_2 + s)}} \quad (1.50)$$

1.2.5.4 Polarisation des ondes électromagnétiques

La polarisation correspond à l'orientation du champ électrique. L'onde électromagnétique est polarisée et la polarisation est conservée lors de la propagation le long d'un rayon. On décompose la polarisation dans des systèmes de coordonnées liés aux rayons. On définit le plan d'incidence qui contient le rayon incident et la normale au point d'interaction. La composante du champ électrique normale au plan d'incidence est appelée TE, pour transverse électrique, ou composante perpendiculaire. La composante du champ électrique appartenant au plan d'incidence est appelée TM, pour transverse magnétique, ou composante parallèle. Les ondes étant supposées planes, elles n'ont pas de composante suivant le vecteur directeur du rayon (composante de propagation). La polarisation des ondes est illustrée sur la figure ?? et peut être écrite sous la forme :

$$\vec{E} = E_{\text{parallèle}} \vec{u}_{\text{parallèle}} + E_{\text{orthogonal}} \vec{u}_{\text{orthogonal}} \quad (1.51)$$

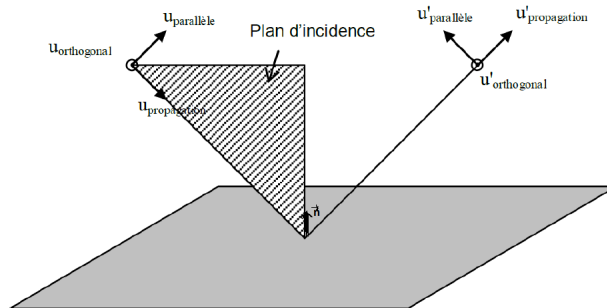


FIGURE 1.3 – Polarisation des ondes électromagnétiques

1.2.5.5 Champ réfléchi

On considère des matériaux non magnétiques ($\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$), linéaires, homogènes et isotropes. La permittivité diélectrique complexe est définie comme : $\bar{\epsilon} = \bar{\epsilon}_r \cdot \epsilon_0$. Le paramètre $\bar{\epsilon}_r$ représente la permittivité relative complexe et ϵ_0 une constante égale à $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$.

La permittivité relative complexe s'exprime par :

$$\bar{\epsilon}_r = \epsilon_r - j \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0} \quad (1.52)$$

où f est la fréquence (en Hz), σ la conductivité (en Sm) et ϵ_r la permittivité relative.

Pour la réflexion du champ électrique, l'hypothèse de localité (dans la théorie des rayons) permet de justifier l'existence d'un coefficient de réflexion permettant de relier le champ après réflexion au champ avant réflexion. Ces coefficients sont différents pour les ondes TM et TE. Ils sont définis par :

$$R_{\parallel} = \frac{\cos \theta - \sqrt{\bar{\epsilon}_r - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\bar{\epsilon}_r - \sin^2 \theta}} \quad (1.53)$$

$$R_{\perp} = \frac{\bar{\epsilon}_r \cos \theta - \sqrt{\bar{\epsilon}_r - \sin^2 \theta}}{\bar{\epsilon}_r \cos \theta + \sqrt{\bar{\epsilon}_r - \sin^2 \theta}} \quad (1.54)$$

avec θ l'angle d'incidence sur la surface ($\theta = 0$ pour une incidence normale). Dans le cas d'un matériau parfaitement conducteur (métallique), σ est infini et on a alors $R_{\parallel} = -1$ et $R_{\perp} = 1$.

1.2.5.6 Champ transmis

Un coefficient d'atténuation peut être défini pour un matériau donné. Il est exprimé en dB et peut être dépendant de la fréquence. Il est utilisé pour le calcul des niveaux de champs électromagnétiques en "façade intérieure" (première paroi), à partir du niveau de champ incident en façade extérieure.

1.2.5.7 Limite de l'optique géométrique

La principale limite de l'optique géométrique est de prévoir un champ nul dans les zones d'ombre géométrique où ne pénètre aucun rayon, ce qui contredit l'expérience. En effet, l'optique géométrique ne peut pas rendre compte des phénomènes d'interférences observables par exemple dans l'expérience des fentes de Young. C'est pour pallier ce défaut qu'a été développée la théorie géométrique de la diffraction à laquelle est consacrée la partie suivante.

1.2.6 Théorie Géométrique de la Diffraction

La théorie géométrique de la diffraction (TGD) a été introduite par Keller dans les années 1950. Cette théorie se place dans la continuité de l'optique géométrique en introduisant deux nouveaux types de rayons (figure ??) : les rayons diffractés et les rayons rampants qui s'ajoutent aux rayons incidents, réfléchis et transmis (réfractés) de l'optique géométrique classique. La particularité de ces nouveaux rayons est de pénétrer dans les zones d'ombre de l'optique géométrique classique.

- les rayons rampants : ils apparaissent à la surface des objets et sont très rapidement fortement atténués.
- les rayons diffractés : ils apparaissent lorsqu'un rayon incident rencontre un coin ou encore l'arête d'un objet. Leur comportement est caractérisé par des lois analogues à celles qui régissent le comportement des rayons réfléchis ou réfractés de l'optique géométrique.

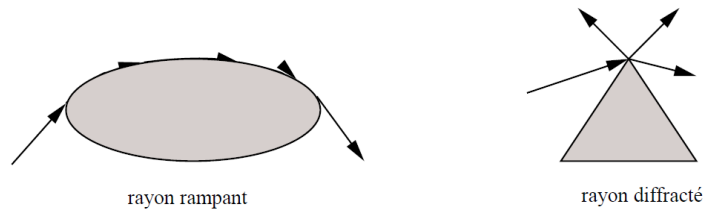


FIGURE 1.4 – Les nouveaux rayons de la TGD : à gauche, des rayons rampants à la surface d'un objet, à droite, des rayons diffractés par une pointe.

La TGD s'appuie notamment sur un principe de Fermat généralisé selon lequel la trajectoire du rayon diffracté est celle dont la longueur est stationnaire parmi un ensemble de trajectoires élargi aux trajectoires

vérifiant des contraintes liées à la diffraction. La TGD se base également sur le principe énoncé par Huygens en 1678 [?] et complété par Fresnel en 1818. Par analogie à la réflexion, la TGD introduit un coefficient de diffraction qui tient compte des propriétés de polarisation de l'onde et un facteur de divergence géométrique qui traduit la conservation de l'énergie lors de la propagation de l'onde. Comme pour le coefficient de réflexion, le coefficient de diffraction se diagonalise dans les bases liées aux plans d'incidence et de diffraction. Le calcul détaillé de ces deux coefficients est présenté dans [?].

La théorie géométrique de la diffraction présente des discontinuités au passage des frontières d'ombre. Pour résoudre ces problèmes mathématiques de divergence du coefficient de diffraction mais qui n'ont pas de réalité physique, la théorie géométrique de la diffraction a évolué vers la théorie uniforme de la diffraction (TUD). Kouyoumjian et Pathak ont exprimé le facteur de divergence dans [?]. La partie suivante présente le concept de la TUD pour une meilleure prise en compte de la diffraction.

1.2.7 Théorie Uniforme de la Diffraction

La TGD a permis, grâce à l'introduction du concept de rayon diffracté, de rendre compte de la pénétration dans les zones d'ombre de l'optique géométrique. Cependant, les discontinuités que présente le champ au voisinage des frontières ombre-lumière limitent la portée de la TGD. Dans les années 1970, Kouyoumjian et Pathak [?] ont orienté leurs recherches sur le problème de ces discontinuités. Ils ont élargi le domaine de validité de la TGD en mettant au point la théorie uniforme de la diffraction (TUD). Cette théorie définit un nouveau coefficient de diffraction qui permet de lever les discontinuités du champ de la TGD dans les zones frontières. C'est l'introduction d'une fonction dite "de transition" qui va permettre d'éliminer les divergences du coefficient de diffraction de la TGD. La principale limite de la théorie uniforme de la diffraction est qu'elle ne s'applique qu'à des arêtes de diffraction de longueur infinie. Cependant le cas d'une arête de longueur finie peut être traité en ajoutant un facteur correcteur [?]. Les discontinuités au passage des caustiques constituent une difficulté qui a fait l'objet de traitements particuliers [?]. Il existe aussi d'autres modèles pour ondes rampantes et diffractions multiples [?].

1.2.8 Synthèse

L'évolution des méthodes asymptotiques de l'optique géométrique à la théorie uniforme de la diffraction a permis d'apporter des réponses spécifiques sur la manière dont l'onde électromagnétique interagit avec son milieu. Aujourd'hui, de nombreux codes de prédiction électromagnétique en champ lointain reposent sur ces méthodes. La méthode de prédiction de l'exposition aux ondes électromagnétiques développée par le CSTB est basée sur ces méthodes. La collaboration entre le CSTB et GEOMOD (distributeur de logiciel en géomatique) a permis la mise en oeuvre d'un logiciel commercial appelé MITHRA-SUITE qui est composé de MITHRA-SIG dédié à la cartographie acoustique et de MITHRA-REM pour la cartographie électromagnétique à l'échelle d'une ville avec l'apport de l'expertise du CSTB dans le domaine de la propagation des ondes et de GEOMOD en géomatique. MITHRA-REM est notamment utilisé par l'Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (IBGE) pour la délivrance des permis d'environnement pour les opérateurs qui souhaitent placer sur le territoire de la Région de Bruxelles-Capitale une antenne émettant des ondes électromagnétiques dont la fréquence est comprise entre 0,1 MHz et 300 GHz. La mise en oeuvre de la méthode de calcul pour la prédiction de l'exposition est présentée dans la section suivante.

1.3 La méthode de modélisation utilisée

La méthode de calcul du rayonnement électromagnétique de MITHRA-REM peut être représentée comme un système d'entrée et de sortie illustré dans la figure ?? . Dans cette section nous présenterons l'ensemble des composants du système.

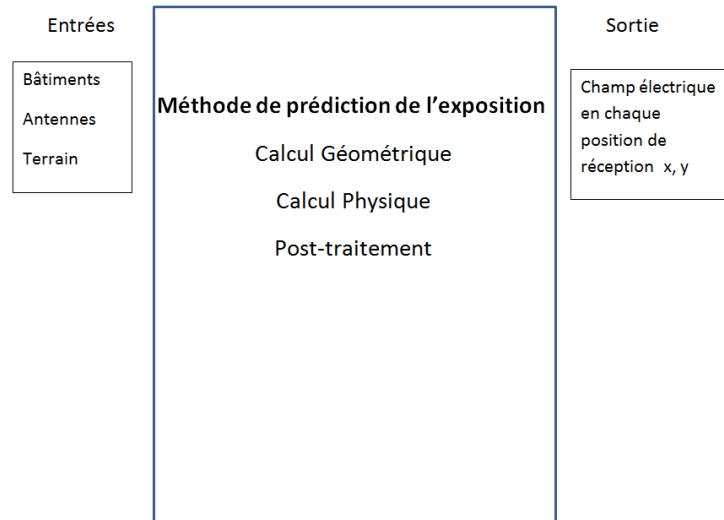


FIGURE 1.5 – Méthode de calcul

1.3.1 Données d'entrée

1.3.1.1 Terrain et bâti

Les bâtiments sont définis par leurs contours au sol, leurs hauteurs, et leurs éventuelles pentes de toitures. Le terrain est défini par un modèle numérique de terrain défini sous la forme $z = f(x, y)$.

1.3.1.2 Antennes

Les antennes peuvent être modélisées d'une part avec un diagramme de rayonnement en champ lointain (en 3D, ou défini par une coupe horizontale et une coupe verticale). Elles peuvent être modélisées d'autre part par un ensemble de dipôles (avec une position relative par rapport à la position de référence de l'émetteur), chaque dipôle ayant un diagramme de rayonnement propre, donnant le champ en 3D rayonné selon les composantes TM et TE. Les deux modèles sont équivalents en champ lointain (zone de Fraunhofer), mais le second permet une meilleure représentation du champ électrique en zone de champ proche (zone de Fresnel au-delà de la zone de Rayleigh).

1.3.2 Méthode de calcul

Le noyau de calcul du champ de MITHRA-REM se décompose en trois parties : une partie géométrique de construction des trajets entre les sources et les récepteurs ; une partie physique de calcul des champs électromagnétiques au niveau des récepteurs ; et une phase de post-traitement des données. Totalement indépendantes, les deux premières étapes sont conduites de manière simultanée dans MITHRA-REM : chaque trajet trouvé par le calcul géométrique est « consommé » par le calcul physique, et le résultat final est le champ électrique aux points de réception, les trajets n'étant pas conservés. Une fois le champ électrique calculé, des post-traitements sont appliqués pour effectuer des moyennages spatiaux ou des analyses statistiques (calcul de corrélation, d'écart-type, entre mesures et calculs). Toutefois, il est possible, pour des points isolés, de visualiser les trajets associés à des fins de vérification. Les méthodes asymptotiques sont valables dans la limite où les détails de la géométrie considérée sont plus grossiers que plusieurs longueurs d'ondes (cf. section ??). Dans le domaine qui nous intéresse (téléphonie mobile, wifi, . . .), les longueurs d'ondes sont inférieures à 30 cm, donc les détails géométriques considérés doivent être en delà du mètre. Cette contrainte est respectée dans le cadre de modèles issus de SIG (Système d'Information Géographique).

1.3.2.1 Modèle de calcul : Approche 2,5D

Vu l'échelle des données géométriques à traiter (le quartier), il n'est pas envisageable d'utiliser pour la prédiction de la propagation des ondes électromagnétiques, un calcul direct de rayons en 3D, prenant en compte des distances de propagation suffisantes, tous les bâtiments du quartier, et avec des ordres de réflexions / diffractions suffisants pour correctement estimer les niveaux de champs électromagnétiques. De plus, les données géométriques issues des SIG sont majoritairement issues de représentations 2,5D, c'est-à-dire un modèle numérique de terrain défini sous la forme $z = f(x, y)$, et des bâtiments définis par leurs contours au sol et leurs hauteurs. C'est pourquoi le moteur de calcul géométrique est basé sur une représentation 2,5D. En effet, cette approche permet d'obtenir des temps de calculs très raisonnables, avec un nombre important de bâtiments et d'interactions réellement pris en compte. Cette approche 2,5D est celle classiquement utilisée en cartographie acoustique par exemple. Il est important de noter que bien que la représentation soit 2,5D, le calcul de champs se déroule effectivement en 3D, et qu'il s'agit simplement d'une limitation des types de géométries pouvant être représentées dans le modèle.

1.3.2.2 Calcul géométrique

L'objectif du calcul géométrique est de déterminer l'ensemble des trajets entre des émetteurs (ponctuels) et des récepteurs (ponctuels) prédéterminés, en incluant les réflexions et les diffractions par les obstacles présents dans le modèle. Il s'effectue en deux étapes.

- **Calcul géométrique en 2D** : l'algorithme utilisé pour déterminer les trajets est le lancer de faisceaux qui est une variante du lancer de rayons. Il consiste à partitionner l'espace autour de l'émetteur. Ici, en 2D, les faisceaux lancés sont des secteurs angulaires. Les faisceaux sont à la fois transmis géométriquement en ligne droite et réfléchis (de manière spéculaire) par les arêtes rencontrées (si celles-ci correspondent à des façades de bâtiments). Lorsqu'un faisceau rencontre un point de diffraction vertical, une source de second ordre est créée, et le processus est répété depuis ce nouvel émetteur comme illustré sur la figure ?? . Ce partitionnement des faisceaux est effectué jusqu'à atteindre une distance maximale

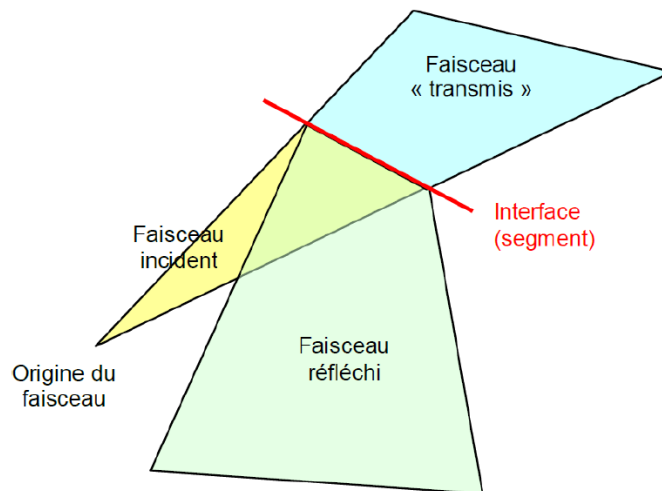


FIGURE 1.6 – Faisceau rencontrant une arête

de propagation depuis l'émetteur original ou un ordre de réflexion ou de diffraction maximal imposé. Une fois les faisceaux construits, les récepteurs sont localisés à l'intérieur de ceux-ci, et les trajets exacts en 2D sont construits, par la méthode des sources images. La figure ?? illustre le concept de calcul des trajets en 2D entre un émetteur et un récepteur séparé par un bâtiment.

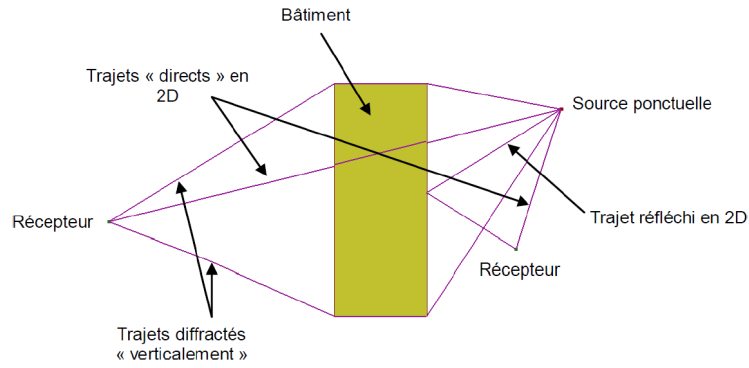


FIGURE 1.7 – Calcul des trajets en 2D

- **Calcul géométrique en 3D** : pour chaque trajet en 2D trouvé, nous devons construire les trajets en 3D correspondants. Ainsi, pour un trajet 2D, on trouve, par la méthode de l'enveloppe convexe (élastique entre l'émetteur et le récepteur) le trajet principal en 3D (figure ??), en fonction des hauteurs de l'émetteur et du récepteur. On trouve en même temps la hauteur du trajet sur les obstacles (pour les réflexions, les diffractions par les arêtes verticales), ce qui fait que le trajet peut ne pas exister en 3D (réflexion hors obstacle par exemple).

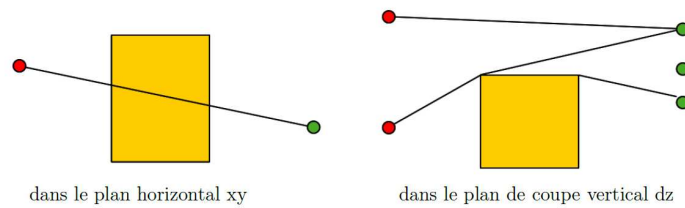


FIGURE 1.8 – D'un trajet 2D à un trajet 3D

La réflexion sur le sol est aussi rajoutée aux contributions. Cette réflexion est déterminée sur la vue en coupe du trajet, "déroulé" selon sa direction de propagation. On rajoute aussi éventuellement les trajets diffractés en zone éclairée, ces trajets assurant une meilleure continuité du champ dans les zones de transition. La figure ?? illustre le principe de construction des trajet 3D en prenant en compte la réflexion au sol et les trajets diffractés en zone éclairée.

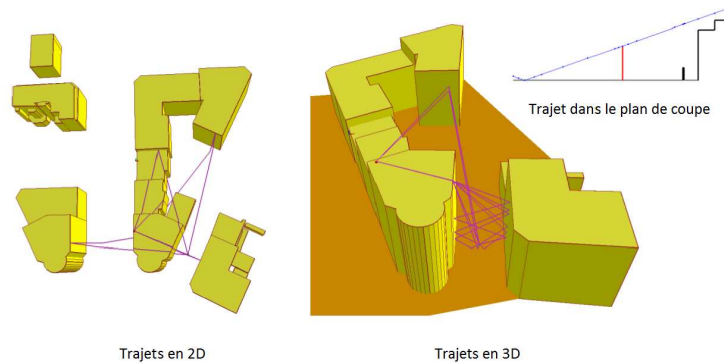


FIGURE 1.9 – Trajets 2D et trajets 3D correspondant

En ce qui concerne la diffraction par les arêtes horizontales, on doit aussi résoudre exactement la position du point de diffraction au sens de la TGD. Cela amène à décaler légèrement ce point sur l'arête de diffraction de façon à respecter le critère d'égalité entre les angles incidents et diffractés en 3D comme illustré sur la figure ??.

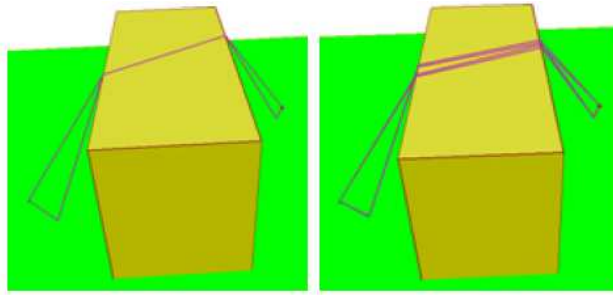


FIGURE 1.10 – Calcul exact de la TGD (à gauche sans TGD, à droite avec TGD)

- **Paramètres géométriques** : dans la figure ??, nous avons le schéma de l'étape géométrique avec les différents paramètres intervenant dans cette étape.

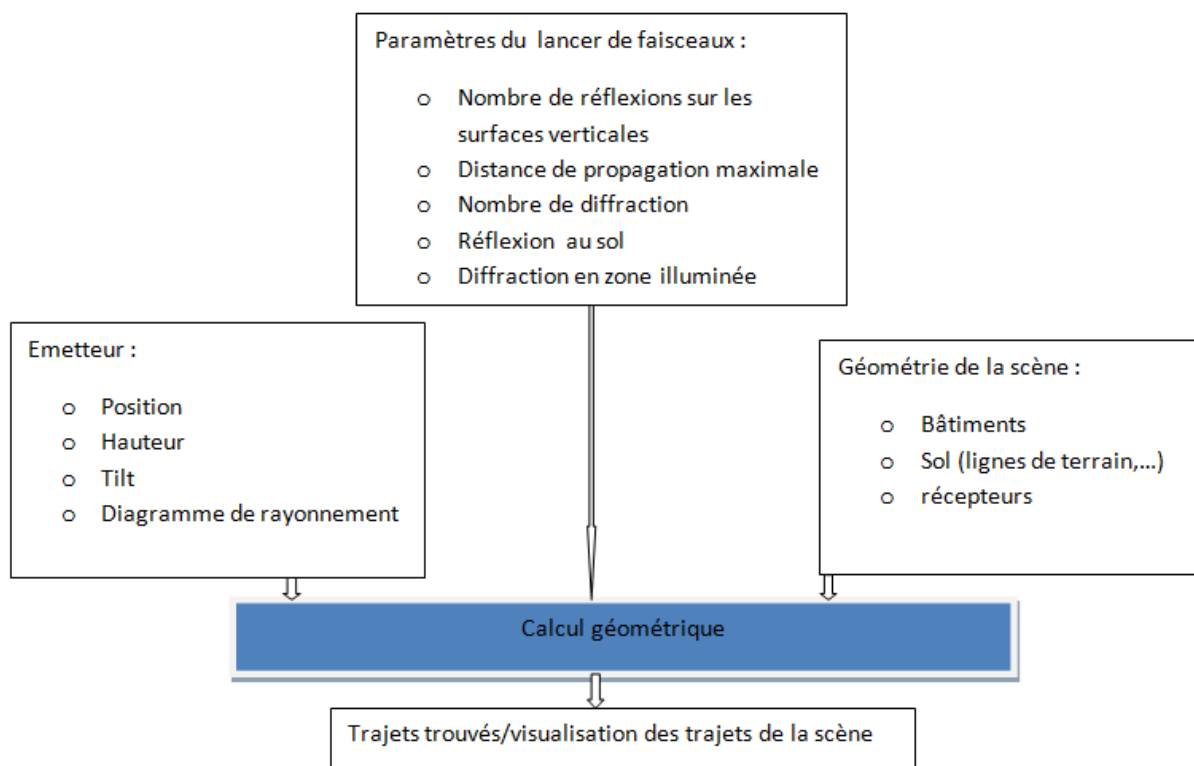


FIGURE 1.11 – Etape géométrique

1.3.2.3 Calcul physique et post-traitement

Pour chaque trajet en 3D déterminé, on calcule la fonction de transfert de l'émetteur vers le récepteur. Cette fonction de transfert intègre la directivité de l'émetteur, les coefficients de réflexion et de diffraction (tenant compte des matériaux rencontrés dans le trajet), et l'atténuation géométrique liée à la longueur du trajet. Une illustration des phénomènes d'atténuation pris en compte dans le calcul physique est présentée sur la figure ??. Cette fonction de transfert travaille sur un champ électrique vectoriel complexe en trois dimensions, dépendant de la fréquence (et de la phase), et tient donc compte des phénomènes de polarisation (transverse magnétique et transverse électrique). La diffraction est calculée à l'aide de la théorie uniforme de la diffraction, et notamment de formulations adaptées aux diffractions successives et aux ondes rampantes. Comme pour la réflexion, le plan d'incidence (défini par le rayon incident sur l'arête de diffraction et la tangente à cette arête au point de diffraction) permet de décomposer le champ électrique selon ses deux polarisations. Pour la transmission, un coefficient d'atténuation peut être défini pour un matériau donné. Il est exprimé en dB et peut être dépendant de la fréquence. Il est utilisé pour le calcul des niveaux de champs électromagnétiques en "façade intérieure", à

partir du niveau de champs calculés en façade extérieure.

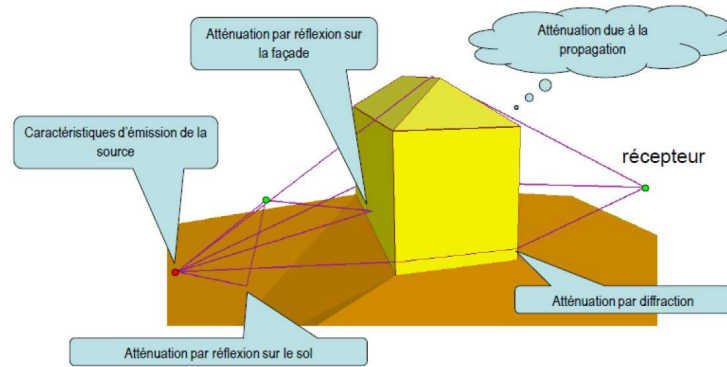


FIGURE 1.12 – Atténuations prises en compte lors du calcul du champ électrique entre l'émetteur et le récepteur

Ces fonctions de transfert (pour chaque trajet), sont sommées de manière cohérente pour obtenir la fonction de transfert complète d'un point émetteur à un point récepteur.

Paramètres de calcul physique et de rendu : dans la figure ??, nous avons le schéma de l'étape physique et du post-traitement avec les différents paramètres intervenant dans cette étape.

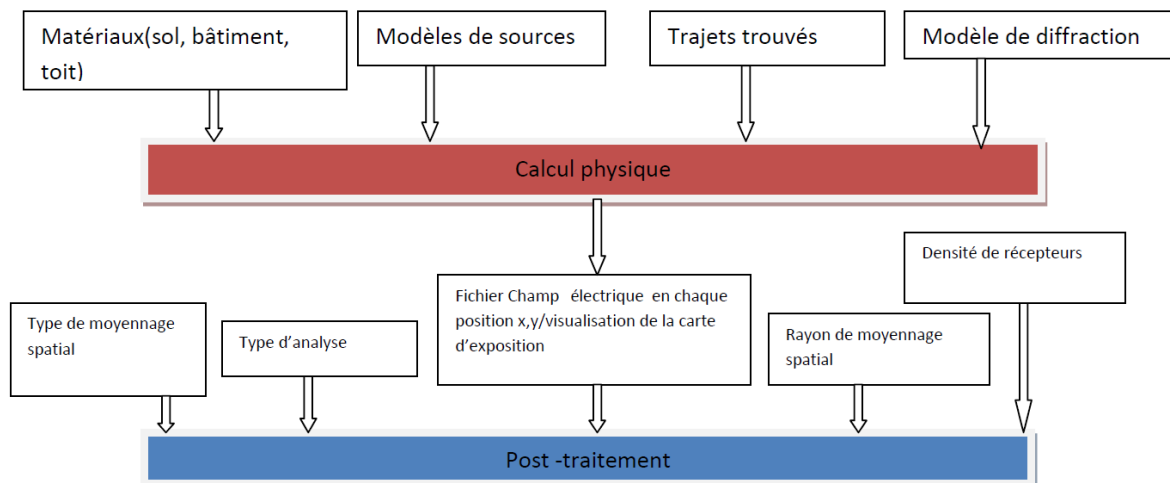


FIGURE 1.13 – Etape physique

1.4 Le concept de zones d'exposition : Z_{direct} , $Z_{\text{réflexions}}$, $Z_{\text{diffractions}}$

Nous pouvons distinguer la zone d'exposition par rapport à la zone de propagation de la sorte : la première s'intéresse au rayonnement autour de la source et la seconde au rayonnement autour du récepteur. Cette zone d'exposition est caractérisée par la notion de visibilité entre l'émetteur et le récepteur. Et comme évoqué dans la précédente section, la méthode utilisée présente l'avantage de pouvoir analyser la contribution des trajets. L'identification des trajets directs, réfléchis et diffractés permet de pouvoir définir des zones de visibilité. Ces zones de visibilité sont définies sur un critère purement géométrique. La méthode de calcul de l'exposition aux ondes est basée sur des calculs géométriques reposant sur le lancer de faisceaux pour calculer les trajets entre l'émetteur et le récepteur. Selon la position de l'émetteur par rapport au récepteur, nous pouvons distinguer 3 zones de visibilité que nous appellerons Z_{direct} pour zone de visibilité directe, $Z_{\text{réflexions}}$ pour zone de réflexions et $Z_{\text{diffractions}}$ pour zone de diffractions (voir figure ??). Ces zones de visibilité sont définies comme suit :

- Z_{direct} : zone où se trouve la plupart de la puissance émise (lobe principal de l'antenne). La puissance reçue dans cette zone provient des trajets directs. Le champ électrique dans cette zone dépend essentiellement des caractéristiques de l'émetteur. Dans cette zone des trajets réfléchis et diffractés peuvent être trouvés mais la contribution principale provient d'un trajet direct.
- $Z_{\text{réflexions}}$: zone où la plupart de la puissance reçue provient des trajets réfléchis. Le champ électrique dans cette zone dépend de la forme et des propriétés électromagnétiques des bâtiments situés à proximité de l'émetteur. Il n'existe pas de trajets directs dans cette zone.
- $Z_{\text{diffractions}}$: zone où la puissance reçue provient des trajets diffractés. Le champ dans cette zone dépend essentiellement du modèle de diffraction et de la coupe verticale des bâtiments. Le point de réception est en $Z_{\text{diffractions}}$ s'il n'est ni en $Z_{\text{réflexions}}$ ni en Z_{direct}

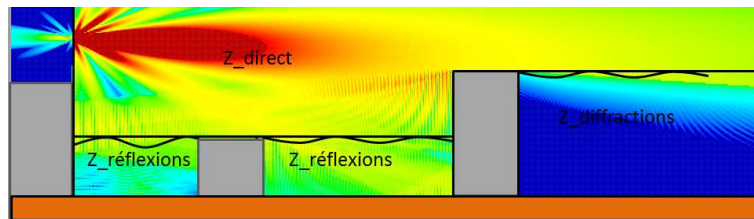


FIGURE 1.14 – Zone de visibilité

1.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de comprendre l'importance des méthodes asymptotiques aux sujets de la caractérisation et de la modélisation de l'exposition. Il est nécessaire alors dans le contexte général de caractérisation de l'exposition de les étudier (incertitudes, erreurs, variabilité,...) par rapport aux mesures pour mieux les exploiter. Le chapitre suivant aborde la mesure de l'exposition aux OEMs.

Chapitre 2

MESURE ET CRITÈRE DE COMPARAISON AVEC LA SIMULATION

2.1 Introduction

Après avoir défini une méthode de prédiction permettant de simuler l'exposition à grande échelle, nous abordons dans ce chapitre la partie mesure.

2.2 Généralités

La première chose pour évaluer un modèle de prédiction est d'avoir des mesures fiables. La qualité de la prédiction dépend de la précision des données de mesure. De plus comme évoqué dans l'introduction générale, les études sur l'exposition ont montré que pour une meilleure connaissance de l'exposition à grande échelle, il est nécessaire d'utiliser conjointement les mesures et les simulations pour deux principales raisons :

- les mesures coûtent chères, et sont impossibles à effectuer à grande échelle mais elles sont plus précises localement ;
- les simulations sont à faible coût et peuvent se faire partout dans l'espace (par exemple sur les façades des bâtiments).

La vérification du respect des normes définies par l'ICNIRP par des mesures nécessite également d'avoir des mesures assez précises pour éviter de tirer des conclusions fausses sur la situation d'exposition. Cependant la difficulté réside dans le fait qu'il existe plusieurs méthodes de mesure, et que l'on a autant de paramètres sur une méthode de mesure que sur une méthode de calcul. Plusieurs paramètres peuvent être pris en compte dans une méthode de mesure, nous pouvons en citer quelques uns :

- grandeur mesurée : E, H, B, J, DAS, S ;
- type de valeur mesurée : max, min, crête, rms, ... ;
- gamme de mesure de l'appareil ;
- gamme de fréquence de l'appareil ;
- sensibilité de l'appareil ;
- précision de l'appareil ;
- type de mesure : large bande (niveau global d'exposition pour une bande de fréquences donnée) ou bande étroite (mesure par fréquence de l'exposition) ;
- type d'antenne : logarithmique périodique, sonde isotrope, ... ;
- type d'appareil de mesure : détecteur (signale le dépassement d'un ou plusieurs seuils de niveaux), appareil de mesure hautes fréquences, appareil de mesure basses fréquences ;
- balayage temporel ;

- balayage fréquentiel;
- balayage spatial.

La prise en compte de tous ces paramètres fait que l'on peut avoir pour un même point de mesure plusieurs résultats différents et, comparer leurs pertinences reste un travail difficile car tout dépend des paramètres et de la méthode de mesure utilisée, autrement dit tout est question de protocole.

En France, un protocole réglementaire écrit par l'Agence Nationale des Fréquences (ANFR), concernant l'application du décret n°2002-775 du 3 mai 2002 conformément aux exigences de la norme NF EN 504921 [?] a été mis en place pour vérifier le respect des normes définies par l'ICNIRP. Une description du protocole est effectuée dans la section suivante.

2.3 Protocole réglementaire

Paru en 2001, le protocole ANFR est un protocole réglementaire visant à vérifier sur site pour les stations fixes, le respect des limitations, en termes de référence, de l'exposition du public aux champs électromagnétiques. Le processus adopté se compose d'une analyse du site suivie de relevés de niveaux de champs électromagnétiques et du calcul des incertitudes associées. Les niveaux relevés et, le cas échéant pour certaines catégories de réseaux, extrapolés, sont ensuite comparés aux niveaux de référence. Le processus est décrit sur la figure ??.

La mesure en large bande (cas A) est une mesure sur toute la bande radioélectrique et la mesure en bande étroite (cas B), une mesure détaillée en fréquence.

- Si cas A < 6 V/m : respect des niveaux de référence ;
- Si cas A > 6 V/m : poursuivre avec le cas B avec extrapolation à puissance maximale des émetteurs le cas échéant.

2.3.1 Évaluation des cas

2.3.1.1 Cas A

Grandeur mesurée et moyennage temporel La valeur efficace est moyennée sur :

- six minutes pour des fréquences comprises entre 100 kHz et 10 GHz ;
- $\frac{68}{f^{1,05}}$ minutes pour des fréquences supérieures à 10 GHz (avec f exprimée en GHz).

Dans la pratique une durée inférieure est en générale suffisante, dès lors que la valeur efficace moyennée est stable.

Moyennage spatial La moyenne spatiale s'effectuera sur un minimum de trois hauteurs (110 cm, 150 cm, 170 cm) en utilisant la formule suivante :

$$(E \text{ ou } H)_{\text{moyenne spatiale}} = \sqrt{\sum_i^n \frac{E_i \text{ ou } H_i^2}{n}} \quad (2.1)$$

Avec E_i ou H_i , l'intensité de la grandeur électromagnétique mesurée en un point et n le nombre de points considéré (trois au minimum).

2.3.1.2 Cas B

Moyennage fréquentiel La fréquence centrale doit être réglée sur le canal d'émission avec une résolution adaptée à la largeur du canal ou une résolution inférieure en effectuant un calcul cumulatif prenant en compte la forme du filtre de résolution (mode « Channel Power »).

Grandeur mesurée et moyennage temporel Il faut choisir un détecteur RMS (Root Mean Square). Les niveaux de chaque émission significative (les émissions significatives sont, a minima, celles dont le niveau est supérieur à 40 dB au-dessous du niveau de référence le plus faible, arrondi à 0,3 V/m) est à reporter. Si aucune émission présente ne dépasse ce niveau, seront reportées au moins les deux émissions les plus fortes mais elles ne feront pas l'objet d'extrapolation. La valeur efficace moyennée sur :

- six minutes pour des fréquences comprises entre 100 kHz et 10 GHz ;
- $\frac{68}{f^{1,05}}$ minutes pour des fréquences supérieures à 10 GHz (f exprimée en GHz).

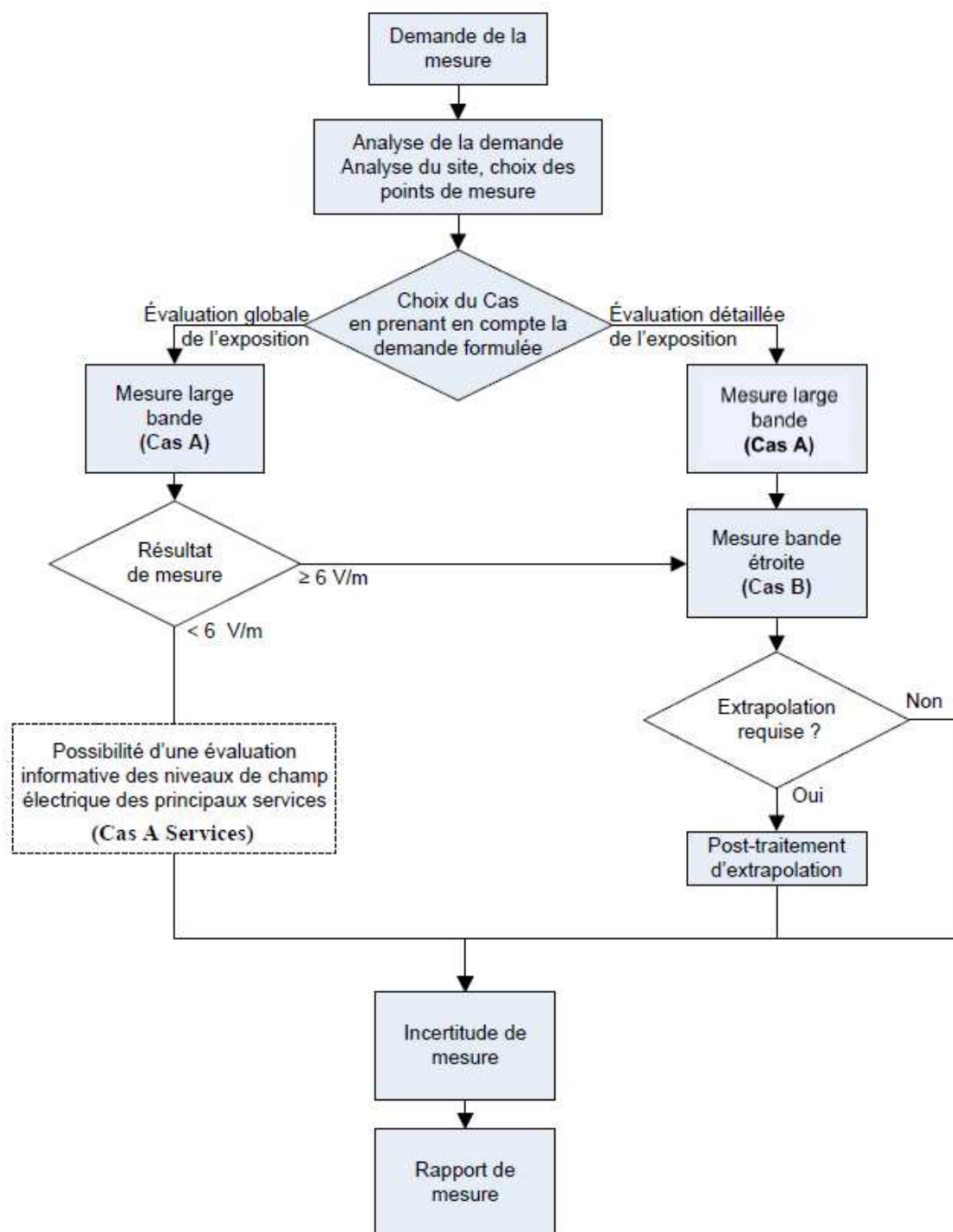


FIGURE 2.1 – Processus d'élaboration du protocole de mesure ANFR (Version 3.1 – 9 juillet 2015)

Dans la pratique une durée inférieure est en générale suffisante, dès lors que la valeur efficace moyennée est stable. Le niveau reçu sera converti en intensité de champ électrique par la formule :

$$E_{dBV/m} = F_{dBm^{-1}} + V_{dBV} + PC_{dB} \quad (2.2)$$

avec F facteur d'antenne, V tension efficace, PC valeur absolue des pertes câble à la fréquence maximale de l'émission.

Extrapolation L'extrapolation consiste à évaluer l'amplitude du champ électromagnétique à puissance maximale d'un réseau radioélectrique. L'extrapolation n'est requise que si le résultat de la mesure large bande est supérieur à 6 V/m ou dans le cas d'une demande particulière. Le principe est de mesurer des signaux de signalisation qui sont émis à puissance constante et qui permettent une évaluation de la puissance maximale par calcul à l'aide de caractéristiques définies.

Selon la technologie, la mesure s'effectue comme suit :

- **Pour la 2G (GSM)**, la mesure instantanée des voies balises (BCCH) est utilisée ;
- **Pour la 3G (UMTS)**, la mesure instantanée du canal du pilotage commun (CPICH) est utilisée ;
- **Pour la 4G (LTE)**, le signal de référence (RS) et le signal de synchronisation (S-SYNC) sont utilisés ou le canal PBCH selon la méthode retenue.

2.3.2 Synthèse

Destinées à vérifier les valeurs limites d'exposition, les mesures selon ce protocole se font en considérant les situations d'exposition maximales. Sa mise en place a facilité la mise en application de la norme ICNIRP pour vérifier le respect des limites établies. D'un point de vue réglementaire, il s'agit d'un moyen permettant, de faciliter le débat public sur l'exposition et de réduire les inquiétudes de la population. Un nouveau dispositif est mis en place depuis le 1er janvier 2014 permettant à toute personne de faire mesurer l'exposition aux ondes électromagnétiques aussi bien dans les locaux d'habitation que dans des lieux accessibles au public (parcs, commerces...) gratuitement. Le nouveau décret de la "loi Abeille" (promulguée le 9 février 2015) comporte aussi un volet concernant l'information locale, qui prévoit que toute personne souhaitant exploiter une ou plusieurs installations radioélectriques sur une commune, ou modifier une installation existante, en informe le maire ou le président de l'intercommunalité par un dossier d'information. Ces informations sont alors mises à la disposition des habitants qui peuvent formuler des observations. D'un point de vue réglementaire, ce protocole a permis d'affranchir des pas sur le débat public. Par ailleurs, il n'apporte pas totalement de réponse sur la caractérisation de l'exposition réelle. Pour les bandes de fréquences qui nous intéressent, la durée de moyennage (6 minutes) utilisée dans le protocole repose sur la constante de temps thermique approximative des organes importants tels que les yeux et les testicules, et n'a pas d'autre justification que ce côté lié aux risques thermiques. Il ne tient donc pas en considération la technologie radio mesurée (GSM, UMTS, LTE), ni la position de mesure par rapport à l'antenne d'émission (notion de visibilité). Une étude de cette durée de moyennage en fonction de l'exposition réelle peut aider à mieux caractériser l'exposition. Ainsi pour caractériser l'exposition réelle, il est nécessaire de s'intéresser à d'autres types de mesure. La section suivante est consacrée à l'ensemble des mesures utilisées dans le cadre de cette thèse.

2.4 Mesures exploitées

Il est important pour renforcer la légitimité de la méthode de calcul, ainsi que pour les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse, de pouvoir comparer les résultats de simulation à des mesures. Il s'agit ici de mesures issues d'autres projets et qui ont servi dans cette étude et de mesures réalisées dans le cadre de la thèse.

2.4.1 Mesures pré-existantes

Elles sont composées de mesures elles-mêmes et des données nécessaires à la simulation.

- Les mesures : ce sont des mesures de champs électromagnétiques issues de projets différents et qui seront utilisées pour effectuer des comparaisons avec les calculs effectués via MITHRA-REM.
- Données de la scène : pour chaque jeu de données disponible, nous avons besoin des données de la zone et des coordonnées des points où les mesures ont été réalisées pour modéliser la scène en fichier DXF (Drawing eXchange Format) qu'utilise MITHRA-REM pour calculer le champ électrique.

Nous disposons des données provenant du projet COST231 et de l'université de Poitiers :

2.4.1.1 COST231 : mesure de type parcours

Ce sont des mesures qui ont été effectuées dans le cadre du COST231 (Coopération européenne dans le domaine de la recherche Scientifique et Technique)[?] dans la ville de Munich. Intitulé « DIGITAL MOBILE RADIO TOWARDS FUTURE GENERATIONS SYSTEMS », ce projet, terminé en 1999, traite différents aspects de la téléphonie mobile et notamment des modèles de prédiction de la propagation. Dans ce projet, nous disposons aussi de la modélisation de la ville de Munich (altitude et hauteur des bâtiments) réalisées par Mannesmann Mobilfunk GmbH. Ces mesures, la modélisation de la ville, ainsi que le rapport complet sont disponibles publiquement. L'émetteur, est omnidirectionnel, émet à 947MHz et est situé au milieu de la place centrale (point vert sur la figure ??). Des mesures sur trois parcours ont été réalisées. Ces mesures ont été moyennées le long de ces parcours, sur à peu près dix mètres et les points fournis représentent le centre de la zone où le moyennage a été effectué.



FIGURE 2.2 – Vues de dessus de la modélisation de la ville de Munich, du parcours de mesure (exemple du parcours 0) et de l'émetteur

2.4.1.2 Poitiers 1 : mesure de type parcours

Les données qui sont utilisées ici sont issues de travaux de thèse sur le thème de la propagation des ondes électromagnétiques effectués à l'université de Poitiers [?]. Les mesures ont été prises le long du parcours (point rouge sur la figure ??), avec un émetteur (point vert de la figure ??) qui émet à 2,273 GHz. Le sol est modélisé par un plan horizontal.

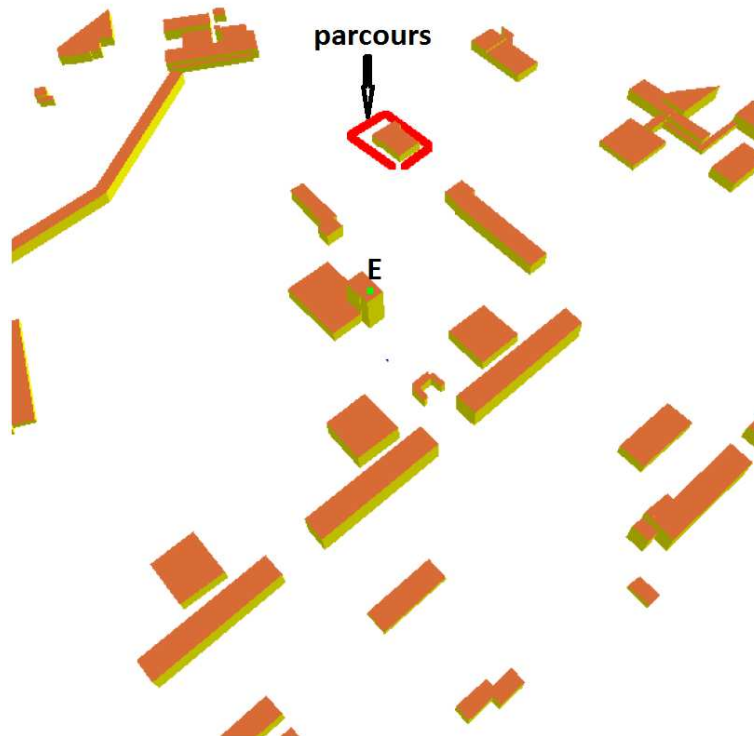


FIGURE 2.3 – Vues de dessus de la modélisation de la zone de Poitiers, du parcours et de l'émetteur

Ces données sont relativement anciennes, souvent imprécises, et notoirement incomplètes car très orientées couverture (réalisées sur des parcours, essentiellement en zone masquée, Poitiers et COST231). De ce fait d'autres mesures ont été réalisées dans le cadre de cette thèse. De plus, ces mesures ont été réalisées avec un dipôle à la différence des mesures réalisées dans le cadre de cette thèse où une antenne triaxe a été utilisée. La partie qui suit donne le détail de ces mesures.

2.4.2 Campagnes réalisées

2.4.2.1 Appareil de mesure du champ électromagnétique

L'outil utilisé pour mesurer le champ électromagnétique est le Narda SRM 3006. Le Narda permet de vérifier le respect des valeurs limites et détecte les valeurs au-dessous des normes nationales et internationales. Cet analyseur de spectre offre la possibilité de mesurer le champ électromagnétique sélectivement, par technologies (UMTS, GSM, LTE, ...) et par fréquences, pour identifier les sources d'exposition. Il génère également le champ total de tous les émetteurs se trouvant sur le lieu de mesure. Il permet ainsi d'effectuer deux types de mesure :

- mesure large bande (mode "safety") : enregistrement d'une valeur par voie descendante pour chaque bande de fréquences allouée aux opérateurs ;
- mesure bande étroite (mode "spectrum") : enregistrement du spectre détaillé autour d'une fréquence centrale donnée.

Ces deux modes sont utilisés pour effectuer les différentes mesures présentées dans cette partie.

Nous rappelons que le spectre radioélectrique fait partie en France du domaine public de l'état. Pour les systèmes de télécommunication de type téléphonie mobile, chaque technologie mobile (GSM, UMTS, LTE) opère sur une bande de fréquence donnée (bandes 900MHz et 1800MHz pour la technologie GSM, bande 2100MHz pour la technologie UMTS et les bandes 2600MHz, 800MHz et 700MHz pour le LTE). Ces bandes de fréquences sont réparties parmi quatre opérateurs : Orange, SFR, Bouygues et Free. Ces bandes sont définies pour la téléphonie mobile du public, d'autres peuvent être utilisées pour les communications professionnelles, militaires ou pour la recherche académique. Pour donner une idée sur la répartition de ces bandes de fréquences entre les

différents opérateurs, nous avons sur la figure ??, les allocations de spectre (800 – 900 – 1800 – 2100 – 2600 MHz) publié par l'ARCEP (Autorité de régulation des communications électroniques et des postes) en 2014.

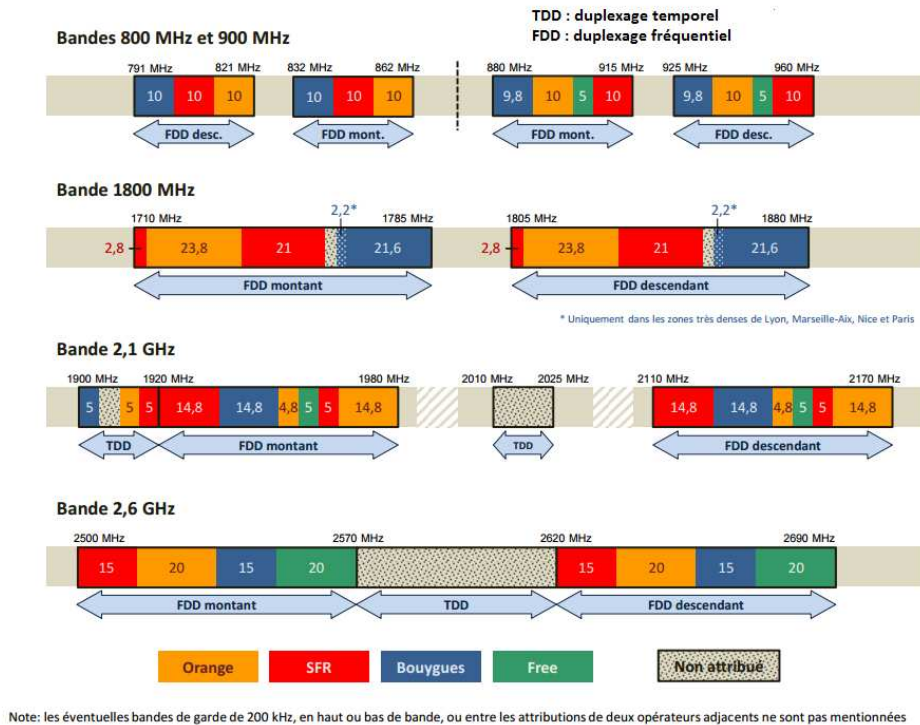


FIGURE 2.4 – Allocations de spectre en France aux différents opérateurs (2014)

2.4.2.2 Poitiers 2 : mesure de type parcours

Objectif L'objectif de ce travail était donc de réaliser une campagne de mesure représentative des situations réelles d'exposition en environnement urbain : au sol, en vue directe des antennes. Cela nous permettra aussi d'augmenter notre base de données avec des mesures précises sur un environnement complètement maîtrisé (bâtiments et antenne). Elles pourront aussi être utilisées dans d'autres projets à venir.

Mise en oeuvre de la campagne La campagne de mesure a été réalisée dans la ville de Poitiers et sur deux sites différents à savoir celui de l'IUT situé dans le campus de Poitiers Centre et celui situé dans le domaine universitaire du Futuroscope. Le choix des parcours a été effectué au préalable en simulation afin d'avoir des parcours représentatifs des situations réelles d'exposition en environnement urbain. La campagne consistait à émettre un signal amplifié contrôlé et à récupérer le champ électromagnétique reçu sur des parcours définis au préalable. Nous avons au total 6 parcours de mesure : 4 sur le site de l'IUT (P1, P2, P3, P4) et 2 au Futuroscope (P5, P6). L'émetteur utilisé est un émetteur de type fouet de l'université de Poitiers. Il s'agit d'une antenne omnidirectionnelle dans le plan horizontal (dipole) avec une autorisation d'émission à 2,3GHz et une puissance de 2W, obtenue après une demande par le laboratoire XLIM au niveau de l'ARCEP (Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes). Cette fréquence de 2,3 GHz présente l'intérêt de ne pas être utilisée par d'autres émetteurs (à la différence de la bande libre de 2,4 GHz, où l'on peut trouver Wifi, Bluetooth ou recherche, ...). Les mesures réalisées n'ont donc pas été parasitées.

L'antenne (voir figure ??) est alimentée par un générateur de signal dont la sortie est amplifiée de manière à obtenir une onde entretenue avec une bande très étroite de 5 kHz à la fréquence demandée de 2,3 GHz . Les mesures sont effectuées avec l'analyseur de spectre SRM 3006 de Narda. Un appareil photo muni d'un objectif "fish-eye" (objectif grand angle de 180°, fixé à l'avant du chariot) a été synchronisé avec ce système pour permettre de récupérer à chaque instant de mesure le lieu mesuré en image permettant d'avoir une vue de l'environnement devant, à gauche et à droite du chariot (après post-traitement). Ces photos seront aussi utiles lors de l'analyse des mesures, car elles pourront servir à expliquer des variations du signal reçu qui ne sont pas modélisées dans le calcul (présence d'arbres, de véhicules, ...).

Pour l'acquisition des mesures un chariot à roulette a été conçu. Ce chariot devait pouvoir supporter l'ensemble des équipements de mesure (analyseur de spectre, antenne, PC portable, caméra, GPS) avec un maximum de sécurité, il devait pouvoir rouler sur des terrains divers (bitume, herbe, gravier, ...), tout en restant suffi-



FIGURE 2.5 – Antenne d’émission (toit du bâtiment principal de l’IUT à gauche, toit du SP2MI à droite)

samment léger pour être conduit par une seule personne. L’ensemble du système embarqué pour l’acquisition des mesures est visible sur la figure ??.

2.4.2.3 Poitiers 3 : mesure de type quadrillage

Objectif L’objectif de cette campagne de mesure est de caractériser la variabilité spatiale dans les différentes zones de visibilité.

Mise en oeuvre En effet comme évoqué dans le chapitre précédent, l’outil de calcul de type lancer de faisceaux offre la possibilité de pouvoir identifier les différentes zones de visibilité d’une antenne à savoir Z_{direct} , $Z_{\text{réflexions}}$, $Z_{\text{diffractions}}$. De ce fait une simulation a été effectuée au préalable afin d’identifier les différentes zones de visibilité par rapport à l’antenne d’émission. Les mesures ont été réalisées avec le dipôle à la fréquence de 2,3GHz. Une plaque de 36 (4×9) trous espacés d’une longueur d’onde ($\approx 13\text{cm}$) entre les trous (voir figure ??) a été construite. Pour chaque zone de visibilité, nous avons 128 points de mesure correspondant à 3 plaques aboutées par leur grand coté. La réception se fait à 1,5 m au dessus du sol (l’antenne étant tenue par un tube en PVC, lui même emmanchée dans les trous de la plaque).

2.4.2.4 Nantes 1 : mesure de type parcours

Objectif L’objectif de ces mesures est de tester un critère pertinent de comparaison mesures et modélisations mais avec une grande quantité de données et des antennes réelles de téléphonie mobile.

Mise en oeuvre Pour effectuer ces mesures, une bonne partie du quartier nord de Nantes a été modélisée (terrain, bâtiments et végétation). Deux types de mesures ont été réalisées : une mesure simultanée de chaque bande descendante de chaque opérateur, et ce pour toutes les bandes de fréquences de téléphonie mobile (800, 900, 1800, 2100, 2600 MHz), et deux mesures spectrales dans les bandes 900 et 1800 des opérateurs Orange, SFR, Bouygues Télécom et Free. Les mesures ont été effectuées avec l’analyseur de spectre NARDA SRM 3006. Le parcours est visible sur la figure ??

2.4.2.5 Nantes 2 : mesure temporelle en un point fixe

Objectif L’objectif de cette étude est d’analyser la variabilité temporelle de l’exposition des personnes aux émetteurs de type stations de base de téléphonie mobile.

Mise en oeuvre Pour analyser la variabilité temporelle de l’exposition, nous avons mené une campagne de mesure sur le site du CSTB de Nantes. Le point de mesure est situé sur le toit du bâtiment Aquasim. Les stations de base des opérateurs Orange et SFR sont présentes sur le site, comme illustré sur la figure ??.



FIGURE 2.6 – Système d’acquisition de mesure de champ électromagnétique

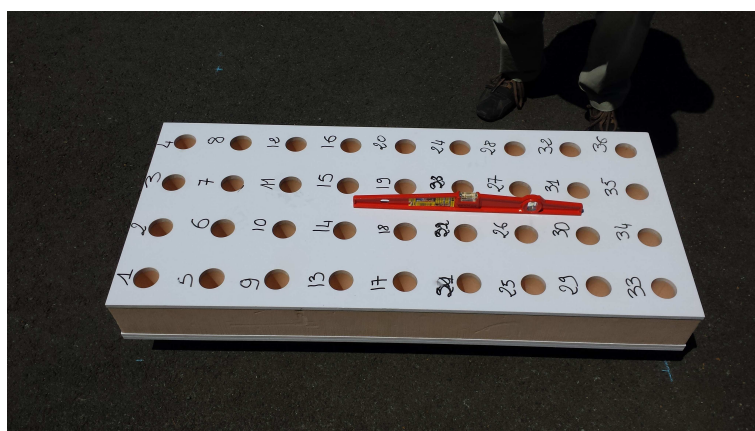


FIGURE 2.7 – Plaque pour l’étude de la variabilité spatiale locale du champ électrique

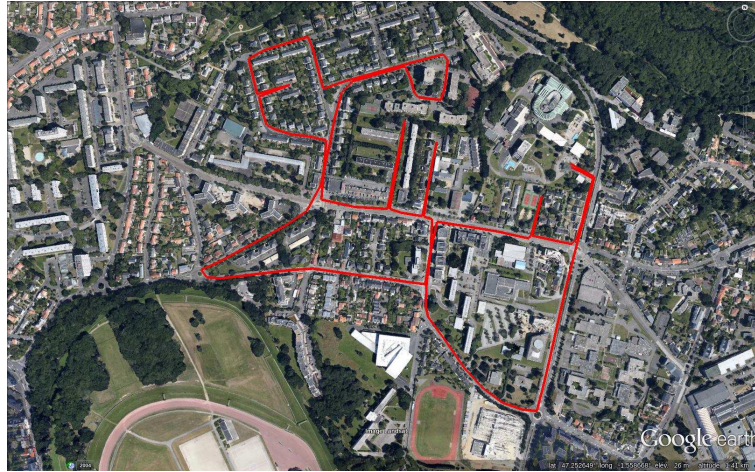


FIGURE 2.8 – Parcours sur Nantes avec antennes réelles

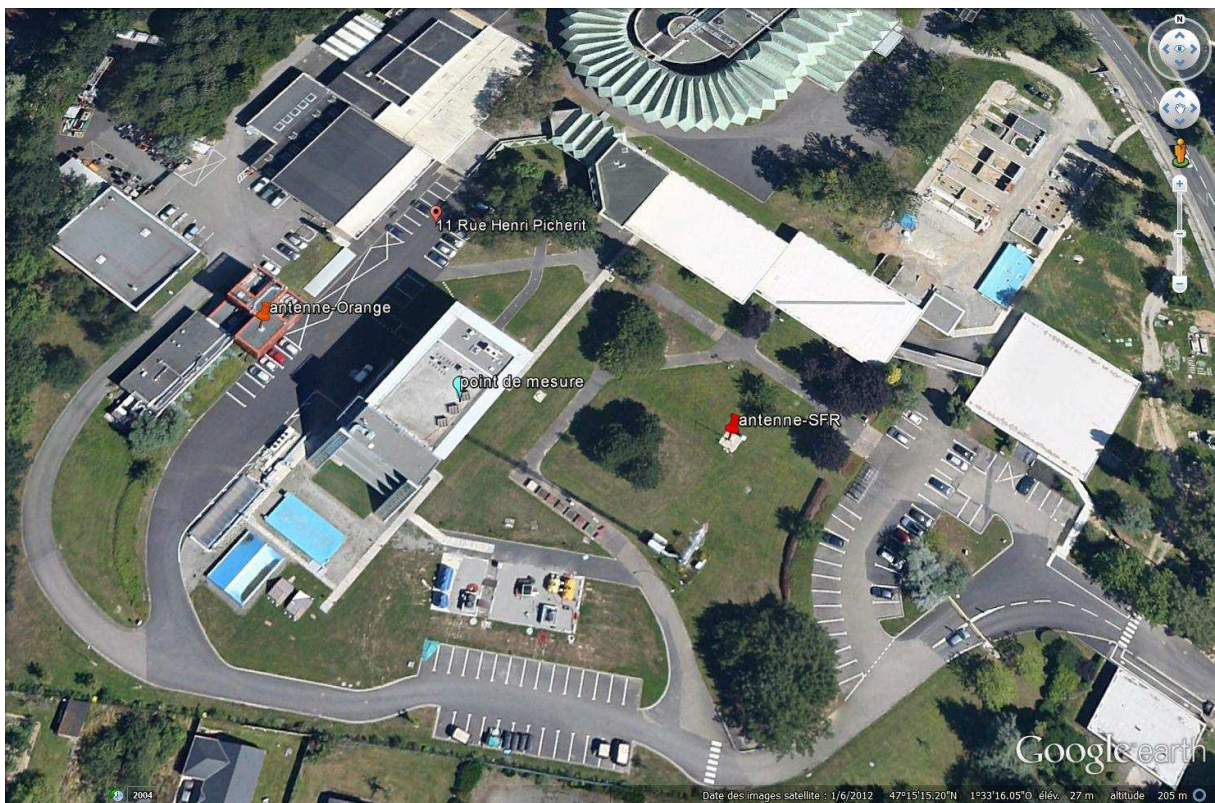


FIGURE 2.9 – Site d'étude au CSTB de Nantes

station de base Orange est installée sur le bâtiment “fumisterie” et le point de mesure se trouve dans le faisceau principal d'un de ses azimuts (voir figure ??), et celle de SFR sur un mat (voir figure ??). Les figures ?? et ?? montrent les stations de base vues depuis le point de mesure.

Particularité de la zone d'étude Le point de mesure a été choisi de telle sorte à recevoir du champ en Z_{direct} (dans le faisceau principal) depuis les antennes de l'opérateur Orange juste en face et du champ en Z_{direct} et $Z_{\text{réflexions}}$ depuis les antennes de l'opérateur SFR. Une partie du champ reçu provient aussi d'autres émetteurs qui ne sont pas visibles depuis le point de mesure, comme celui des opérateurs Bouygues Télécom et de Free permettant ainsi d'avoir de l'information sur la variabilité temporelle de l'exposition lorsque le champ reçu se trouve en $Z_{\text{diffractions}}$ des émetteurs. Le comportement temporel du champ électrique dans les différentes zones est plus ou moins influencé par l'environnement. En effet, dans le cas du champ reçu en Z_{direct} , étant donné que nous sommes situés en hauteur (quatre étages), la liaison est peu sujette aux variations de l'environnement. Au contraire, dans le cas des champs reçus en $Z_{\text{diffractions}}$, de nombreux facteurs extérieurs (véhicules en mouvement, ...) peuvent intervenir. Les mesures ont été effectuées avec l'analyseur de spectre



FIGURE 2.10 – Station de base Orange



FIGURE 2.11 – Station de base SFR



FIGURE 2.12 – Station Orange vue du point de mesure



FIGURE 2.13 – Station SFR vue du point de mesure

NARDA SRM 3006. L'analyseur a été configuré pour mesurer le champ électrique cumulé dans chacune des bandes descendantes affectées à chaque opérateur. Même si certaines bandes de fréquences peuvent être utilisées avec plusieurs technologies (par exemple UMTS et GSM dans la bande 900, ou LTE et GSM dans la bande 1800 pour Bouygues), la connaissance des antennes présentes dans la zone et l'analyse du spectre mesuré permet d'identifier la technologie mesurée.

Les émetteurs présents sur le site sont :

- en Z_{direct} (opérateur Orange, présent sur le site) : les technologies LTE 800, GSM 900 et 1800, UMTS 2100,
- en $Z_{\text{réflexions}}$ (opérateur SFR, présent sur le site) : les technologies LTE 800, UMTS 2100¹
- en $Z_{\text{diffractions}}$ (opérateur Bouygues Télécom, non présent sur le site, à peu près 400 m du point de mesure) : les technologies LTE 800, GSM 1800, UMTS 2100.

Pour analyser la variabilité temporelle de l'exposition deux types de mesure ont été réalisées, avec pour chaque type de mesure un objectif différent :

- Mesure sur 6 heures (Mesure_6h) Ce sont des mesures par bandes descendantes réalisées pendant la journée avec un pas d'échantillonnage temporel de 6 s, pour une durée totale de 6 h. L'objectif de ces mesures est d'analyser le comportement global de l'exposition par rapport au temps de moyennage en fonction des technologies et des zones de visibilité.
- Mesure sur 24 heures (Mesure_24h) Les mesures par bandes descendantes ont été réalisées avec un pas d'échantillonnage temporel de 12 s au même point que la Mesure_6h, pour une durée totale de 24 h. L'objectif de ces mesures est d'analyser la variation journalière de l'exposition. Ces mesures viennent en complément de la Mesure_6h et ont pour objectif de voir si les comportements moyens observés avec la Mesure_6h ne sont pas différents en fonction des plages horaires (matin, soir ...).

2.4.3 Synthèse

Cette section a permis de présenter les différents types de mesure utilisés dans le cadre de la thèse. Grâce à leur diversité, nous pouvons aborder la problématique de l'exposition sous plusieurs angles. Par la suite, nous nous focaliserons sur les critères qui permettent de faire une comparaison entre des mesures et des simulations.

2.5 Critères d'évaluation des méthodes de simulations par rapport aux mesures

Nous rappelons que l'un des objectifs de cette thèse est de participer à la définition d'un indicateur d'exposition en exploitant conjointement les aspects liés aux mesures et aux simulations. Un des moyens utilisés pour atteindre cet objectif est de s'intéresser aux indicateurs d'évaluation d'erreurs entre mesures et simulations. Et vu le nombre de situations d'exposition qu'on peut être amené à étudier, trouver un indicateur de comparaison pertinent et adapté à tous les cas d'exposition n'est pas une question triviale. La question du critère d'évaluation d'erreur de prédiction est donc devenu un problème crucial dans la recherche d'un indicateur d'exposition pour permettre de :

- faire une validation mutuelle des méthodes et protocoles utilisés ;
- analyser les incertitudes liées aux méthodes de calcul ;
- caractériser au mieux toutes les configurations d'expositions ;
- développer des systèmes de monitoring à moindre coût : exemple du projet ANSES Vigixpo [?].

Nous allons ainsi dans cette partie faire un état de l'art sur les indicateurs d'évaluation de fiabilité de méthodes de calcul généralement utilisés dans le cadre de la simulation des ondes radio. A partir de là, nous allons trouver un critère pertinent permettant d'évaluer les erreurs de prédiction pour répondre à l'ensemble de nos besoins.

1. Des émetteurs UMTS 900 sont aussi présents, mais ne sont pas traités.

2.5.1 Etat de l'art sur les critères de comparaison mesure et simulation

Les critères de comparaison de méthode de prédiction par rapport aux mesures généralement utilisés dans le cadre de la simulation des ondes radio peuvent être classés suivant 3 types de critères :

- le critère de type "erreur" ;
- le critère de de type "liaison" ;
- le critère de type "caractéristiques de la distribution des données".

2.5.1.1 Critère de type "erreur"

Ce type de critère est basé sur les écarts entre mesure et simulation. Ces critères permettent d'estimer l'erreur de prédiction par rapport aux mesures. Ils servent surtout à comparer plusieurs modèles par rapport à une série de mesures où plusieurs méthodes entre elles. Ceux qui sont présentés ici sont tous des variantes, car ils sont tous basés sur le calcul du biais entre mesure et simulation. Nous notons X le vecteur de mesure, Y le vecteur de simulation et N le nombre d'échantillons.

Erreur Moyenne ou Mean Error

$$MeanError = \frac{1}{N} \sum_i^N (X_i - Y_i) \quad (2.3)$$

Erreur de dispersion ou erreur d'écart-type : Standard Deviation Error Ici on mesure l'erreur entre l'écart-type des simulations et celui des mesures.

$$StandardDeviationError = \sigma_x - \sigma_y \quad (2.4)$$

Avec :

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (2.5)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2.6)$$

Erreur Quadratique Moyenne : Root Mean Square Error C'est la racine carrée de l'erreur au carré entre les mesures et les simulations.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^N (X_i - Y_i)^2}{N}} \quad (2.7)$$

2.5.1.2 Critère de type "liaison"

Ces indicateurs, contrairement aux précédents, ne s'intéressent pas à la valeur absolue des distributions mais à la relation entre elles.

Nuage de points Le nuage de points permet de définir la forme d'une éventuelle relation entre les mesures et les simulations à l'aide d'une représentation graphique (illustration sur la figure ??).

Coefficient de corrélation de Pearson

$$P = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2.8)$$

avec

$$Cov(X, Y) = \frac{1}{N} \sum_i^N (X_i - \bar{X}) (Y_i - \bar{Y}) \quad (2.9)$$

Il permet de rechercher une relation linéaire entre les mesures et les simulations. Cependant en fonction de la variabilité des données de la distribution, son résultat peut aboutir à des conclusions erronées. Il est plus adapté à des données distribuées normalement et ne comportant pas de valeurs exceptionnelles.

De ce fait, dans le cadre de l'évaluation des méthodes pour la simulation de l'exposition, à cause de la grande variabilité de l'exposition, son utilisation n'est pas adaptée sur tous les cas d'exposition. Cela s'explique par le fait que l'on peut trouver une valeur très forte et une valeur très faible sur deux points qui sont relativement proches car tout dépend de la position du point par rapport à l'antenne ainsi que du milieu dans lequel se propage l'onde.

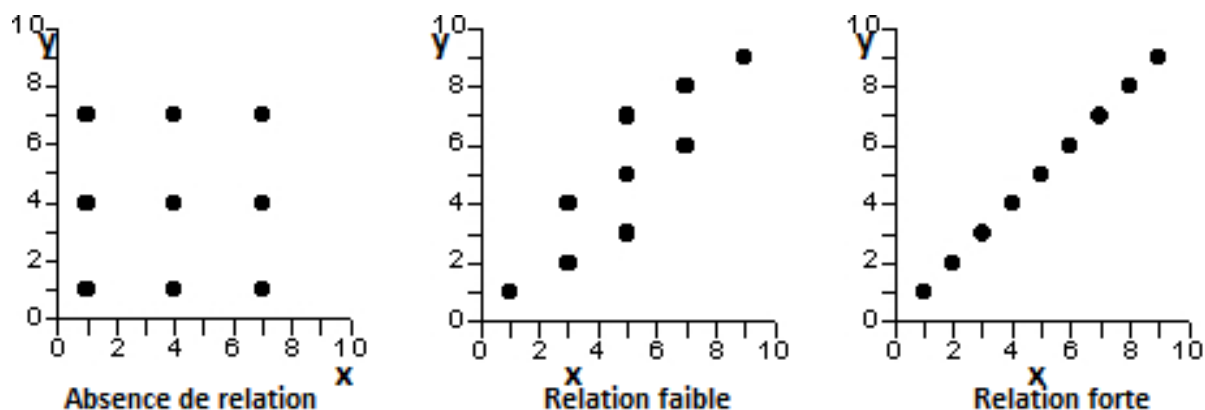


FIGURE 2.14 – Exemple d'intensité de relation entre deux variables

Dans certains domaines, ce genre de cas peut être considéré comme un biais et peut être facilement détectable avec les nuages de points et être éliminé lors de l'analyse. Cependant dans notre cas ces données appartiennent naturellement à la distribution et de ce fait elles doivent faire partie du traitement au même niveau que les autres. Le coefficient de Spearman constitue une alternative à ce problème.

Coefficient de Corrélation de Spearman C'est le coefficient de corrélation de Pearson appliqué au rang des échantillons.

$$S = 1 - \frac{6 \cdot \sum_i^N [r(X_i) - r(Y_i)]^2}{N^3 - N} \quad (2.10)$$

Avec $r(X_i)$, rang de X_i dans la distribution $X_1 \cdots X_N$ et $r(Y_i)$, rang de Y_i dans la distribution $Y_1 \cdots Y_N$. Le rang de X_i ou Y_i est la position de cette valeur dans la distribution ordonnée des valeurs de X ou de Y . Le coefficient de corrélation de Spearman analyse la relation entre les rangs des échantillons, permettant ainsi de détecter l'existence de relations monotones quelle que soit leur forme. Il ne s'intéresse pas à la valeur de l'échantillon mais à son rang ce qui permet d'éviter les erreurs sur le calcul du coefficient dues aux valeurs particulières. Il présente l'avantage de pouvoir être utilisé sur des distributions présentant des relations non linéaires où comportant des valeurs exceptionnelles.

2.5.1.3 Critère de type "caractéristique de la distribution"

Ces critères sont calculés indépendamment pour chaque jeu de données. Ensuite, en fonction des objectifs recherchés, on peut les comparer de manières différentes : par exemple, comparer leurs valeurs absolues ou encore analyser leur rapport ou leur différence. Ils peuvent être classés en deux sous-catégories : mesure de dispersion et mesure descriptive.

Mesure de dispersion : écart-type, coefficient de variation

Ecart-type C'est un indicateur caractéristique de la dispersion de la distribution exprimé dans la même unité que les observations (formulation voir Erreur de dispersion : (??)). Il peut être considéré comme l'écart observé en moyenne entre un élément de la distribution pris au hasard (un point de mesure sur un parcours) et la moyenne des données.

Coefficient de variation

$$CV(X) = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad (2.11)$$

C'est un indicateur de dispersion sans dimension. Il représente le rapport entre l'écart-type et la moyenne de la distribution et présente l'intérêt de pouvoir être utilisé pour des comparaisons sur des échantillons avec des échelles différentes.

Mesure descriptive : min, max, moyenne, médiane, quantile Ces indicateurs permettent de caractériser la distribution. Dans le cadre de l'exposition, où les normes reposent sur des valeurs limites, la connaissance de la valeur max est primordiale sur l'évaluation de l'exposition à un point donné. Ils permettent au-delà de la vérification des valeurs limites d'avoir une idée approximative de la situation d'exposition et ne nécessitent aucun calcul élaboré. Cependant, au vue de la grande variabilité de l'exposition et de la diversité des situations d'expositions, ces deux indicateurs atteignent très rapidement leurs limites car ils reposent uniquement sur les

valeurs extrêmes et restent totalement aveugles à tout ce qui se passe sur le reste des données. Pour avoir une caractérisation plus complète de la distribution, on peut aussi utiliser la moyenne. Elle est utilisée par la plupart des indicateurs de performance. Elle est très intéressante mais il ne faut pas se fier à elle seule car sa fiabilité dépend fortement de la variabilité de l'échantillon. En fonction des objectifs recherchés et des situations d'exposition, la médiane est utilisée à la place de la moyenne arithmétique. Elle représente le point milieu de la distribution, c'est une caractéristique de position de l'échantillon. Les quantiles aussi sont utilisés comme des indicateurs caractéristiques de position de l'échantillon, ce sont des valeurs qui partagent la série ordonnée en sous ensemble. Plus on dispose de quantiles, mieux on connaît la distribution.

Chacun des indicateurs présentés ci-dessus présente des avantages et des inconvénients. Tout ceux qui sont basés sur la notion de moyenne arithmétique sont sensibles aux valeurs extrêmes. D'autres sont intéressants pour connaître la relation entre deux distributions (par exemple les nuages de points) mais restent impraticables lorsque que l'on veut tester des algorithmes d'optimisation qui nécessitent plusieurs simulations. Les indicateurs basés sur la position des échantillons aussi sont très intéressants car ils ne sont pas basés sur la notion de moyenne arithmétique et du coup moins sensibles aux valeurs extrêmes.

2.5.1.4 Applications dans le cadre de l'exposition aux ondes électromagnétiques

Pour les raisons que nous avons citées dans la section précédente, il est très risqué de ne se fier qu'à un seul indicateur pour évaluer un modèle. De ce fait la plupart des modèles ou méthodes dans la littérature se basent sur au moins deux critères pour pouvoir évaluer la performance des méthodes ou modèles.

La Coopération européenne dans le domaine de la recherche Scientifique et Technique (COST), dans son projet intitulé « DIGITAL MOBILE RADIO TOWARDS FUTURE GENERATIONS SYSTEMS », terminé en 1999, traite différents aspects de la téléphonie mobile et notamment des modèles de prédiction de la propagation. Pour évaluer ces modèles par rapport aux mesures, l'erreur moyenne (voir équation (??)) et le RMSE (voir équation (??)) ont été utilisés comme critères d'évaluation des performances des méthodes de prévision par rapport aux mesures [?].

[?], dans son projet d'étude prévisionnelle de l'interférence probable d'un réseau LTE avec un réseau WiFi dans les bandes adjacentes, analyse les écarts entre les modèles empiriques et le "lancer de rayon". Pour évaluer la précision des modèles, il utilise les indicateurs de performances suivant : l'erreur d'écart-type (voir équation (??)), l'erreur moyenne (voir équation (??)), l'erreur quadratique moyenne (voir équation (??)) et le coefficient de corrélation de Pearson (voir équation (??)).

[?], pour l'évaluation de la précision de sa méthode géospatiale de modélisation du champ électromagnétique émis par les stations de base par rapport aux mesures (NISmap), utilise les indicateurs suivants : erreur d'écart-type (voir équation (??)) et le coefficient de Spearman (voir équation (??)) comme méthode pour analyser les performances du modèle par rapport à la simulation.

Pour l'ensemble des applications présentées ci-dessus, au moins deux critères d'évaluations ont été utilisés pour l'évaluation des performances. Cependant on peut se trouver dans des cas où la conclusion sur une comparaison devient difficile dans le sens où les indicateurs utilisés donnent des conclusions opposées (exemple d'un écart-type qui diminue et d'une corrélation qui diminue aussi), montrant ainsi l'importance du choix des indicateurs. Dans le cadre de cette thèse, la définition d'une fonction objectif constitue une étape primordiale pour l'aboutissement de l'ensemble des travaux de validation, de comparaison et d'optimisation du modèle par rapport aux mesures. Cette fonction est très importante, car c'est elle qui permet de dire par exemple qu'une combinaison de paramètres est plus performante qu'une autre ou qu'une solution est plus plausible par rapport à une autre.

2.5.1.5 Fonction objectif

RMSE, Pearson Pour analyser les performances de notre méthode de calcul, nous nous sommes reposés dans un premier temps sur deux critères, à savoir un critère type "erreur" (RMSE) et un critère type "liaison" (Pearson) entre les mesures et les simulations. L'avantage de la corrélation de Pearson est qu'un changement de puissance de l'antenne d'émission ne modifie pas ce coefficient. Cela signifie que lorsqu'on étudie le coefficient de corrélation de Pearson sur le champ électrique en V/m ou en dBV/m, la relation de linéarité reste la même, ce qui permet de s'affranchir de la puissance qui peut être retrouvée en post-traitement (par exemple en minimisant l'écart-type entre mesures et simulations).

Le RMSE vient en complément pour juger la pertinence du modèle par rapport aux mesures de manière relative pour éviter de prendre une décision en se fiant juste sur un seul indicateur. La combinaison de ces deux indicateurs donne de bons résultats par exemple sur l'analyse des paramètres du modèle de calcul (voir partie analyse de sensibilité ??). Par ailleurs, lorsque les paramètres à modifier touchent les données géométriques (incertitude sur la position de mesure, modèles de bâtiment, végétation), ces deux indicateurs peuvent donner des résultats contradictoires. Un cas d'exemple est présenté dans le paragraphe suivant. La précision de la

méthode de calcul utilisée est fortement liée à la précision des données d'antenne, de la géométrie de la scène, etc. Ces dernières étant souvent incomplètes (par exemple le diagramme d'antenne de l'opérateur), un recours à des moyens de remonter à ces paramètres est nécessaire dans certains cas (problème traité dans le cadre du projet ANSES Vigiexpo [?]). Dans ce cadre, une comparaison de mesures et de modélisations avec la technologie UMTS900 a montré que la corrélation de Pearson peut augmenter en même temps que le RMSE.

Les mesures utilisées sont de type parcours avec 800 points de mesure acquis avec le Narda SRM3006. En cherchant à optimiser les paramètres d'antenne sur le modèle de calcul afin de faire correspondre au mieux les simulations et les mesures, nous pouvons voir que ces deux indicateurs ne convergent pas toujours dans le même sens :

- $P_1 = 0,8468$; $RMSE_1 = 1,7556$
- $P_2 = 0,8350$; $RMSE_2 = 1,7319$

Les deux cas (1) et (2) correspondent à des variations des paramètres d'antenne (diagramme de rayonnement, position, etc).

Les conséquences apportées par la qualité des données font que ces deux indicateurs ne suffisent plus comme critères d'évaluation de deux solutions potentielles d'où le choix de faire intervenir un troisième indicateur : le coefficient de rang Spearman.

RMSE, corrélation de Pearson, corrélation de Spearman : fonction "H", "P_H" et "S_H" Ici nous proposons une seconde méthode d'analyse basée sur la relation entre des critères d'erreur et des critères de relation à savoir le RMSE, le coefficient de corrélation de Pearson et celui de Spearman. La prévision idéale serait que la relation entre mesure et simulation soit linéaire et que le coefficient directeur soit égal à 1. On en déduirait aussi que la relation est monotone car toute relation linéaire est monotone. L'erreur quadratique moyenne serait aussi nulle. Ceci étant l'objectif de tout prévisionniste. De ce fait nous proposons ici un critère basé sur la monotonie, la linéarité et le RMSE; on appellera ce critère "hybride", noté H. Ainsi, pour comparer deux méthodes ou modèles selon H, la décision serait prise en fonction d'au moins deux des trois indicateurs : c'est la règle des $\frac{2}{3}$. Pour deux solutions données, les trois critères sont évalués et la meilleure solution est celle qui a le meilleur score sur au moins deux de ces trois critères. H permet de faciliter la prise de décision lorsqu'on veut comparer deux méthodes ou modèles.

Cependant lorsque le nombre de solutions à comparer augmente (≥ 3) la question de l'associativité se pose. Dans ce cas, un seuil d'acceptation est nécessaire pour pouvoir trancher entre les solutions proposées. Cette méthode s'applique bien sur la comparaison de mesure et modélisation de type parcours avec les paramètres d'antenne maîtrisés (voir chapitre ??). Toutefois, elle reste inexploitable pour faire un tri car cela nécessite que le critère soit associatif. En pratique, nous avons mis en évidence des cas non associatifs.

De ce fait sur la base des trois indicateurs de H, ont été proposées deux variantes qu'on appellera P_hybride noté "P_H" pour Pearson Hybride et S_hybride noté "S_H" pour Spearman Hybride. Ils sont définis par les équations (??) et (??).

$$P_H = (1 - P)^n 10^{\frac{mE}{20}} \quad (2.12)$$

$$S_H = (1 - S)^n 10^{\frac{mE}{20}} \quad (2.13)$$

avec n et m des exposants (actuellement, 1 et 1 par défaut), et P (respectivement S) le coefficient de corrélation de Pearson (respectivement Spearman), E l'erreur de type RMSE, calculée sur les niveaux en dBV/m.

2.6 Conclusion

Cette partie a permis d'introduire l'importance du choix du critère permettant d'évaluer les méthodes de calcul par rapport aux mesures dans la définition d'un indicateur d'exposition. Trois critères ont été proposés : H , P_H , S_H . Cela montre qu'il est impossible d'utiliser un seul critère pour traiter tous les cas possibles. Le critère H s'appuie sur la corrélation de spearman, de pearson et le RMSE. La décision selon H est prise si deux indicateurs sont meilleurs parmi deux cas de configuration. Nous avons choisi ces trois indicateurs car chacun apporte un plus sur la manière de traiter les données. Les deux corrélations permettent d'analyser le comportement absolu des mesures par rapports aux simulations et le REMSE le comportement relatif. Ce critère permet d'analyser plusieurs cas d'exposition allant des données typiquement corrélées avec spearman à des données comportant des valeurs exceptionnelles. H traite en parti le problème de la divergence dans l'évolution de deux indicateurs mais ne permet pas de prendre en compte tout les cas possibles à cause du problème d'associativité. S_H et P_H règle ce problème d'associativité. Par ailleurs, S_H semble plus riche que P_H car la formulation de S_H intègre deux manières différentes de traiter les données tandis que la corrélation de Pearson intègre indirectement le calcul du RMSE dans la formulation de P_H .

Pour les critères retenus, nous avons montré que la problématique à étudier motive le choix du critère à utiliser. Ces critères seront utilisés sous plusieurs angles afin d'apporter des éléments sur la connaissance de l'exposition.

Chapitre 3

ANALYSE CONJOINTE MESURES-MODÉLISATIONS

3.1 Introduction

Le chapitre précédent a permis de mettre en place des critères pertinents permettant de comparer les mesures et les simulations selon les situations que l'on peut être amené à étudier lors de la recherche d'un indicateur d'exposition. Maintenant, la question qui se pose dans ce chapitre est, comment explorer mutuellement les mesures et les simulations dans le cadre de la recherche de cet indicateur d'exposition? Pour apporter une réponse à cette question, nous avons orienté nos efforts de recherche sur trois principaux axes, à savoir :

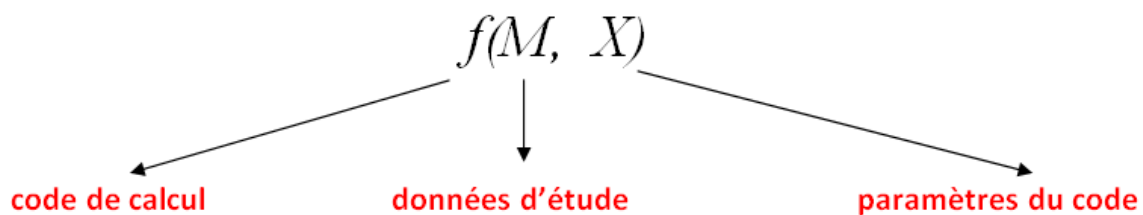
- la caractérisation de l'impact des paramètres du modèle de calcul ;
- l'analyse de l'influence des données d'entrée du modèle de calcul ;
- l'analyse de l'incertitude de la position des mesures.

Ce chapitre est organisé suivant ces trois axes de recherche.

3.2 Impact des paramètres du modèle de calcul

3.2.1 Inventaire des paramètres du modèle

Comme nous l'avons montré dans le chapitre ??, le modèle de prédiction du niveau d'exposition est un calcul assez complexe faisant appel à plusieurs paramètres. Nous appellerons f la méthode de calcul du niveau d'exposition de MITHRA-REM avec son post-traitement, X les paramètres de la méthode de calcul, M le modèle géométrique utilisé.



Comme toute modélisation d'un phénomène physique par un modèle numérique, le problème majeur qui se pose est la fiabilité des prédictions par rapport aux mesures. Cela est due à la présence de sources d'incertitudes à tous les niveaux, que ce soit au niveau des données d'entrée, au niveau du modèle de calcul et jusqu'aux traitements des résultats, rajoutant ainsi des imprécisions aux résultats de la modélisation.

La figure ?? présente l'inventaire des principales sources d'incertitudes qui peuvent intervenir dans le système de prédiction de l'exposition. On y voit apparaître trois types de sources d'incertitudes, à savoir celles liées aux données d'entrée, ensuite celles qui sont propres au moteur de calcul, et enfin celles qui sont liées aux traitements des résultats. Cette section traite les sources d'incertitudes liées au paramètre du modèle de calcul.

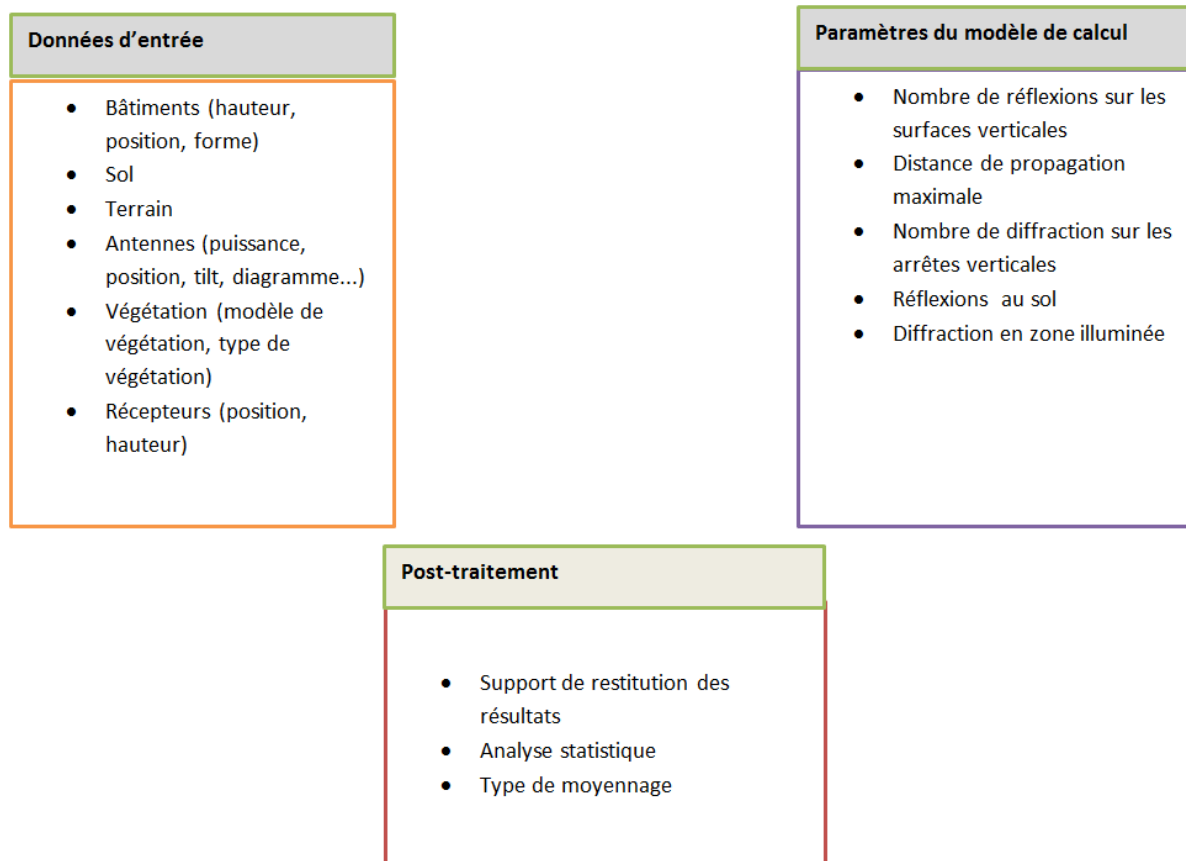


FIGURE 3.1 – Inventaire des sources d'incertitudes du modèle de calcul de l'exposition aux OEM

La manière de traiter l'impact de ces sources d'incertitudes permet d'apporter deux éléments de réponse par rapport aux objectifs de la thèse, à savoir :

- montrer le degré de validité du modèle de calcul dans le contexte général de la caractérisation du rayonnement électromagnétique ;
- caractériser l'influence des paramètres du modèle de calcul.

Avant de présenter la méthodologie employée, pour éviter des confusions sur la signification du terme "incertitude" employé dans cette partie, avec deux sens différents ("sources d'incertitudes" et incertitude sans adjectif), nous les définissons comme suit :

Le mot «incertitude sur les paramètres d'entrée ou sources d'incertitude» se réfère au mot «doute» sur les paramètres du modèle. En d'autres termes nous ne connaissons pas avec exactitude ces paramètres. Le second sens porte sur «incertitude de la variable d'intérêt ou incertitude sans adjectif» qui renvoie à l'expression quantitative d'une mesure. Elle est définie par le GUM (Guide to expression of Uncertainty in Measurement) comme étant un paramètre associé au résultat d'un mesurage (ensemble d'opérations ayant pour but de déterminer la valeur d'une grandeur). Elle caractérise la dispersion des valeurs qui pourrait raisonnablement être attribuée au résultat de comparaison de mesures et de simulations. Elle donne ainsi une idée sur le degré de validité du modèle par rapport aux mesures.

3.2.2 Méthodologie

Pour étudier l'impact des paramètres du modèle de calcul sur la caractérisation de l'exposition, nous avons utilisé un logiciel spécifique, spécialement dédié à l'étude de ces types de problème : il s'agit d'OpenTURNS <http://www.openturns.org/>. Ce logiciel est un outil de traitement des incertitudes très puissant, permettant d'étudier des codes de calcul quelles que soient leurs complexités. C'est le résultat de 5 années de R&D de la collaboration des 3 partenaires : EDF R&D, EADS¹ Innovation Works et Phimeca Engineering². Son élaboration répond aux exigences de transparence, de performances calculatoires et de générique. Disponible depuis 2007, sous Linux et Windows, le logiciel OpenTURNS (Open source Treatments of Uncertainties, Risk'N Statistics) est une bibliothèque C++ de 300 classes dédiées au traitement des incertitudes. C'est le vecteur logiciel de la Méthodologie Globale de Traitement des Incertitudes développé par le Réseau Incertitudes d'EDF R&D et enrichi très largement par d'autres industriels. Il propose une méthode globale d'étude basée sur les quatre étapes : spécification de l'étude, quantification des sources d'incertitudes, propagation des sources d'incertitudes, classification des sources d'incertitudes/étude de la sensibilité de la méthode de calcul. Nous schématisons les grandes étapes de la méthode d'analyse des incertitudes proposée par OpenTURNS sur la figure ??.

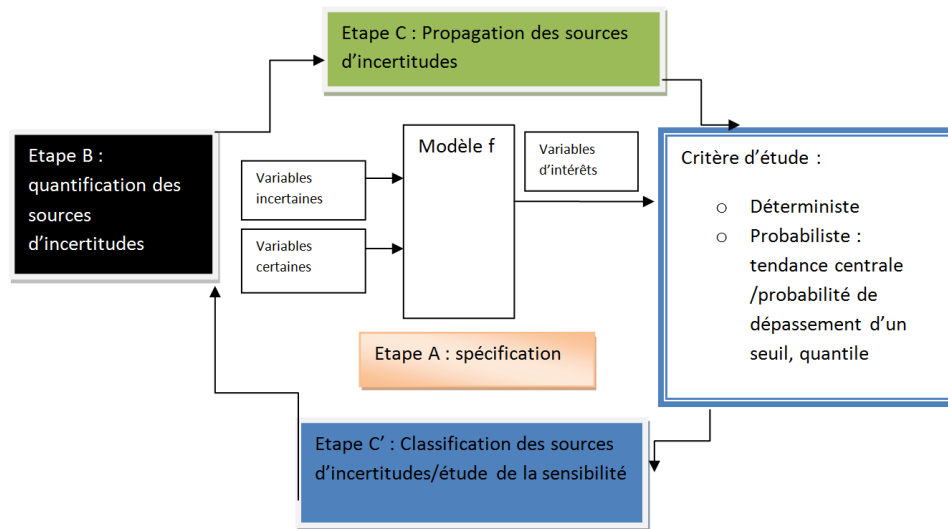


FIGURE 3.2 – Méthodologie globale d'analyse d'incertitude d'OpenTURNS

Le détail de ces différentes étapes est donné en annexe, voir ??. Ce logiciel a la particularité de propager les sources d'incertitudes à travers des codes de calcul externes (vus comme des « boîtes noires ») par le système de "wrapper" [?].

Système de "wrapper" Le "wrapper" vise à envelopper un code externe. Autrement dit, il s'agit d'un sous-programme qui permet de faire communiquer les éléments du code de calcul et OpenTURNS en réalisant les transformations nécessaires sur les données. Le code externe peut être une formule mathématique analytique ou un code informatique consacré à la résolution d'un problème physique très complexe comme le cas du code de calcul de MITHRA-REM. La figure ?? illustre le schéma de l'interfaçage entre MITHRA-REM et OpenTURNS. Ainsi le code de calcul de l'exposition aux OEMs sera vu par OpenTURNS comme une fonction f qui a comme paramètres d'entrée x (vecteur de variables d'entrée) qui prend ses valeurs dans les variables $X_1 \dots X_p$ et comme sortie Y qui représente la variable d'intérêt à considérer (illustration voir figure ??).

Les variables d'intérêt à considérer sur cette étude sont :

- le coefficient de corrélation de Pearson ;
- l'erreur quadratique moyenne (RMSE).

La procédure pour la mise en oeuvre de l'interfaçage entre le code de calcul de MITHRA-REM et OpenTURNS est détaillée en annexe, voir ??. Malgré les avantages apportés par ce système sur la réduction du temps d'exécution du code de calcul, il ne peut être employé directement pour caractériser l'influence des paramètres du modèle de calcul. Néanmoins, ce système permet de caractériser le degré de validité du modèle de calcul

1. European Aeronautic Defence and Space company
 2. société d'ingénierie des incertitudes

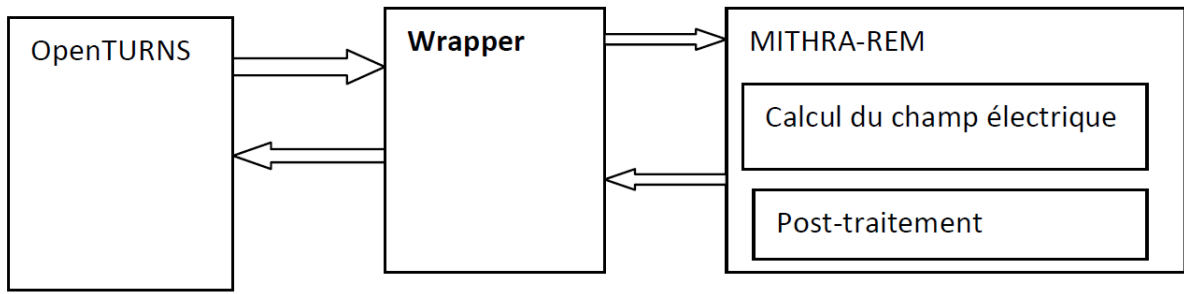


FIGURE 3.3 – Illustration de l'interfaçage

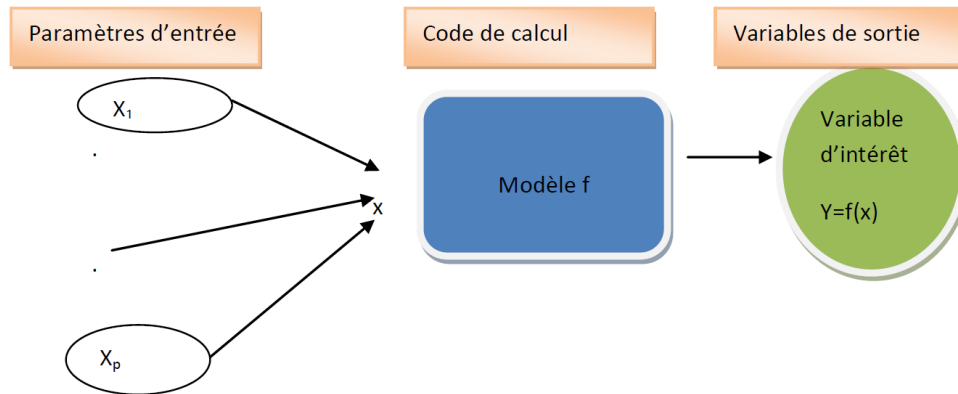


FIGURE 3.4 – Code de MITHRA-REM vu par OpenTURNS

en utilisant les expériences de type "Monte Carlo" avec un coût de calcul raisonnable. Il existe des alternatives permettant de caractériser l'influence des paramètres des modèles de calcul complexes ayant plusieurs paramètres à étudier. Le paragraphe suivant est consacré à ces méthodes.

Métamodèle Au vu des nombreux paramètres que comporte le modèle, il est important de quantifier avec précision l'influence de chacun d'entre eux afin de concentrer les efforts de recherche sur les plus influents et aider à mieux caractériser l'exposition réelle. Cela est possible avec les méthodes d'analyse globale de sensibilité. Celle-ci se distingue de l'analyse locale de la sorte : l'analyse locale s'intéresse à la valeur de la réponse, tandis que l'analyse globale s'intéresse à sa variabilité. On s'intéressera à l'analyse globale, nous nous permettrons de ce fait d'omettre l'adjectif «globale». Cette méthode est aujourd'hui utilisée dans plusieurs domaines pour étudier des codes de simulation de phénomènes très complexes. Saltelli dans [?] en regroupe un certain nombre : l'ingénierie nucléaire, la chimie, l'écologie; mais aussi dans d'autres applications en médecine [?] ou en économie. Elle commence aujourd'hui à trouver son intérêt pour la caractérisation de l'exposition réelle. OpenTurns propose plusieurs algorithmes permettant d'étudier la sensibilité des codes de calcul à l'aide d'indices de sensibilité. Ces indices peuvent être estimés avec un coût de temps faible à l'aide de métamodèle ou «Méthode des Surfaces de Réponses» qui simplifie le code de calcul. Cette technique est également utilisée pour analyser la variabilité des différents cas d'exposition sur la quantification du DAS [?]. Cette méthode ainsi que sa mise en oeuvre dans OpenTURNS sont présentées en annexe, voir ???. Maintenant que nous avons défini la méthodologie employée, la partie suivante sera consacrée à l'étude de l'incertitude du modèle de calcul.

3.2.3 Analyse de l'incertitude du modèle de calcul

Dans un contexte général de caractérisation de l'exposition aux ondes électromagnétiques, ceci a pour objectif de connaître le degré de validité de la méthode utilisée en se comparant à des mesures existantes pour ainsi renforcer la méthodologie adoptée. Nous avons utilisé les mesures de type parcours de Poitiers (voir chapitre ??, section ??) et du COST321 (voir chapitre ??, section ??). Ces dernières constituent une bonne référence car ayant été utilisées pour juger la précision de plusieurs modèles de prédiction (MFIE, IFIE, FFT-multiple half-screen, Prab.diff.FD-Methode, UTD, Neural Network, Hata, FSA) [?] entre eux. Ainsi, la fiabilité des résultats du modèle de prédiction de l'exposition par rapport à ces mesures sera évaluée. Pour cela, nous allons d'abord choisir la méthode permettant de quantifier ce degré de fiabilité.

Pour mesurer cette incertitude, OpenTURNS propose des critères déterministes et probabilistes qui répondent aux exigences de nombreux cas industriels.

3.2.3.1 Méthode déterministe

Le critère déterministe au sens d'OpenTURNS est défini comme étant la plage de valeurs dans laquelle nous sommes sûrs de trouver la valeur de la variable d'intérêt (Min-Max). En d'autres termes, c'est trouver la combinaison des variables d'entrée qui peut donner la valeur minimale et maximale de la variable d'intérêt. Nous avons 11 paramètres du modèle (sources d'incertitudes : Résolution TGD, Réflexion au sol, Drapeau, Nombre de fréquence, Fréquence min, Fréquence max, Epsilon matériaux, Sigma matériaux, Réflexion façade, Calcul physique, Rayon de moyennage, le détail sur la définition de ces paramètres sera donné plus tard) à faire varier. Donc pour pouvoir connaître la plage de valeurs de la variable d'intérêt, cela exige de faire toutes les combinaisons possibles des variables d'entrée, ce qui est impossible pour un code de calcul qui pour un seul calcul peut aller jusqu'à 3 minutes. De plus, certaines de ces variables d'entrée sont continues et non discrètes. De ce fait, avec OpenTURNS, l'utilisation des plans d'expériences de Monte Carlo va permettre de choisir les variables d'entrée de façon à récolter un maximum d'informations sur le comportement de la réponse en un minimum de simulations. Pour utiliser la simulation de Monte Carlo, nous avons défini pour chaque variable d'entrée une densité de probabilité. Celle-ci est représentée en fonction de la variable soit par une loi uniforme discrète soit par une loi uniforme continue. La loi discrète uniforme est une loi de probabilité discrète indiquant une probabilité de se réaliser identique (équiprobabilité) à chaque valeur d'un ensemble fini de valeurs possibles. Quant à la loi uniforme continue, elle est caractérisée par une densité de probabilité identique sur un intervalle continu. Le plan d'expérience utilisé n'est pas exactement du Monte Carlo, il s'agit du LHS (Latin Hypercube) car les lois des variables sont des lois uniformes et le nombre d'échantillons est limité à 1000. Nous avons augmenté le nombre d'échantillons pour avoir plus de précision mais les variations restent très faibles, raison pour laquelle nous avons fixé la valeur à 1000 pour toutes les scènes étudiées par la suite.

3.2.3.2 Méthode probabiliste

Le critère probabiliste au sens d'OpenTURNS donne une valeur indicative de la valeur de l'incertitude associée à la variable d'intérêt. OpenTURNS propose trois critères probabilistes qui sont les suivants :

- **Moyenne et écart-type de la variable d'intérêt** : ces deux critères sont utilisés pour fournir un indicateur de la dispersion de la variable d'intérêt par une estimation de sa moyenne et de son écart-type.
- **Probabilité de dépassement d'un seuil/quantile de la variable d'intérêt** : ce critère est souvent utilisé dans les études de sureté où l'estimation de la loi de probabilité est visée, dans l'objectif d'une quantification de la probabilité d'occurrence d'un événement.

Notre choix se porte ici sur le calcul de la moyenne et de l'écart-type. Connaissant l'écart-type des simulations de Monte Carlo, nous pouvons donner un intervalle de confiance de la moyenne des simulations de Monte Carlo. D'après le théorème central limite, lorsque $N > 30$, la moyenne des simulations de Monte Carlo suit une loi normale. De ce fait, l'intervalle avec un seuil de confiance de 95 % s'estime par la formule suivante :

$$\text{Intervalle de confiance de la moyenne} = \left[m - 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{N}}; m + 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \right] \quad (3.1)$$

Les résultats de la moyenne et de l'écart-type des simulations de Monte Carlo ont été obtenus avec un métamodèle approximant le vrai modèle de calcul sur 1000 évaluations de ce dernier. Nous donnerons plus de détails sur le choix et la mise en oeuvre de ce métamodèle dans la partie traitant l'analyse de la sensibilité.

Les résultats obtenus par ces méthodes sont discutés dans la partie suivante.

3.2.3.3 Résultats et discussions

Synthèse des résultats de calcul d'incertitude Dans cette partie, nous présentons d'abord la synthèse des résultats d'étude d'incertitude sur la corrélation de Pearson et sur la RMSE pour les différentes scènes étudiées

(1 parcours sur Poitiers, 3 parcours sur Munich). Ensuite, nous nous intéresserons à la combinaison d'entrée donnant ces valeurs extrêmes en vue d'explorer aux mieux les paramètres d'entrée. En observant la figure ??,

Parcours	Poitiers	Munich0	Munich1	Munich2
Incertitude				
Pearson [Min-Max]	[0,91 - 0,96]	[0,84 - 0,93]	[0,66 - 0,80]	[0,75 - 0,874]
Moyenne	0,95	0,90	0,74	0,82
Ecart-type	0,009	0,026	0,035	0,036
Intervalle de confiance	[0,950 - 0,951]	[0,904 - 0,907]	[0,74 - 0,75]	[0,82 - 0,83]
RMSE (dB) [Min-Max]	[2,60 - 4,42]	[6,84 - 11,47]	[6,84 - 11,11]	[8,55 - 13,45]
Moyenne	3,26	8,48	8,593	10,42
Ecart-type	0,36	1,45	1,173	1,52
Intervalle de confiance	[3,24-3,28]	[8,39 - 8,57]	[8,52 - 8,66]	[10,32 - 10,51]

FIGURE 3.5 – Incertitude des paramètres d'entrée sur la performance du modèle par rapport aux mesures

nous pouvons voir que les valeurs moyennes des simulations de Monte Carlo trouvées par l'approximation du modèle (métamodèle) de calcul pour les variables d'intérêt se trouvent dans la plage de valeurs calculée par la méthode déterministe. Cela montre que le plan d'expérience de Monte Carlo avec 1000 échantillons semble suffire pour avoir une bonne estimation de la plage de valeur des variables d'intérêt. Nous pouvons voir que les résultats d'incertitude varient selon les scènes, montrant ainsi l'influence de la précision du modèle géométrique qui n'est pas traité dans cette partie. Les valeurs obtenues dans cette étude en termes de corrélation de Pearson et de RMSE sont cohérentes à celles obtenues dans d'autres outils de propagation par exemple SIRADEL [?] ([0,95-0,96], Spearman) ou NISMap [?] ([0,85-0,86], Spearman).

Paramètres d'entrée pour les valeurs extrêmes des variables d'intérêt Nous rappelons que les paramètres d'entrée qui sont définis comme des sources d'incertitudes sont au nombre de 11 comme évoqué dans la section ??, partie ?. Ces paramètres agissent sur phénomènes de propagation modélisés dans la méthode de calcul. Mais avant cela nous donnons la définition de ceux qui seront les plus utilisés par la suite.

- A) **Réflexion sur les façades verticales** : c'est le nombre de réflexions sur les façades prises en compte. Il peut prendre lui aussi 3 valeurs 0, 1, 2.
- B) **Résolution TGD (Théorie Géométrique de la Diffraction)** ce paramètre gère la résolution de la diffraction au sens TGD lors du passage de 2D au 3D dans l'étape de calcul géométrique (voir chapitre ??, partie ??) du modèle de calcul. Il peut prendre 3 options :
 - Sans : cela signifie que le trajet 3D (voir figure ??) est directement le trajet 2D (voir figure ??) avec la vraie hauteur des obstacles autrement dit principe de Fermat (??) non vérifié.

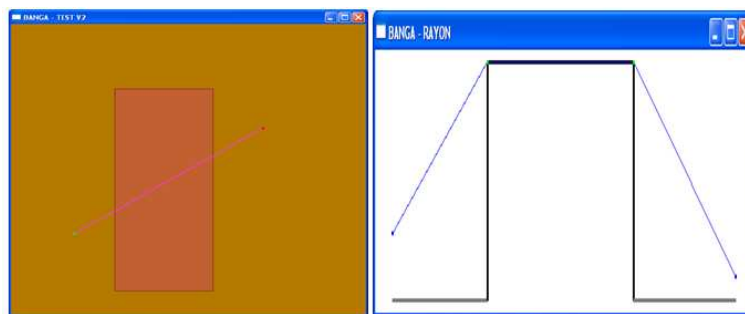


FIGURE 3.6 – Construction de trajet en 2D (à gauche vu de dessus, à droite vu en coupe)

- Stricte : le trajet 3D est déterminé à partir du trajet 2D par optimisation afin de vérifier les angles sur le cône de Keller (faisceau de rayons diffractés qui forment un cône autour de l'arête), si jamais les points de diffraction ne se trouvent pas sur des obstacles, le trajet est supprimé (voir figure ??).

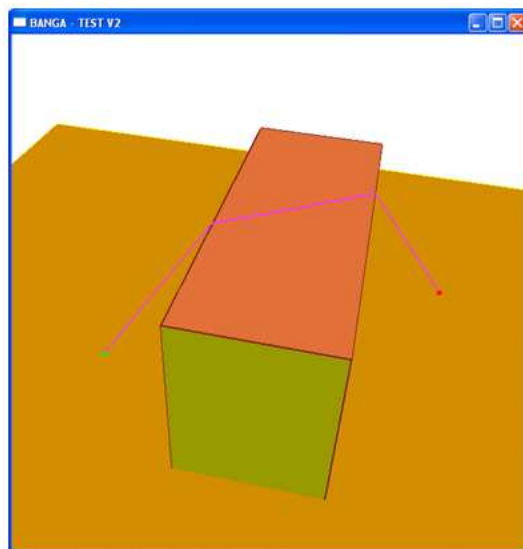


FIGURE 3.7 – Trajet 3D sans résolution de la TGD



FIGURE 3.8 – Trajet avec résolution de la TGD : 4 trajets (diffraction, sol+diffraction, diffraction+sol, sol+diffraction+sol)

- Lâche : si la résolution de la TGD échoue, l'option 1 (sans résolution de la TGD) est utilisée.
- C) **Epsilon** : c'est la permittivité relative des matériaux de la scène. C'est une variable continue qui peut varier de 1 à 15 (1 = vide). Cette gamme de valeurs permet de couvrir l'ensemble des matériaux que l'on trouve habituellement en environnement urbain : béton, pierre, brique, bois, ...[?].
- D) **Sigma** : c'est la conductivité des matériaux de la scène, elle peut varier entre 0 et 0,5. La encore, cela permet de couvrir l'ensemble des valeurs des matériaux que l'on retrouve en environnement urbain.
- E) **Calcul physique** : ce paramètre permet de gérer à la fois le type de coefficients de diffraction utilisés (entre la TUD de Pathak et Kouyoumjian, chapitre ??, partie ??) et les développements de Capolino et Albani [?] adaptés à la prise en compte de diffractions multiples en champ proche (l'une de l'autre), la prise en compte ou non de la phase (calcul en champ électrique vectoriel complexe, ou calcul énergétique scalaire en densité de puissance) lors de la sommation des trajets multiples (voir chapitre ??, partie ??). Il a quatre options :
- coefficient de diffraction de Pathak et Kouyoumjian (TUD), pas de calcul énergétique ;
 - coefficient de diffraction de Capolino et Albani, pas de calcul énergétique ;
 - calcul énergétique + coefficient de diffraction de Pathak et Kouyoumjian (TUD) ;
 - calcul énergétique + coefficient de diffraction de Capolino et Albani.

Analyse des paramètres d'entrée optimisant la méthode de calcul

- **Réflexion sur les façades verticales** : l'étude de ce paramètre a montré d'une manière générale que la prise en compte de la réflexion en façade pour tous ces parcours permettait d'obtenir les valeurs, maximale de la corrélation de Pearson et minimale du RMSE. Cela justifie que la prise en compte de multiples réflexions dans le calcul (et pas uniquement du trajet principal) est très importante pour obtenir une meilleure prédiction du champ par rapport aux mesures. Des exemples des paramètres permettant d'avoir les valeurs extrêmes des variables d'entrée sont indiqués en annexe, voir ??.
- **Diffraction et calcul physique** : l'utilisation des coefficients de diffraction de Capolino et Albani, adaptés aux diffractions rampantes multiples [?] donne de meilleurs résultats par rapport au coefficient de diffraction de Pathak et Kouyoumjian introduit par la TUD classique. Nous avons aussi constaté que la résolution de la diffraction au sens de la TGD (voir chapitre ??, partie ??) au cours du calcul des trajets (lorsque c'est possible), accompagné de l'utilisation du coefficient de la diffraction de Capolino et Albani, avec la prise en compte de la phase lors de la sommation du champ électrique vectoriel permettent d'optimiser la prédiction du champ par rapport aux mesures (maximum du coefficient de corrélation de Pearson et minimum du RMSE), et ce sur toutes les scènes étudiées.

3.2.3.4 Synthèse

Cette section a permis de connaître le degré de fiabilité de la méthode de calcul dans le contexte général de la caractérisation de l'exposition en environnement urbain. L'analyse des paramètres du modèle permettant d'exprimer cette fiabilité a permis de connaître en partie l'importance des paramètres tels que : la prise en compte de la réflexion sur les façades verticales et la façon de prendre en compte la diffraction. Cependant, elle ne nous permet pas de conclure sur les autres paramètres intervenant dans le calcul tels que la prise en compte de la réflexion au sol, le choix des matériaux (epsilon et sigma) ainsi que l'échantillonnage spectral. L'analyse de sensibilité, réalisée dans la section suivante, nous donnera plus d'informations sur l'influence de ces paramètres sur les variables d'intérêt.

3.2.4 Analyse globale de sensibilité du modèle

L'analyse globale de sensibilité, telle qu'effectuée avec OpenTURNS, permet de déterminer quelles sont les variables d'entrée du modèle f qui contribuent sur les variables d'intérêt Y , celles qui n'ont pas d'influence et celles qui interagissent au sein du modèle. Elle étudie comment la variabilité des entrées se répercute sur la variable de sortie, en déterminant quelle part de variance de la sortie est due à telle entrée à l'aide d'indices de sensibilité.

3.2.4.1 Choix d'une méthode d'analyse de sensibilité

Il existe plusieurs méthodes pour calculer les indices de sensibilité selon le modèle de calcul et la relation entre les variables d'entrées.

Cas du modèle linéaire Lorsque le modèle est considéré comme linéaire, il peut être estimé par l'équation suivante :

$$Y = \beta_j X_j + \epsilon \quad (3.2)$$

β_j est le vecteur des effets des entrées et ϵ est l'erreur du modèle. Les β_j sont obtenus par la méthode des moindres carrées.

Lorsque le modèle est linéaire et que ces entrées sont indépendantes, les indices de sensibilité pouvant se calculer sont :

- le coefficient de corrélation linéaire de Pearson ;
- le coefficient de régression standard SRC (Standardized Regression Coefficients)³ ;

Le calcul de ces coefficients nécessite la validité d'une certaine hypothèse sur la régularité (monotonie, linéarité) du modèle ce qui n'est pas le cas pour notre code de calcul, d'où l'utilisation des **indices de Sobol**. Le calcul de ces indices ne nécessite aucune hypothèse sur le modèle.

Indice de Sobol Lorsque la forme analytique du code de calcul n'est pas connue et que nous ne pouvons pas valider les hypothèses de linéarité et de monotonie sur ce dernier, nous pouvons estimer les indices de sensibilité en utilisant la décomposition de la variance fonctionnelle. Cette décomposition a été introduite par Sobol [?]. Ces coefficients sont nommés «mesures d'importance basées sur la variance» ou plus simplement indices de Sobol, ils sont compris entre 0 et 1. La décomposition de la variance fonctionnelle consiste à estimer l'importance des entrées sur la sortie d'un modèle dont la forme analytique n'est pas connue en le décomposant en sommes de fonctions élémentaires. Le calcul de la variance fonctionnelle pour estimer les indices de Sobol est détaillé en annexe, voir ?? . L'objectif est d'étudier la décroissance de la variance de Y lorsque nous fixons la variable Xi. Cette décomposition nous conduit à définir :

- l'indice de sensibilité du premier ordre Si : il quantifie la sensibilité de Y à la variable d'entrée Xi ou encore la part de la variance de Y due à la variable Xi ;
- l'indice du second ordre Sij : il exprime la sensibilité de la variance de Y à l'interaction des variables Xi et Xj, c'est-à-dire la sensibilité de Y aux variables Xi et Xj qui n'est pas prise en compte dans l'effet des variables seules ;
- l'indice du troisième ordre Sijk : il exprime la sensibilité de la variance de Y aux variables Xi, Xj, Xk qui n'est pas prise en compte dans l'effet des variables seules et des interactions deux à deux ;
- et ainsi de suite jusqu'à l'ordre p ;
- l'indice de sensibilité total : il permet d'exprimer tous les effets d'une variable d'entrée sur la sortie.

La formulation analytique de ces indices est présentée en annexe ?? . Le calcul pour estimer les indices de premier ordre et les indices totaux nécessite $N \times (2p+1)$ appels du code de calcul f et $N \times (2^p)$ pour les indices de premier, second ordre et indices totaux (où N est le nombre de simulations du plan d'expérience de Monte Carlo et p le nombre de variables d'entrée du modèle). De ce fait, en dehors des fonctions simples, des cas avec un très faible nombre d'entrées, ou de codes de calcul demandant peu de ressources en temps, les coûts d'estimation des indices de Sobol, même avec des méthodes d'échantillonnage raffinées, sont souvent inatteignables. D'où le choix d'utiliser un **métamodèle** car le code de calcul est long et le nombre de paramètres aussi est assez élevé pour calculer les indices de Sobol avec la méthode de Monte Carlo. Pour le calcul des indices de Sobol, nous avons calculé d'abord les indices de premier ordre et les indices totaux. Ces résultats vont nous permettre de voir s'il y a besoin de calculer les indices d'ordre supérieur.

3.2.4.2 Résultats et discussion

Synthèse des résultats de l'analyse de sensibilité Le travail effectué pour la mise en oeuvre du script Python du métamodèle et sa validation ainsi que les simulations sur les différentes scènes d'étude nous ont permis d'aboutir à la synthèse des résultats présentée dans les figures ?? et ?? . Les indices sont exprimés dans le tableau en %.

Nous constatons d'une manière générale des écarts entre les indices Sobol1 (indice de premier ordre) et SobolT (indice total). Le pourcentage manquant sur les 100% des Sobol1 constitue le pourcentage s'ajoutant sur les 100% de SobolT. Cela signifie que le modèle de calcul est sensible aux interactions d'une ou de plusieurs variables raison pour laquelle nous avons la somme totale de SobolT qui est supérieure à 100% et Sobol1 inférieure à 100%. Dans le cas où ces interactions seraient négligeables, SobolT et Sobol1 seraient égaux pour chaque paramètre d'entrée et la somme de chacun d'eux devrait être égale à 100 %.

3. $SRC_j = \beta_j \sqrt{\frac{VARIANCE(X_j)}{VARIANCE(Y)}}$

Parcours Paramètres d'entrée	Poitiers Sobol1	SobolT	Munich0 Sobol1	SobolT	Munich 1 Sobol1	SobolT	Munich 2 Sobol1	SobolT
Résolution TGD	0,80%	0,96%	0%	4,13%	0%	6,518%	0%	2,26%
Réflexion au sol	2,69%	7,92%	0,385%	0,75%	0,55%	0,718%	0,155%	0,330%
Drapeau	0%	0,020%	0%	0,06%	0%	0,064%	0%	0,04%
Nombre de fréquence	0%	0%	0,0342%	0,16%	0%	0,262%	0,021%	0,108%
Fréquence min	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0,028%
Fréquence max	0%	0,020%	0%	0,090%	0%	0,152%	0%	0,0541%
Epsilon matériaux	7,78%	11,84%	0%	0,15%	0%	0,390%	0%	0,0896%
Sigma matériaux	0,08%	0,46%	0,102%	0,15%	0,19%	0,304%	0,0543%	0,0735%
Réflexion façade	6,98%	7,23%	94,45%	98,7%	91,35%	98,25%	96,62%	99,06%
S (calcul physique)	9,81%	15,93%	0,305%	0,52%	0,40%	0,641%	0,410%	0,572%
Rayon de moyennage	63,41%	64%	0%	0%	0,1%	0,0975%	0%	0,0276%
Total≈	91,6%	108,4%	95%	105%	92,6%	107,4%	97,3%	102,7%

FIGURE 3.9 – Degré d'importance des paramètres d'entrée sur la variation du coefficient de corrélation de Pearson

Parcours	Poitiers		Munich 0		Munich 1		Munich 2	
	Sobol1	SobolT	Sobol1	SobolT	Sobol1	SobolT	Sobol1	SobolT
Paramètres d'entrée								
Résolution TGD	2.57%	2.73%	3.69%	3.87%	11.45%	11.51%	4.98%	5.06%
Réflexion au sol	0.67%	5.69%	0.408%	0.875%	0.552%	0.809%	0.162%	0.326%
Drapeau	0%	0.027%	0%	0.014%	0%	0%	0%	0.002%
Nombre de fréquence	0%	0.013%	0%	0.0256%	0%	0.010%	0%	0.020%
Fréquence min	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Fréquence max	0%	0.014%	0%	0.014%	0.0076%	0.015%	0%	0%
Epsilon matériaux	7.94%	12.42%	0.025%	0.063%	0.154%	0.360%	0.0159%	0.059%
Sigma matériaux	0.050%	0.11%	0.111%	0.15%	0.325%	0.492%	0.0921%	0.130%
Réflexion façade	0%	0.092%	94.87%	95.23%	86.58%	86.83%	94.29%	94.46%
S (calcul physique)	3.57%	5.9%	0.252%	0.379%	0.282%	0.461%	0.137%	0.202%
Rayon de moyennage	78.9%	79.20%	0%	0%	0.0740%	0.070%	0.0146%	0.0146%
Total≈	93.8%	106.2%	99.4%	100.6%	99.4%	100.6%	99.7%	100.3%

FIGURE 3.10 – Degré d'importance des paramètres d'entrée sur la variation du RMSE

Discussion sur les résultats

Indice total de Sobol L'analyse de ces résultats pour les données de Munich montre que la réflexion sur les façades influe à plus de 90 % sur la variabilité des variables d'intérêt à l'exception du parcours 1 dont l'ordre d'influence sur son RMSE est de 86 %. Cela a été démontré par l'analyse d'incertitude où la prise en compte de ce paramètre avait conduit à un maximum de coefficient de corrélation et à un minimum de la valeur de RMSE.

Le reste des paramètres influe à hauteur de 10 à 15 % sur la variabilité des résultats des variables d'intérêt. Cependant l'ordre d'importance sur ces 10 à 15 % varie selon les parcours et les variables d'intérêt. La résolution TGD vient en seconde place après la réflexion sur les façades avec un ordre d'influence à hauteur de 2 à 6 % selon le parcours et la variable d'intérêt, à l'exception du parcours 1 où son ordre d'importance sur la variabilité des résultats des variables d'intérêt est environ de 11 %. L'analyse d'incertitude avait aussi montré que la prise en compte de ce paramètre avec l'option (résolution TGD et lorsque celle-ci échoue l'utilisation des trajets 2D directement) conduisait à un meilleur coefficient de corrélation et un minimum de RMSE.

Par ailleurs, pour la scène de Poitiers, ces deux paramètres notés pour le cas de Munich (TGD et Réflexion sur les façades) n'ont pas une grande importance. Cette faible influence est due au fait que sur ce parcours tous les récepteurs sont en visibilité de l'antenne (voir image du parcours ??) faisant ainsi intervenir de moins en moins ces deux paramètres de propagation. De ce fait, nous allons par la suite analyser les indices du second ordre mais cette fois uniquement sur les parcours de Munich.

Pour mieux étudier l'influence des paramètres dont l'ordre d'importance sur la variabilité des résultats est très faible (0,1 à 0,9 %), nous proposons de fixer les autres paramètres et de les étudier séparément.

Indice du second ordre : analyse des interactions entre les paramètres d'entrée Dans la figure ??, nous avons le tableau de calcul des indices du second ordre pour les parcours de Munich. Seules les combinaisons de paramètres qui n'ont pas une valeur d'indice de Sobol2 (indice de second ordre) nulle sont représentées dans le tableau. Au vu des résultats précédents, la corrélation de Pearson et le RMSE se comportent globalement de la même manière par rapport aux paramètres d'entrée, de ce fait pour la suite les indices de second ordre ne seront calculés que sur le coefficient de corrélation de Pearson.

Paramètres en interaction	Munich 0	Munich 1	Munich 2
Résolution de la diffraction/nombre de réflexion sur les façades	3,357%	6,142%	2,041%
Nombre de fréquence/nombre de réflexion sur les façades	0,310%	0,856%	0,179%
Résolution de la diffraction/réflexion au sol	0,216%	--	--
Réflexion au sol/calcul physique	0,121%	0,548%	--
Réflexion au sol/fréquence max	0,204%	--	--
Nombre de fréquence /sigma	0,135%	0,387%	0,099%

FIGURE 3.11 – Indice de Sobol du second ordre

Ce tableau met encore en évidence les deux paramètres les plus influents à savoir :

- le nombre de réflexions sur les façades.
- la résolution de la diffraction ;

Cette interaction signifie que la variation de l'un, impacte sur la variation de l'autre. L'indice du second ordre pour l'interaction des autres paramètres reste négligeable (inférieur à 1 %). Nous allons par la suite vérifier ces conclusions données par le métamodèle en utilisant le vrai code de calcul indépendamment d'OpenTURNS et en analysant le comportement de ces paramètres sur les variables d'intérêt.

Vérification par une analyse locale avec le vrai modèle

Résolution de la diffraction/nombre de réflexion sur les façades Sachant que les autres paramètres n'ont aucune influence sur la variabilité de la variable d'intérêt, nous les fixons ici et nous ne faisons varier que la résolution de la diffraction et le nombre de réflexions sur les façades avec le vrai code de calcul sans interfaçage (wrapper) ni métamodèle. La figure ?? montre l'influence de la variation de ces deux paramètres sur le coefficient de corrélation de Pearson (correlation0) pour les 3 parcours. La première colonne représente le nom du parcours (Munich 0, Munich 1, Munich 2), la seconde les options de la résolution de la diffraction définies précédemment. La troisième colonne représente le nombre de réflexions sur les façades (0, 1, 2) et la dernière le coefficient de corrélation de Pearson.

Munich 0	SANS	0	#	correlation0=0.870013
Munich 0	SANS	1	#	correlation0=0.929895
Munich 0	SANS	2	#	correlation0=0.936477
Munich 0	LACHE	0	#	correlation0=0.868829
Munich 0	LACHE	1	#	correlation0=0.930782
Munich 0	LACHE	2	#	correlation0=0.936895
Munich 0	STRICTE	0	#	correlation0=0.892881
Munich 0	STRICTE	1	#	correlation0=0.91682
Munich 0	STRICTE	2	#	correlation0=0.927324
Munich 1	SANS	0	#	correlation0=0.707854
Munich 1	SANS	1	#	correlation0=0.772097
Munich 1	SANS	2	#	correlation0=0.804396
Munich 1	LACHE	0	#	correlation0=0.706837
Munich 1	LACHE	1	#	correlation0=0.772528
Munich 1	LACHE	2	#	correlation0=0.804986
Munich 1	STRICTE	0	#	correlation0=0.749506
Munich 1	STRICTE	1	#	correlation0=0.747336
Munich 1	STRICTE	2	#	correlation0=0.786365
Munich 2	SANS	0	#	correlation0=0.776937
Munich 2	SANS	1	#	correlation0=0.853132
Munich 2	SANS	2	#	correlation0=0.873897
Munich 2	LACHE	0	#	correlation0=0.77646
Munich 2	LACHE	1	#	correlation0=0.853218
Munich 2	LACHE	2	#	correlation0=0.874225
Munich 2	STRICTE	0	#	correlation0=0.806919
Munich 2	STRICTE	1	#	correlation0=0.83367
Munich 2	STRICTE	2	#	correlation0=0.866366

FIGURE 3.12 – Etude de l'influence du nombre de réflexion et la prise en compte en 3D de la diffraction sur la corrélation de Pearson

Les variations de ces deux paramètres peuvent influencer la variation du coefficient de Pearson jusqu'à environ 9 % en moyenne.

Une vérification des paramètres jugés non influents sur les variables d'entrée est effectuée dans le paragraphe suivant.

Paramètres non influents sur le modèle : propriétés des matériaux (epsilon, sigma) Ici nous prenons l'exemple des matériaux. Dans le code de calcul **les bâtiments** et **le sol** sont représentés par le même matériau. Nous allons les analyser séparément. La figure ?? montre la variation du coefficient de corrélation de Pearson en fonction des propriétés des matériaux du bâtiment et du sol pour les 3 parcours. En abscisse ont été représentées, pour chaque valeur de epsilon, toutes les valeurs de sigma (echantillon_materiau). Les valeurs de epsilon et sigma sont :

- **epsilon** : 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9;
- **sigma** : 0,01 ; 0,02 ; 0,03 ; 0,04 ; 0,05 ; 0,08 ; 0,07 ; 0,10 (S/m).

L'analyse de la courbe de l'influence des caractéristiques des matériaux sur la corrélation a montré que la variation des matériaux du sol n'influe pas sur la corrélation de Pearson (voir figure ??). Le sol étant présent partout sur la scène et les bâtiments non, les coins de réflexion et de diffraction seront beaucoup plus important sur les bâtiments que le sol. Ainsi lorsque nous nous intéressons à la variation des matériaux des bâtiments, nous constatons des variations plus importantes

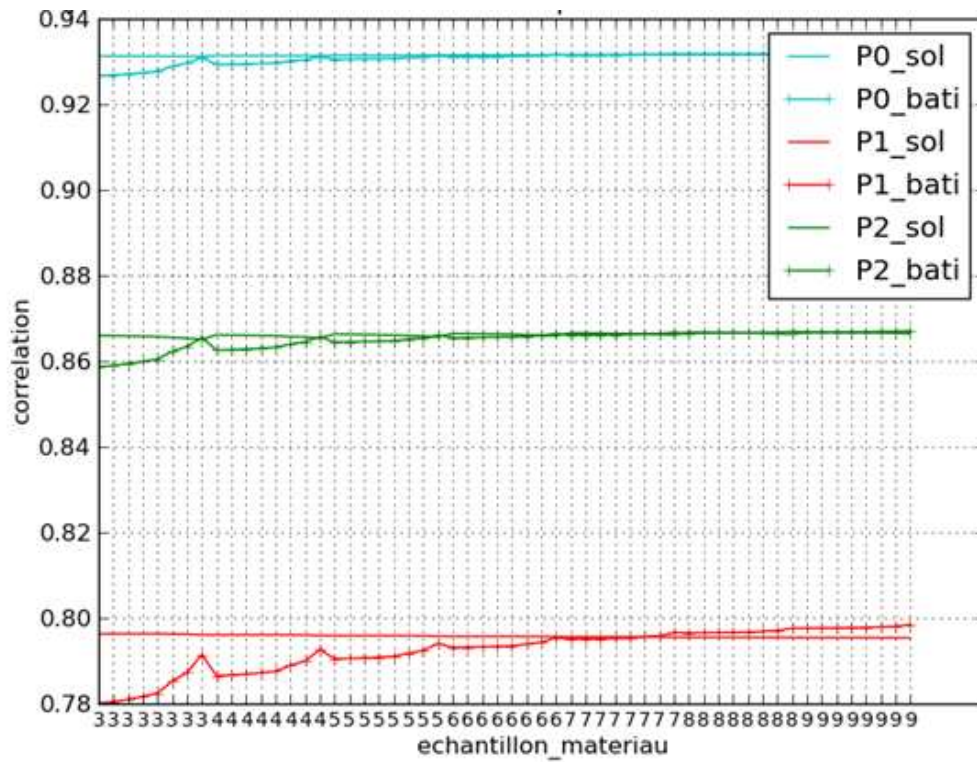


FIGURE 3.13 – Etude de l'influence des propriétés des matériaux sur la corrélation de Pearson

de la corrélation (voir figure ??). Dans ce cas les matériaux du bâtiment doivent être bien pris en compte pour une meilleure optimisation. Ce qui semble parfois impossible vue la difficulté d'accès à ces informations avec précision. L'analyse des indices de Sobol n'avait pas permis de déceler cette influence car epsilon et sigma avaient été considérés indépendants alors qu'en réalité elles ne le sont pas vraiment. Les approches utilisées avec OpenTURNS (Indice de Sobol – Monte Carlo) ne sont valables que pour les données d'entrée non corrélées, constituant ainsi leurs limites.

3.3 Impact de la variabilité des données d'entrée du modèle de calcul et des mesures

La section précédente a permis de caractériser l'impact de la variabilité des paramètres du modèle de calcul. Cela a permis de réduire le nombre de paramètres du modèle. Ainsi une nouvelle version de la méthode de calcul est née sous le nom de CSTB2013 [?] avec les meilleurs paramètres qui optimisent ses résultats. La méthodologie employée a permis aussi d'étudier son incertitude globale. Cela a permis de juger la pertinence du modèle par rapport à d'autres modèles de la littérature en se comparant aux mesures disponibles publiquement (COST321). Ces résultats permettent de réduire en partie les problèmes de variabilité dans l'exploitation mutuelle de mesures et de simulations pour mieux caractériser l'exposition réelle. Cependant, comme évoqué dans l'introduction, la variabilité des données d'entrée est aussi une autre source d'incertitude qui mérite d'être explorée dans le but de mieux caractériser l'exposition. Cette section est dédiée à l'étude de ces impacts liés à la variabilité des données d'entrée. Pour une étude beaucoup plus précise il est nécessaire d'avoir de nouvelles mesures car les données utilisées pour l'étude précédente sont relativement anciennes, imprécises, et notoirement incomplètes car très orientées couverture. Elles peuvent être utilisées à des fins de validation de modèle mais ne sont pas intéressantes pour analyser l'exposition. De ce fait, les mesures qui seront utilisées ici sont les mesures de type parcours Poitiers 2 (voir chapitre ??, partie ??). Nous rappelons que cette campagne de mesure a été réalisée dans la ville de Poitiers sur deux sites différents, à savoir celui de l'IUT situé dans le campus de Poitiers centre et celui situé dans le domaine universitaire du Futuroscope. Elle consistait à émettre un signal amplifié contrôlé à une fréquence de 2,3 GHz et à récupérer le champ électrique reçu le long de parcours définis au préalable. Nous avons au total 6 parcours de mesure :

- quatre parcours sur le site de l'IUT : P1, P2, P3, P4 ;
- deux parcours au Futuroscope : P5, P6.

Les mesures de type parcours Nantes 1 effectuées sur des antennes réelles de téléphonie mobile (voir chapitre ??, partie ??) seront aussi utilisées pour étudier l'impact des paramètres d'antenne.

Vu les configurations à étudier, la pertinence des fonctions objectifs " H " (hybride), " P_H " (Pearson Hybride) et " S_H " (Spearman hybride) définies dans la partie ??, sera jugée. Nous abordons d'abord, en premier lieu les incertitudes liées au modèle géométrique, ensuite celles de la végétation et enfin celles liées aux paramètres des antennes d'émission.

3.3.1 Modèle géométrique

3.3.1.1 Terrain et bâti : application de la fonction objectif " H "

Pour modéliser les sites afin de reproduire les parcours de mesures, les données de terrain et de bâti utilisées sont issues de l'Institut National de l'Information Géographique et forestière (IGN). Ici, nous analysons la sensibilité du modèle par rapport aux données géométriques. Pour cela, nous comparons le modèle géométrique fourni par l'IGN et un nouveau modèle "new" (corrigé manuellement : sur le sol et les bâtiments).

- Pour le site du SP2MI (P5-6) : "new" est ici une remodelisation complète du site à partir d'une vue Google-earth (pour déterminer la forme des bâtiments et leur hauteur) ;
- Pour le site de l'IUT (P1-4) : "new" est ici une correction du modèle IGN sur le sol et les bâtiments.

Nous cherchons à savoir si ces modifications ont une valeur ajoutée sur la comparaison par rapport aux mesures en utilisant le critère de décision H (voir chapitre ??, partie ??). La décision suivant le critère H est donnée pour les 6 parcours dans le tableau ?? . Pour chaque parcours nous avons les valeurs du coefficient de corrélation de Pearson, de Spearman et le RMSE pour les deux modèles géométrique (IGN et "new"). L'analyse du tableau ?? selon H montre que "new" donne de meilleurs résultats par rapport à "IGN". Ainsi toutes les études qui vont suivre vont se baser le modèle "new".

3.3.1.2 Végétation : application de H

Pour analyser les incertitudes liées à la végétation, les deux modèles suivants seront comparés :

- modèle sans végétation : "new" ;
- modèle avec végétation : "new-veg".

Parcours	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Pearson_IGN	0,58	0,71	0,67	0,50	0,31	0,34
Pearson_new	0,72	0,82	0,68	0,58	0,74	0,60
Spearman_IGN	0,57	0,68	0,68	0,52	0,25	0,34
Spearman_new	0,71	0,79	0,68	0,57	0,77	0,63
RMSE_IGN	7,92	6,14	8,91	8,21	9,05	9,57
RMSE_new	7,91	5,46	8,35	7,59	8,74	9,96
Decision H	new	new	new	new	new	new

TABLE 3.1 – Comparaison du modèle IGN et modélisation par Google-earth

La végétation a été représentée dans le modèle géométrique par un modèle ITU [?]. C'est un modèle simple d'atténuation α en dB/m correspondant à la distance parcourue par l'onde dans la végétation. Les arbres sont modélisés par des cylindres/cônes en s'appuyant sur une vue Google-earth pour connaître la position des arbres sur le site. Cette modélisation est un peu grossière car nous ne disposons pas des données géométriques de bases, des informations liées à la végétation, cependant elle nous permettra d'avoir une première idée sur le comportement de l'outil en présence de la végétation. Une comparaison du modèle avec végétation (**new-veg**) et sans végétation (**new**) selon le critère H est représentée dans le tableau ?? avec la valeur du paramètre du modèle de végétation (**alpha_veg**). Seuls les parcours de l'IUT sont représentés car sur le site du Futuroscope, la végétation est moins présente.

Parcours	P1	P2	P3	P4
Pearson_new	0,72	0,82	0,68	0,57
Pearson_new-veg	0,73	0,83	0,70	0,58
Spearman_new	0,71	0,79	0,68	0,57
Spearman_new-veg	0,72	0,81	0,73	0,57
RMSE_new	7,91	5,46	8,35	7,59
RMSE_new-veg	8,02	5,37	8,25	7,56
alpha_veg	0,3-cone	0,3-cone	0,3-cylindre	0,2-cone
Decision H	new-veg	new-veg	new-veg	new-veg

TABLE 3.2 – comparaison du modèle avec végétation et sans végétation

L'analyse du tableau ?? selon H montre que "new-veg" donne de meilleurs résultats par rapport à "new". Cela montre que la végétation qui a été dans la plupart du temps négligée n'est pas sans conséquence sur les résultats de la modélisation par rapport aux mesures. Cependant il faut noter que sa modélisation a été faite grossièrement dans notre cas et pour mieux la prendre en considération il faut trouver des modèles de végétation beaucoup plus précis. La partie suivante traite les incertitudes liées aux paramètres des antennes d'émission.

3.3.2 Antennes : fonction " P_H " et " S_H "

Pour simuler l'exposition réelle à grande échelle, il est nécessaire de disposer des informations sur les antennes de la zone à étudier. L'une des difficultés majeures de la modélisation de l'exposition à grande échelle est l'accès aux caractéristiques des antennes des stations de base telles que :

- position horizontale : coordonnées de type Global Positioning System (GPS) ;
- hauteur (ou altitude) moyenne de l'antenne, azimut, tilt mécanique ;
- diagramme de rayonnement ;
- puissance réelle.

Les opérateurs de téléphonie mobile déclarent leurs émetteurs à l'Agence Nationale des Fréquences (ANFR), mais les informations collectées sont partielles et imprécises :

- Position de l'antenne généralement ramenée au centre du bâtiment le plus proche et approximée lors du stockage des coordonnées GPS (sous la forme de degrés, minutes, secondes sans décimales) ;
- Diagramme de rayonnement généralement absent ;

Ces imprécisions impactent directement les résultats de la simulation même si le modèle de calcul n'est pas mis en cause. Le recours à des moyens permettant de remonter à ces informations améliorera les résultats de simulation et en fin de compte permettra de mieux explorer la prise en compte mutuelle des mesures et simulations pour la définition d'un indicateur d'exposition. Ces moyens ont été mis en oeuvre à l'aide d'algorithmes d'optimisation. Ce point n'a pas été étudié dans cette thèse cependant il a fait l'objet de deux stages exploitant nos travaux [?, ?] qui ont permis de mettre en place un système d'optimisation performant en utilisant la nouvelle méthode CSTB2013. Les résultats des algorithmes d'optimisation sont basés sur les études effectuées dans le cadre de cette thèse sur les critères de comparaison présentés précédemment (voir ??). La recherche des paramètres d'antenne par une utilisation conjointe de mesures et simulations montre une fois de plus à travers cette étude l'importance du critère d'évaluation de l'erreur. La fonction H utilisée qui a permis de prendre rapidement une décision sur la comparaison des incertitudes liées à la géométrie et à la végétation n'est pas adaptée à ce cas de figure car elle ne permet pas de faire un tri lorsque le nombre de cas à étudier est supérieur ou égal à trois (problème d'associativité : voir l'exemple ci-dessus) d'où l'utilisation des fonctions P_H et S_H .

exemple : sur 150 cas de configuration à comparer selon le critère H , 16 cas circulaires ont été décelés, posant ainsi le problème de l'associativité. Les trois exemples montrés dans le tableau ?? permettent d'avoir une idée par rapport à ce problème.

Test d'associativité	critère	Cas A	Cas B	Cas C
Circulaire	Pearson	0,926696	0,927245	0,926851
	Spearman	0,859787	0,859498	0,856046
	RMSE	7,30767	7,31336	7,27661
Circulaire	Pearson	0,926935	0,927131	0,927245
	Spearman	0,86311	0,857578	0,859498
	RMSE	7,27497	7,25597	7,31336
Circulaire	Pearson	0,929491	0,929074	0,928708
	Spearman	0,868613	0,872003	0,869233
	RMSE	7,2751	7,29685	7,26386

FIGURE 3.14 – Test d'associativité pour le critère H

3.3.3 Synthèse

Cette section a permis de mettre en évidence l'importance, de la qualité des données d'entrée du modèle et des fonctions objectifs définies précédemment, pour une meilleure connaissance de l'exposition réelle. Les pistes testées, telles que la remodelisation complète du site par vue sur google-earth ou la correction du modèle IGN de manière manuelle, permettent de mettre en évidence le problème posé. Ceci dit des efforts sont à faire sur la modélisation des bâtiments afin de pouvoir explorer aux mieux les avantages de la modélisation pour la caractérisation de l'exposition réelle. L'évolution de la qualité des données géographiques, les nouvelles méthodes d'acquisition et de traitement, laissent envisager que ce problème sera résolu à l'avenir [?]. L'importance de la végétation aussi a été mise en évidence. Enfin, la dernière section de ce chapitre sera consacrée à l'analyse de l'impact de la position des mesures.

3.4 Impact de la position des mesures

A cause de la forte variabilité du champ électrique et de la présence d'incertitudes sur les mesures où sur les simulations, il est plus intéressant dans certains cas d'utiliser des données moyennées à la place des données brutes comme dans le cadre de beaucoup d'études [?], [?]. Cependant il n'existe pas une seule manière de moyenner et, au vu de l'importance de l'exploitation mutuelle des mesures et simulations sur la caractérisation de l'exposition réelle, cet aspect n'est pas à négliger. Nous allons dans cette partie étudier différents types de moyennage. L'objectif est d'avoir une meilleure représentation des mesures par rapport aux simulations en fonction du post-traitement appliqué. Ici nous évaluons l'incertitude liée à la position GPS, système de géolocalisation utilisé pour la plupart des appareils de mesure. Pour avoir plus de précision sur la position de mesure, le Narda3006 utilise un système d'amélioration de la précision du système GPS, le DGPS (GPS différentiel). Son utilisation provoque des sauts sur les points de réception⁴. La pertinence des fonctions objectifs sera encore une fois évaluée.

3.4.1 Moyennage vectoriel GPS (vec-GPS) : fonction "H"

Nous considérons t_k , l'instant d'acquisition du champ, auquel correspond la position réelle p_k . k varie de 1 à n , où n représente le nombre d'échantillons dans le parcours. La figure ?? présente successivement, le parcours de mesure aux instants t_k et aux positions p_k dans la réalité, ensuite le parcours réalisé avec le DGPS et enfin les positions interpolées entre les positions mesurées (on suppose donc qu'entre deux positions identiques du GPS, on s'est déplacé à vitesse régulière en ligne droite). Ce post-traitement consiste alors à moyenner le champ sur le nombre de points avec les mêmes positions GPS afin de s'affranchir de l'effet du saut du DGPS. Ensuite au niveau de la simulation ce même nombre de points est utilisé sur les positions interpolées pour pouvoir effectuer la moyenne du champ simulé.

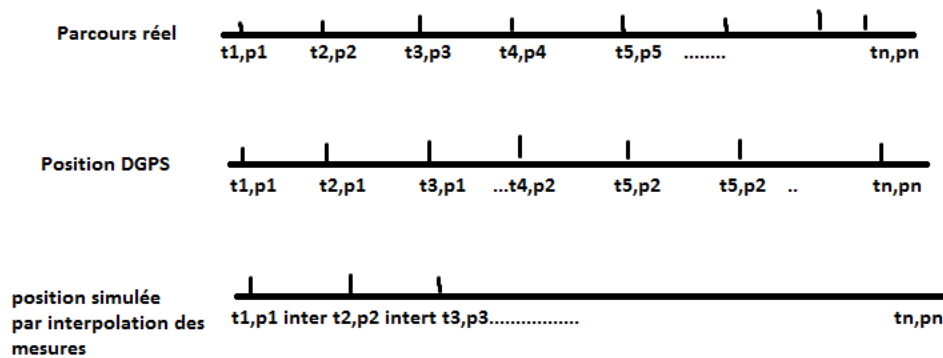


FIGURE 3.15 – Illustration

3.4.2 Moyennage spatial GPS (spa-GPS) : fonction "H"

Dans cette partie nous avons évalué en moyenne l'imprécision du GPS en analysant la distance à laquelle il reste sur une même position en considérant une vitesse moyenne de déplacement de 1,1m/s. Cette distance correspond à environ 2,70m. Ensuite, nous moyennons sur une sphère avec ce rayon les mesures ainsi que les simulations. De ce fait pour effectuer une comparaison entre les mesures et les simulations, les positions du DGPS ont été interpolées⁵. Le tableau ci-dessous montre que pour ce type de mesure le moyennage spatial selon le rayon d'incertitude du GPS donne de meilleurs résultats au sens de la corrélation et de l'écart-type. Cela signifie que pour ces types de mesure il faut juste évaluer le rayon d'incertitude du GPS et toutes les données seront remplacées par leur valeur moyenne autour de ce rayon.

4. On estime généralement l'incertitude du GPS à 10m, avec 50% (1 chance sur 2 d'avoir une erreur inférieure ou égale à 10m). Pour le DGPS, l'incertitude est estimée à 2m

5. Entre deux groupes de positions GPS (un groupe étant un ensemble de mesures pour laquelle la position GPS est inchangée), les mesures sont réparties spatialement et de manière linéaire entre les deux positions différentes, en considérant un déplacement à vitesse constante.

Parcours	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Pearson_new-veg	0,73	0,83	0,70	0,58	0,74	0,60
Pearson_vec-GPS	0,79	0,87	0,75	0,73	0,80	0,70
Pearson_spa-GPS	0,81	0,89	0,79	0,78	0,81	0,72
Spearman_new-veg	0,72	0,81	0,73	0,57	0,77	0,63
Spearman_vec-GPS	0,78	0,84	0,76	0,79	0,83	0,76
Spearman_spa-GPS	0,79	0,85	0,79	0,75	0,84	0,77
RMSE_new-veg	8,02	5,37	8,25	7,56	8,74	9,96
RMSE_vec-GPS	7,59	4,96	8,08	6,33	7,84	8,48
RMSE_spa-GPS	7	4,19	7,10	4,99	7,63	8,35
Decision H	spa-GPS	spa-GPS	spa-GPS	spa-GPS	spa-GPS	spa-GPS

TABLE 3.3 – Analyse de l’influence de la prise en compte du DGPS

3.5 Conclusion

Ce chapitre a traité différents aspects de l’exposition à savoir :

- a) l’incertitude du modèle de prédiction de l’exposition dans le contexte général de la modélisation de l’exposition ;
- b) l’influence des paramètres de code de calcul ;
- c) l’impact de la position des mesures sur la comparaison mesures-simulations.

Tout ceci dans le but d’apporter des éléments de réponse sur comment exploiter conjointement les mesures et les simulations pour une meilleure connaissance de l’exposition réelle. Les résultats qui en découlent se résument en ces différents points :

- a) des outils (wrapper et métamodèle) et des méthodes (approche probabiliste pour la propagation des incertitudes, indices de sensibilité) efficaces et prometteurs pour étudier les problématiques de variabilité sur la quantification de l’exposition réelle ;
- b) des résultats de simulation du modèle de prédiction conformes à ceux trouvés dans la littérature ;
- c) la réduction du nombre de paramètres du modèle, au final sur les 11 de départ, deux sont les plus importants : le nombre de réflexions sur les façades verticales et la prise en compte précise de la diffraction ;
- d) les deux paramètres interagissent entre eux (indice du second ordre) ;
- e) les matériaux du sol ne jouent pas sur le modèle ;
- f) les matériaux des bâtiments doivent être bien pris en compte pour une meilleure prédiction ;
- g) le rayon d’incertitude du système de géolocalisation utilisé par l’appareil de mesure doit être évalué avec précision pour améliorer la comparaison entre mesures et simulations ;
- h) impossibilité d’utiliser une seule fonction objectif pour traiter toutes les approches possibles et imaginables ;
- i) nécessité d’augmenter les efforts de recherche sur la modélisation de la végétation et du modèle géométrique. Ce problème sera amélioré dans le futur avec les nouveaux dispositifs mis en place par le CSTB [?].

Le prochain chapitre sera consacré à d’autres pistes exploratoires pour la caractérisation de l’exposition réelle, à savoir l’analyse de la variabilité du champ électrique en fonction des zones d’exposition.

Chapitre 4

ANALYSE DE LA VARIABILITÉ DE L'EXPOSITION

4.1 Introduction

Le chapitre précédent a permis d'apporter des éléments de réponse sur la caractérisation de l'exposition en exploitant mutuellement les mesures et les simulations. Le champ électrique est une grandeur très variable dans l'espace et le temps, la zone de propagation joue aussi un rôle très important sur la caractérisation de l'exposition. Ces deux aspects nous orientent à pousser notre réflexion sur l'importance de la zone d'exposition (qui comme la zone de propagation dépend aussi de l'émetteur et du récepteur) sur la variabilité du champ électrique. Ainsi, dans ce chapitre, nous étudions la variabilité spatiale et temporelle du champ électrique en fonction des zones d'exposition dont les définitions ont été données dans le chapitre ???. Nous traitons en premier lieu la variabilité temporelle.

4.2 Variabilité temporelle

Les normes réglementaires actuelles (ICNIRP, ANSI, ANFR) considèrent que pour évaluer l'exposition à court terme, une moyenne des mesures en continu sur une durée de six minutes doit être utilisée. Cette durée repose sur des risques sanitaires et n'a pas d'autre justification que ce côté lié aux risques thermiques. La Russie et l'Ukraine conservent une norme d'exposition similaire à celles de l'ICNIRP et de l'ANSI dans le domaine des hyperfréquences, sauf que la limite est une fonction continue du temps d'exposition [?] (notion de dose). Le protocole ANFR qui repose sur la norme ICNIRP, indique que dans la pratique une durée inférieure est en générale suffisante, dès lors que la valeur efficace moyennée est stable. Mais cette durée de stabilité n'a pas été quantifiée. Les études du COPIC [?] ont montré que le niveau mesuré en téléphonie mobile, quel que soit le moment de la journée, est en général proche de celui que l'on constate en faisant des mesures en continu sur cette durée. L'indice Lexnet [?] développé récemment prend en considération la variabilité temporelle en segmentant la période d'exposition entre journée et soirée.

L'objectif de cette partie est d'analyser la variabilité temporelle de l'exposition des personnes aux émetteurs fixes de type stations de base de téléphonie mobile. Nous cherchons donc à lever les incertitudes sur la durée de moyennage ainsi que sur le comportement temporel de l'exposition instantanée. Pour cela on s'intéressera à la variabilité de l'exposition journalière en fonction de la technologie utilisée. On s'intéressera également au comportement temporel de l'exposition en fonction de la zone d'exposition (zone de visibilité) par rapport aux émetteurs dans l'environnement. L'analyse de la variabilité temporelle, telle que nous la réalisons dans cette étude, permet une étude plus sélective que celle réalisée lors de l'étude COPIC (Comité opérationnel sur les ondes de téléphonie mobile) [?]. Ce projet visait un objectif proche de celui de cette étude, à savoir l'amélioration de la connaissance de l'exposition individuelle aux ondes radioélectriques avec une approche statistique. Il étudiait l'évolution du niveau réel d'exposition dans une journée pour la téléphonie mobile, pour chaque bande descendante de radiotéléphonie. Ensuite, une comparaison des niveaux bruts, moyennés sur six minutes et moyennés par tranche horaire avait été effectuée. Nous avons repris cette méthodologie, mais en ajoutant le paramètre supplémentaire de la visibilité des émetteurs depuis le point de mesure, et en étudiant l'influence de la durée de moyennage. Les résultats prennent aussi en compte l'impact des nouvelles technologies comme la 4G, qui n'était pas déployée à l'époque. Les données utilisées ici sont les mesures temporelles présentées dans le chapitre ???. Ces mesures sont notées :

- **Mesure_6h ;**
- **Mesure_24h.**

4.2.1 Méthode d'analyse et objectifs recherchés

4.2.1.1 Méthode d'analyse

Pour caractériser la variabilité temporelle de l'exposition aux ondes électromagnétiques, nous nous sommes intéressés à l'influence de la durée de moyennage sur les technologies (GSM, UMTS, LTE) et les zones de visibilité en utilisant les deux types de mesure.

Études avec Mesure 6h Soit $E[t]$ la mesure instantanée (une valeur toutes les 6s) du champ électrique sur une durée totale T de 6h, ΔT la fenêtre temporelle de moyennage, $N_{\Delta T}$ le nombre d'échantillons dans la fenêtre temporelle considérée. Le signal $\overline{E}[t, \Delta T]$ correspond au lissage du signal $E[t]$ sur une durée ΔT . Le lissage consiste à appliquer au signal une moyenne glissante afin de supprimer les fluctuations transitoires de façon à en souligner les tendances à plus long terme. $\overline{E}[t, \Delta T]$ est défini comme suit :

$$\overline{E}[t, \Delta T] = \frac{1}{N_{\Delta T}} \sum_{k=0}^{N_{\Delta T}-1} E[t - k] \quad (4.1)$$

La première approche de l'analyse de la variabilité temporelle consiste alors à comparer l'évolution de $\overline{E}[t, \Delta T]$ sur cinq ΔT ($\Delta T_1=60s$, $\Delta T_2=360s$, $\Delta T_3=720s$, $\Delta T_4=1800s$, $\Delta T_5=3600s$).

On s'intéressera ensuite à l'influence des technologies et des zones de visibilité sur l'évolution de $\overline{E}[t, \Delta T]$. Pour cela, nous utilisons une représentation graphique de type "error bars". Les graphiques de type "error bars" sont des représentations graphiques de la variabilité des données utilisées pour comparer visuellement deux quantités. Ce type de graphique permet de voir s'il existe des différences significatives entre les technologies lorsque ΔT évolue. Pour construire ces graphiques, nous définissons $ES_{\Delta T}$ qui est un intervalle dépendant de $\mu_{\Delta T}$ (voir équation (??)) et de $\sigma_{\Delta T}$.

En considérant une loi normale, nous avons 68% des valeurs de la moyenne de $\overline{E}[t, \Delta T]$ notée $\mu_{\Delta T}$ qui se trouvent dans l'intervalle défini par $ES_{\Delta T}$ lorsqu'elle est déterminée comme suit :

$$ES_{\Delta T} = [\mu_{\Delta T} - \sigma_{\Delta T}; \mu_{\Delta T} + \sigma_{\Delta T}] \quad (4.2)$$

$$\mu_{\Delta T} = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T \overline{E}[t, \Delta T] \quad (4.3)$$

avec $\sigma_{\Delta T}$, l'écart-type de $\overline{E}[t, \Delta T]$.

Étude avec Mesure 24h La durée de moyennage nécessaire pour avoir une exposition relativement stable est étudiée dans cette partie. Pour cela, une première étude permettant de segmenter en profils de variation l'exposition en fonction du moment dans la journée est effectuée. Ensuite, une fois les profils définis, nous avons analysé la durée de moyennage nécessaire en fonction d'un objectif de variation donné pour représenter au mieux l'exposition. Pour déterminer cette durée de moyennage pour un ΔT donné, nous avons calculé le taux de variation noté $TV_{\Delta T}$ défini par l'équation (??).

$$TV_{\Delta T} = \frac{\sigma_{\Delta T}}{\mu_{\Delta T}} \quad (4.4)$$

4.2.1.2 Objectifs recherchés

Les études réalisées dans cette partie devront permettre de savoir :

- si les six minutes utilisées par les normes réglementaires sont suffisantes pour évaluer l'exposition réelle en un point,
- si la technologie radio (GSM, UMTS, LTE) a une grande influence sur la variabilité temporelle, ou si on peut utiliser la même durée de moyennage quelle que soit la technologie,
- si la visibilité du point de réception par rapport aux antennes d'émission influe sur la variabilité temporelle ou bien si la même durée de moyennage peut être utilisée quelle que soit la zone de visibilité,
- si le moment d'évaluation dans la journée influe sur la variabilité.

Ces études permettront de quantifier l'impact de la durée de moyennage sur l'évaluation de l'exposition réelle. Nous allons maintenant analyser l'influence des technologies et des zones de visibilité sur la durée de moyennage.

4.2.2 Analyse de l'influence des technologies et des zones de visibilité sur la durée de moyennage

Les données exploitées ici sont celles de la campagne Mesure_6h.

• Étude du signal $\overline{E}[t, \Delta T]$

Nous avons sur la figure ?? l'exemple du LTE 800 d'Orange en Z_{direct} montrant la variation du signal lissé, en fonction du temps, et ce pour les cinq ΔT présentées au paragraphe précédent. En ordonnée nous avons le champ électrique (en V/m) et en abscisse l'instant d'acquisition des échantillons, représenté en minutes. L'analyse des signaux représentés montre d'importantes variations : d'un instant à un autre, le niveau mesuré fluctue de manière imprédictible. Cette grande variabilité explique l'importance du moyennage temporel, car avec un signal aussi variable il est difficile d'effectuer une analyse pertinente ou d'en tirer une conclusion quelconque. En effectuant une moyenne glissante sur des durées variables, le signal devient relativement de plus en plus stable. Ceci est valable pour tous les services et toutes les zones de visibilité (les figures des autres cas étudiés sont disponibles en annexe, voir ??). Nous cherchons ainsi à analyser l'impact des différentes technologies et zones de visibilité sur la durée de moyennage en étudiant la variation de $ES_{\Delta T}$.

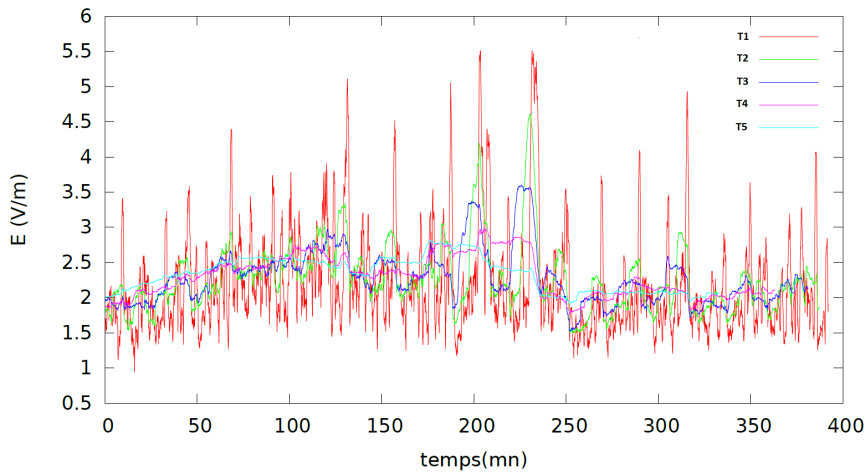


FIGURE 4.1 – Influence de la taille de la fenêtre de moyennage temporel sur le niveau de champ électrique - cas du LTE800 de l'opérateur Orange - $T_1=60s$, $T_2=360s$, $T_3=720s$, $T_4=1800s$, $T_5=3600s$ - Z_{direct}

• Étude de la variation de $ES_{\Delta T}$

Les figures ??, ??, ?? représentent l'évolution de $ES_{\Delta T}$ (voir équation (??)) pour les trois zones de visibilité. Sur chacune de ces courbes, nous avons représenté les différentes technologies.

La comparaison des courbes (figures ??, ??, ??) montre que les variations de $ES_{\Delta T}$ sont beaucoup plus grandes en Z_{direct} (opérateur Orange). En Z_{direct} (figure ??), les technologies LTE et l'UMTS présentent une plus grande variabilité temporelle par rapport à la technologie GSM. Cette différence sur la variabilité temporelle est due aux fonctionnements techniques qui sont totalement différents entre le GSM et les autres technologies. Le GSM s'appuie sur une connexion dite orientée circuit, qui ouvre un faisceau entre l'appelant et l'appelé qui ne sera fermé qu'en fin de communication. Toute la puissance est affectée à un même utilisateur faisant ainsi un signal GSM moins variant par rapport à l'UMTS et le LTE. L'UMTS qui est arrivé après le GSM avec une augmentation du débit est passé d'une connexion orientée circuit à une connexion orientée paquet avec sa technologie d'accès radio permettant à plusieurs utilisateurs de communiquer en même temps. Ces considérations techniques impliquent davantage de variations sur le signal par rapport aux GSM. Le LTE qui est le dernier à être arrivé sur le marché, apparaît avec de nouvelles considérations techniques à savoir une nouvelle interface radio basée sur un multiplexage d'accès OFDMA permettant une communication à haut débit avec moins d'interférences et une modification de l'architecture réseau existant afin de fournir une connexion tout IP. L'utilisation de l'OFDMA a pour conséquence une variation très rapide du signal.

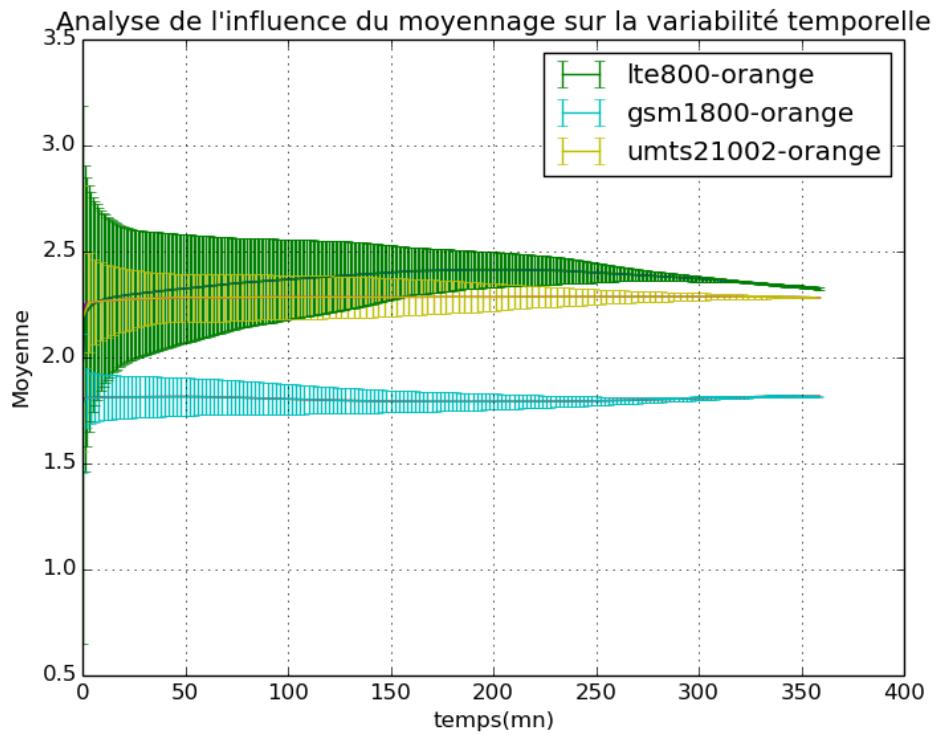


FIGURE 4.2 – Orange (Z_{direct})

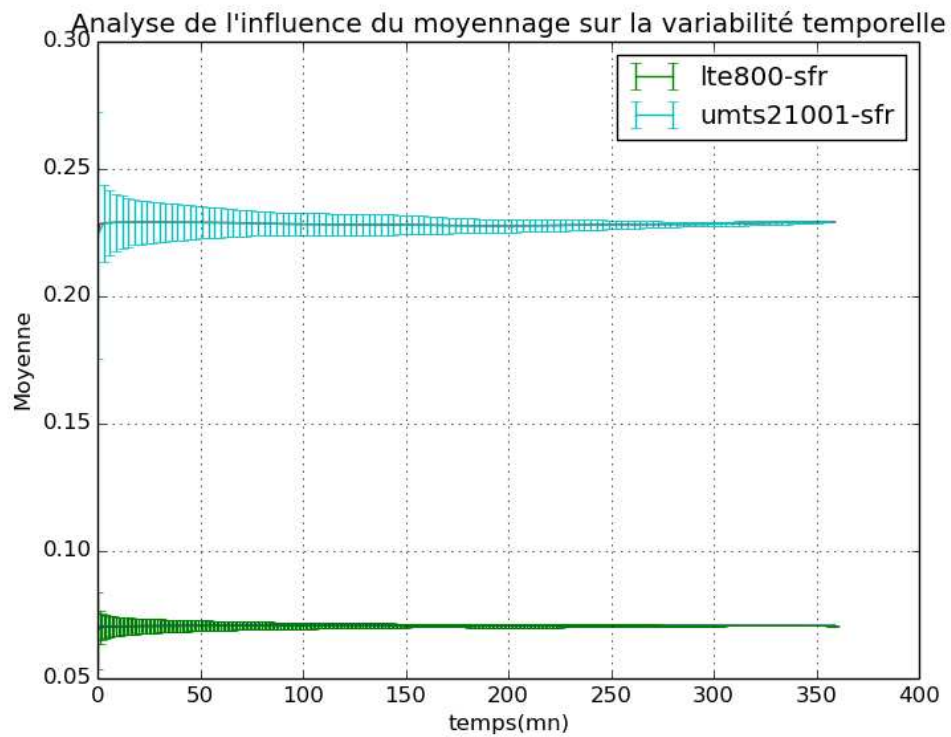


FIGURE 4.3 – SFR ($Z_{\text{réflexions}}$)

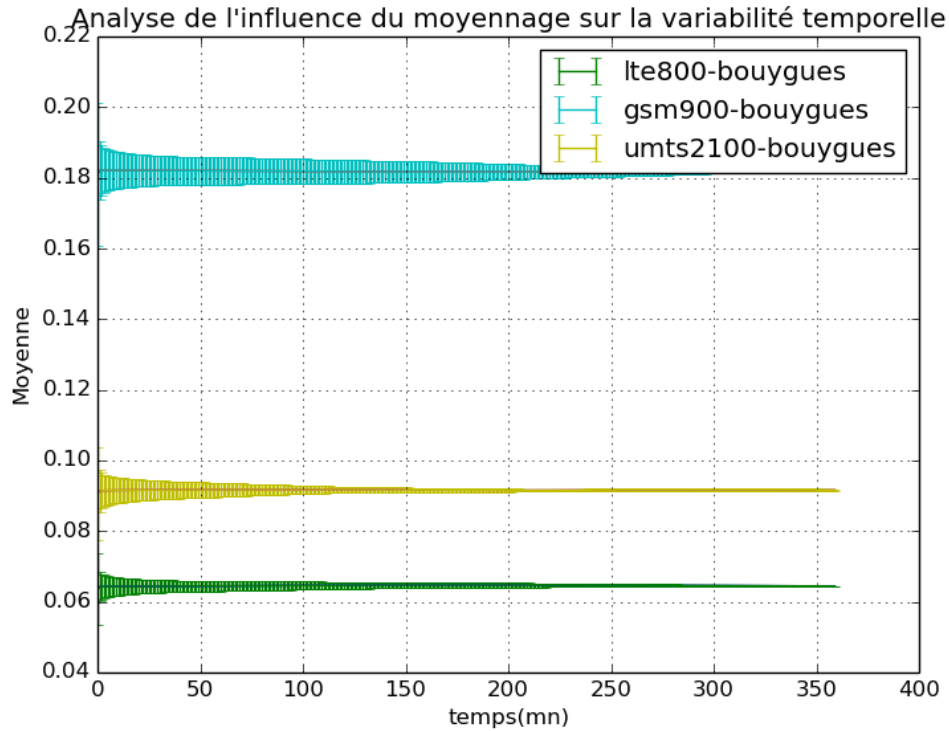


FIGURE 4.4 – Bouygues ($Z_{\text{diffractions}}$)

4.2.2.1 Synthèse

En résumé, on peut dire que la zone de visibilité joue un grand rôle sur l'évaluation de l'exposition. En fonction de la zone de visibilité, l'évaluation temporelle diffère selon les technologies en Z_{direct} . Par ailleurs en $Z_{\text{réflexions}}$ et $Z_{\text{diffractions}}$, l'évaluation est moins impactée par les technologies du fait de l'influence de l'environnement. Nous nous intéressons maintenant à la durée de moyennage à appliquer en fonction de la zone de visibilité et des différentes technologies.

4.2.3 Analyse de l'exposition instantanée journalière : segmentation en profils

4.2.3.1 Formulation de base

L'usage de la téléphonie mobile est lié à l'activité humaine et celle-ci dépend essentiellement du moment dans la journée, à savoir le jour ou la nuit. Nous pouvons ainsi supposer que le comportement journalier de l'exposition peut être divisé en deux profils de variation. [?], en comparant la moyenne globale de l'exposition à la 3G (liaison descendante et liaison montante) en zone urbaine, suburbaine et rurale a segmenté les deux profils comme suit :

- **Profil-jour : 8 h-18 h (Jour)**
- **Profil-soir : 18 h-8 h (Nuit)**

En revanche, en prenant en compte les autres technologies en plus de la 3G, mais cette fois uniquement sur la liaison descendante, nous pouvons avoir une segmentation des profils différente. Ce cas se retrouve dans l'exemple des mesures en Z_{direct} illustré dans la figure ?? . Nous rappelons ici que ce sont les mesures de la campagne Mesure_24h qui ont été utilisées dans cette partie. Sur cette figure nous avons représenté l'exposition instantanée sur 24 h pour le LTE, le GSM et l'UMTS. En abscisse nous avons l'instant d'acquisition (en heures, début des mesures à 10 h du matin jusqu'au lendemain) et en ordonnée le niveau de champ électrique dans la bande descendante considérée (en V/m). La limite des deux profils selon le découpage de [?] est aussi représentée en vert (partie haute : profil-jour, partie basse : profil-soir).

L'observation de la figure ?? montre globalement deux profils de variation. Une zone creuse qui représente visiblement la nuit et une zone avec des valeurs de champ beaucoup plus élevées, représentant le jour. Ceci est en adéquation avec la formulation de base selon laquelle l'exposition due aux stations de base est liée à l'activité journalière humaine avec des valeurs plus fortes le jour et des valeurs plus faibles la nuit.

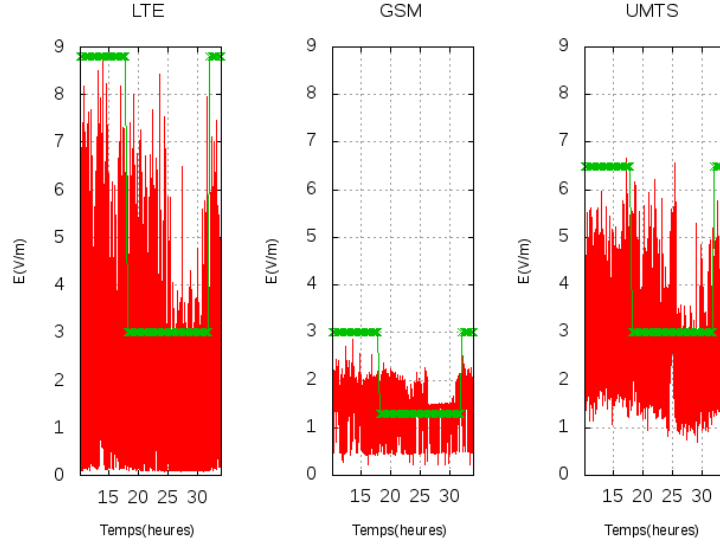


FIGURE 4.5 – Évolution temporelle de l'exposition induite par la station de base d'Orange sur 24h

En revanche, la limite de ces deux profils est difficilement identifiable à l'oeil nu. La segmentation de [?] appliquée à ce signal ne donne pas visiblement les bons profils. De ce fait, nous avons mis en place une technique qui permet de séparer les deux profils avec un critère objectif.

4.2.3.2 Procédure de segmentation en profil

La procédure de segmentation des deux profils consiste à séparer le signal brut (champ électrique acquis toutes les 12 s sur une durée de 24 h) en deux parties, et à calculer le niveau moyen sur chacune de ces parties. L'objectif est alors de rechercher l'instant de rupture entre ces deux parties provoquant à la fois la plus grande différence entre les niveaux moyens de chacune des parties, tout en essayant de garder le plus grand nombre d'échantillons dans chaque profil. Ceci est réalisé en maximisant l'équation (??) noté E_s .

$$E_s = |E_2 - E_1| * \sqrt{\Delta T_1 * \Delta T_2} \quad (4.5)$$

Avec ΔT_1 et ΔT_2 la durée des deux profils (on a donc $\Delta T_1 + \Delta T_2 = 24$ h), et E_1 et E_2 les valeurs moyennes du champ électrique sur chacun des deux profils.

Ainsi, avec cette procédure, nous obtenons l'instant de changement de profil, la durée du profil-soir et la valeur moyenne du signal dans les deux profils. Quelques exemples de résultat sont indiqués en annexe, voir ??. Nous comparons ainsi le profil-soir par rapport au profil-jour en calculant l'erreur relative notée E_r , exprimée en % et l'écart en dB entre les valeurs moyennes du signal sur les deux profils noté E_c . On définit alors l'erreur relative E_r de E_1 par rapport à E_2 selon (??) et l'écart E_c de E_1 par rapport à E_2 selon (??).

$$E_r = \frac{E_1 - E_2}{E_2} \quad (4.6)$$

$$E_c = 20 \log \left(\frac{E_1}{E_2} \right) \quad (4.7)$$

Le tableau ?? montre le résultat de la segmentation pour les trois zones de visibilité et les différentes technologies (GSM, UMTS, LTE) étudiées, la plage horaire des deux profils (en heure), E_r (en %) et E_c (en dB).

Z_{direct} : L'analyse de E_c et de E_r entre les profils (voir tableau ??) montre que les technologies LTE et l'UMTS en Z_{direct} présentent les plus grands écarts. Autrement dit, ces deux technologies en Z_{direct} se comportent différemment selon que l'exposition est évaluée dans la journée ou le soir.

$Z_{\text{réflexions}}$ et $Z_{\text{diffractions}}$: En $Z_{\text{réflexions}}$ et $Z_{\text{diffractions}}$, la différence entre ces deux profils est inférieure à 2 dB quelle que soit la technologie. On constate aussi un pourcentage négatif de E_r sur le LTE et le GSM en $Z_{\text{diffractions}}$, cela signifie que le signal du profil-soir est supérieur au signal du profil-matin. Par ailleurs au vu des pourcentages (-4 % pour la LTE et -8 % pour le GSM) de E_r par rapport aux pourcentages en zone de visibilité (excepté le GSM), nous pouvons dire que la variation en moyenne des deux profils est similaire.

Zones	Profils	LTE	UMTS	GSM
Z_{direct}	Profil-jour	9 h 10 - 00 h 20	8 h 20 - 1 h 55	7 h 05-22 h 05
	Profil-soir	00 h 20 - 9 h 10	1 h 55 - 8 h 20	22 h 05 - 7 h 05
	E_r	38 %	39 %	5 %
	E_c	2,83 dB	2,88 dB	0,44 dB
$Z_{\text{réflexions}}$	Profil-jour	7 h 15 - 00 h 55	9 h 55 - 23 h 30	indisponibles indisponibles
	Profil-soir	00 h 55 - 7 h 15	23 h 30 - 9 h 55	
	E_r	11 %	17 %	
	E_c	0,97 dB	1,41 dB	
$Z_{\text{diffractions}}$	Profil-jour	11 h 05 - 00 h 10	7 h 05 - 00 h 05	11 h 30 - 23 h 30
	Profil-soir	23 h 35 - 10 h 05	00 h 05 - 7 h 05	23 h 30 - 11 h 30
	E_r	-4 %	18 %	-8 %
	E_c	-0,39 dB	1,5 dB	-0,73 dB

TABLE 4.1 – Tableau comparatif des profils en fonction des zones et des technologies

On peut retenir ici que Z_{direct} constitue la zone la plus influencée par les variations temporelles journalières sur les technologies LTE et UMTS (38 % pour le LTE et 39 % pour l'UMTS). Nous allons voir si ces conclusions se confirment en étudiant le taux de variation en fonction de la durée de moyennage pour chaque profil de variation, pour enfin quantifier en fonction d'un objectif de variation la durée réelle de moyennage qui permet d'évaluer au mieux l'exposition.

4.2.4 Quantification de la durée de moyennage : étude du coefficient de variation TV

Pour quantifier la durée de moyennage en fonction des profils de variation, nous nous sommes basés sur les conclusions du COPIC (Comité opérationnel sur les ondes de téléphonie mobile) [?] pour définir le critère de stabilité du signal. Ce projet montre que pour la téléphonie mobile, avec les technologies déployées et les usages, de l'époque le niveau réel mesuré dans la journée et ceci quelle que soit l'heure, était en général proche de celui que l'on constaterait en faisant des mesures en continu moyennées sur six minutes : l'amplitude des variations dans la journée était en général faible, inférieure à 30 %. Nous fixons ainsi l'objectif de variation à 30 % comme critère de stabilité du signal. Le tableau ?? représente la durée de la fenêtre de moyennage trouvée pour chaque profil pour un TV (voir équation (??)) inférieur à 30 %. La valeur moyenne du signal μ en V/m (voir le calcul de TV dans l'équation (??)), moyenné avec ΔT a été aussi représentée pour chaque profil afin de comparer les écarts moyens entre profils, en fonction de l'objectif de variation.

Zones	Profils	LTE		UMTS		GSM	
Z_{direct}	Profil-jour	$\Delta T = 1 \text{ mn}$	2,52 V/m	$\Delta T = 1 \text{ mn}$	2,91 V/m	$\Delta T = 12 \text{ s}$	1,48 V/m
	Profil-soir	$\Delta T = 1 \text{ mn}$	1,88 V/m	$\Delta T = 1 \text{ mn}$	2,13 V/m	$\Delta T = 12 \text{ s}$	1,41 V/m
$Z_{\text{réflexions}}$	Profil-jour	$\Delta T = 12 \text{ s}$	0,12 V/m	$\Delta T = 12 \text{ s}$	0,24 V/m	indisponibles	indisponibles
	Profil-soir	$\Delta T = 12 \text{ s}$	0,10 V/m	$\Delta T = 12 \text{ s}$	0,20 V/m	indisponibles	indisponibles
$Z_{\text{diffractions}}$	Profil-jour	$\Delta T = 12 \text{ s}$	0,13 V/m	$\Delta T = 12 \text{ s}$	0,13 V/m	$\Delta T = 12 \text{ s}$	0,17 V/m
	Profil-soir	$\Delta T = 12 \text{ s}$	0,14 V/m	$\Delta T = 12 \text{ s}$	0,11 V/m	$\Delta T = 12 \text{ s}$	0,18 V/m

TABLE 4.2 – ΔT avec objectif de variation $< 30 \%$ en fonction des zones et des 3 technologies

Les résultats de ce tableau montrent globalement qu'une durée de moyennage inférieure à 1 mn est suffisante pour atteindre une variabilité inférieure à 30 %. Le protocole ANFR indique que la durée de moyenne temporelle est en pratique inférieure à 6 mn, dès lors que la valeur efficace moyennée est stable. Ces résultats montrent que cette durée de stabilité peut être ramenée à 1 mn. Ils confirment en partie les analyses de la section ?? et sont en concordance avec les conclusions du COPIC [?], montrant qu'il n'est pas nécessaire, pour évaluer l'exposition journalière en un point donné, de tenir compte de toute la plage temporelle et qu'une mesure moyennée sur quelques minutes est suffisante. L'exposition journalière peut être évaluée sur une durée d'1 mn lorsque le point à évaluer se trouve en $Z_{\text{réflexions}}$ ou $Z_{\text{diffractions}}$, et ce quelle que soit la technologie, y compris le LTE. Quant à la Z_{direct} , les profils jour et soir doivent être rajoutés aux paramètres à prendre en compte. Cependant, lorsque l'on change d'objectif de variation, ces conclusions peuvent considérablement différer. Nous pouvons le montrer dans le tableau ?? où nous avons repris la même étude, mais cette fois-ci en baissant l'objectif de variation à 10 %.

service-zone	Profil	LTE		UMTS		GSM	
Z_{direct}	Profil-matin	24 mn	2,64 V/m	9 mn	2,93 V/m	1 mn	1,52 V/m
	Profil-soir	20 mn	1,92 V/m	8 mn	2,14 V/m	1 mn	1,42 V/m
$Z_{\text{réflexions}}$	Profil-matin	1 mn	0,12 V/m	2 mn	0,23 V/m	¹	²
	Profil-soir	12 s	0,10 V/m	1 mn	0,20 V/m	³	⁴
$Z_{\text{diffractions}}$	Profil-matin	12 s	0,13 V/m	1 mn	0,12 V/m	1 mn	0,17 V/m
	Profil-soir	12 s	0,14 V/m	1 mn	0,11 V/m	1 mn	0,18 V/m

TABLE 4.3 – ΔT avec objectif de variation $< 10\%$ en fonction des zones et des 3 technologies

Cet exemple a montré que la zone de visibilité influençait hautement la durée de moyennage qu'il faut utiliser pour l'évaluation de l'exposition moyenne pour le LTE et l'UMTS. Lorsque le point à évaluer est masqué ($Z_{\text{réflexions}}$ et $Z_{\text{diffractions}}$), la durée de moyennage du protocole peut être ramenée au plus à 2 mn. En revanche, lorsque nous sommes en visibilité directe de l'antenne, la valeur peut être supérieure à celle du protocole (24 mn à 20 mn en fonction du profil pour le LTE et 9 mn à 8 mn pour l'UMTS). Cette différence de variabilité temporelle entre zone de visibilité directe et zone masquée est due à l'effet de l'environnement. Ceci montre que la définition des objectifs de variation est un paramètre très important sur la quantification de l'exposition, surtout pour le LTE et l'UMTS. Quant au GSM, son ΔT reste inférieur à la valeur du protocole.

4.2.5 Synthèse

Cette partie a permis d'étudier l'impact de la zone d'exposition sur la durée de moyennage pour l'évaluation de l'exposition en un point donné. La première partie de l'étude avec les données de Mesure_6h a montré que $Z_{\text{réflexions}}$ constitue la zone la plus influencée par les variations temporelles. La seconde a permis de quantifier cette durée de moyennage en considérant une base de temps plus longue (Mesure_24h). Sur la base des conclusions du COPIC [?], cette durée de stabilité peut être ramenée à 1 mn. Nous avons étudié l'influence de la position du point à évaluer par rapport aux émetteurs en prenant en compte la notion de visibilité. On en déduit qu'en Z_{direct} , le profil doit être pris en compte pour une meilleure caractérisation de l'exposition. Ainsi, pour évaluer l'exposition correctement, la connaissance de la zone d'exposition du point à évaluer permettrait de mieux caractériser l'exposition.

4.3 Analyse de la variabilité spatiale

Comme nous l'avons déjà dit dans ce chapitre, le champ électrique est très variable spatialement et temporellement. La section précédente a permis d'étudier cette variabilité temporelle en s'intéressant à la durée moyenne qui permet d'avoir une exposition stable et assez représentative de l'exposition réelle due aux stations de base. Cette section s'intéresse maintenant au second aspect de cette variabilité du champ électrique, à savoir la variabilité spatiale.

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons dans un premier temps à la variabilité locale dans les différentes zones de visibilité définies par les positions des antennes émettrices et réceptrices : nous cherchons à comprendre comment le champ varie dans les différentes zones de visibilité et à partir de quelle distance cette variation devient significative. Un état de l'art sur l'analyse de la variabilité spatiale de l'exposition aux ondes sera effectué, car le sujet fait l'objet d'une importante littérature, mais la manière de l'aborder diffère totalement selon les objectifs poursuivis. Ensuite, nous présentons les outils adoptés pour analyser cette variabilité locale et enfin nous présentons les résultats obtenus.

De plus, pour avoir un indicateur assez représentatif de l'exposition, il est judiciable de bien dissocier l'exposition de la population à grande échelle et l'exposition d'une personne à un endroit donné. De ce fait, la deuxième partie de cette section sera consacrée à la caractérisation de la variabilité spatiale de l'exposition à l'échelle d'une ville, en fonction de la zone de visibilité.

4.3.1 État de l'art sur la variabilité spatiale de l'exposition et méthodologie

4.3.1.1 Caractéristiques de la variabilité spatiale dans une communication radio

Une manière simple d'aborder une communication radio est de considérer : un émetteur (station de base) + un canal de propagation + un récepteur. Le canal de propagation assure la transmission du signal de l'émetteur

1. données non disponibles
2. données non disponibles
3. données non disponibles
4. données non disponibles

au récepteur ; il est très variable dans le temps et dans l'espace. Cette variabilité est due aux différents obstacles qui interagissent avec l'onde lors de sa propagation (maison, voitures, arbres, personnes, ...) et faisant du signal radio émis par une BTS un signal variable sur plusieurs échelles. Ces variations peuvent être décomposées comme suit : les variations à grande échelle et les variations à petite échelle.

1. Les variations à grande échelle

Il s'agit du "path loss" ou affaiblissement de parcours et du "shadowing" (effet de masquage) :

- "Path Loss" : c'est le rapport entre la puissance émise et celle reçue due à l'éloignement de l'émetteur par rapport au récepteur, c'est un phénomène macroscopique et déterministe ;
- "Shadowing" (effet de masquage ou variation lente) : phénomène plus local (échelle de la taille des obstacles), dû aux atténuations successives.

2. Les variations à petite échelle

Dans un environnement réel, le signal à transmettre emprunte lors de sa propagation le plus souvent plusieurs chemins en plus d'un possible trajet direct. Ces trajets sont en nombre variable, et en fonction de la nature de l'interaction (réflexion, diffraction, diffusion, transmission) avec un élément de l'environnement, subissent différents effets. Le signal reçu au niveau de l'antenne réceptrice correspond à une recombinaison de ces ondes, qui ont subi un affaiblissement et un changement de phase différents, et qui arrivent au récepteur avec un retard lié à la longueur du trajet de propagation. Ces multi-trajets peuvent provoquer une distorsion importante du signal reçu, et très souvent la transmission en environnement réel se fait avec les multi-trajets (NLOS pour "Non Line of Sight") car le trajet direct n'existe pas toujours (particulièrement en environnement urbain avec des émetteurs en hauteur). Ces trajets multiples génèrent des fluctuations rapides et à petite échelle du signal, il s'agit du "Fast-fading" ou "Small scale-fading" (évanouissement). Ce sont des variations rapides de l'amplitude du signal (recombinaison constructive ou destructive de plusieurs versions d'un signal présentant une atténuation et un retard de phase différents).

Ainsi, de la distinction de ces deux niveaux de variation, nous pouvons étudier l'exposition en s'intéressant à sa variabilité à petite échelle et à sa variabilité à grande échelle. [?] considère que la puissance moyenne locale reçue est obtenue en moyennant les variations à petite échelle à part et en conservant la partie variation à grande échelle à part. Le moyennage de ces variations à petite échelle permet d'avoir une valeur moyenne locale représentative de l'exposition et qui ne varie presque plus. La question qui se pose maintenant est comment moyenner pour avoir une moyenne locale assez représentative de l'exposition à un endroit donné ? Et sur quelle hypothèse scientifique faut-il se baser : statistique, déterministe, géospatiale ?

[?] s'est intéressé à cette question en cherchant à caractériser la dimension du support de moyennage et le nombre de points nécessaires pour avoir une bonne estimation de la moyenne locale en lissant les variations à petite échelle de manière optimale. Les variations à petite échelle sont représentées par une distribution de Rayleigh et, en considérant la moyenne des variations à grande échelle comme étant la puissance moyenne locale lorsque le terrain est plat. Sur hypothèse que le signal reçu est la combinaison des variations à grande échelle et des variations à petite échelle, la distance de moyennage est de 20 à 40 λ , et le nombre de points nécessaires à ce moyennage est de 36. Ces résultats font l'hypothèse que le mobile est en déplacement et sont indépendants du type de technologie et des bandes de fréquence.

[?] s'est également intéressé à cette question en étudiant l'impact de ces variations rapides sur l'estimation de la densité de puissance moyenne locale, en considérant cette fois-ci les distributions de Rayleigh, Rice et Nakagami-m. Il a montré que le paramètre important sur ces densités de puissance est le coefficient de variation, et a donné la relation entre l'erreur sur l'estimation de la densité de puissance moyenne locale et le nombre de points indépendants utilisés dans le processus de moyennage.

[?] a abordé la question avec une autre approche de la variabilité spatiale du champ électrique, à savoir la répétabilité des mesures et l'interpolation spatiale de l'évaluation de l'exposition, cette fois-ci, pour la radio-diffusion en ondes moyennes AM (modulation d'amplitude). [?] s'est concentré sur les moyennes ondes, car les ondes électromagnétiques de ces fréquences peuvent parcourir de longues distances (leur propagation se fait principalement par le biais des ondes terrestres et ionosphériques) et ont également des contributions relatives majeures à l'exposition totale, même encore loin de la source. Ce travail est basé sur la géostatistique, qui suppose que les variations d'une variable à étudier ne sont pas nécessairement aléatoires, mais peuvent posséder une certaine structure spatiale. Il étudie ainsi la dépendance spatiale du champ électrique généré par les ondes radio des émetteurs de radiodiffusion AM. Les ondes de radiodiffusion AM sont des ondes hectométriques, émises avec une forte puissance pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines de kilowatts. A cause de sa longueur d'onde, le signal peut parcourir quelques dizaines de kilomètres. Cette étude a montré pour ces émetteurs radio, une dépendance spatiale du champ électrique jusqu'à un rayon de 10km. Au delà de cette distance, la dépendance n'est plus significative. Il est impossible d'appliquer ce rayon dans notre étude, car les gammes de fréquence qui nous intéressent ont des longueurs d'ondes très inférieures (de l'ordre du décimètre).

4.3.1.2 Méthodologie

Variabilité spatiale et concept de zones d'exposition Le concept de zone d'exposition ?? (zone de visibilité) offre la possibilité d'avoir une autre vision du comportement spatial du champ électrique que celle abordée en ??. Cette segmentation permet de mieux isoler les phénomènes locaux, par l'identification des trajets directs, réfléchis et diffractés, qui sont à l'origine des variations à petites échelles. Ainsi la procédure de moyennage étudiée ici sera appliquée en fonction de la notion de zone. Cela permet d'avoir une simplification de l'étude en s'intéressant à un seul phénomène principal.

Approche considérée [?] a étudié la variation locale en un point en se basant sur des hypothèses statistiques et [?] avec de la géostatistique pour des émetteurs AM. Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la variabilité spatiale, mais cette fois-ci l'étude se basera sur des mesures et simulations avec des antennes réelles et à des longueurs d'ondes plus courtes (de l'ordre d'une dizaine de cm). Ainsi, sur la base des études précédentes, nous proposons ici deux approches pour analyser les variations du champ électrique :

- Une approche basée sur la géostatistique et le concept de zone afin de caractériser le comportement local du champ électrique,
- Une seconde approche basée sur la statistique et les zones d'exposition pour étudier le comportement global de l'exposition à l'échelle d'une ville.

4.3.2 Analyse de la variabilité locale du champ électrique

L'objectif de cette partie est de caractériser la variabilité spatiale locale dans les différentes zones de visibilité définies par les positions des antennes émettrice et réceptrice : nous cherchons à comprendre comment le champ varie sur les différentes zones de visibilité, et à partir de combien de fractions de λ cette variation devient significative. Nous répondrons à ces différentes questions à l'aide de la mesure de l'autocorrélation spatiale.

L'autocorrélation spatiale est un concept fondamental dans l'étude des données spatiales et a fait l'objet d'une littérature abondante [?, ?]. La notion d'autocorrélation spatiale mesure essentiellement le degré de ressemblance entre observations voisines et est, conséquemment, analogue à celle d'autocorrélation appliquée aux séries temporelles. Elle est mise en évidence à l'aide d'indices qui prennent en compte deux critères : la proximité spatiale et la ressemblance ou la dissemblance des valeurs de la variable d'étude. Les indices les plus utilisés sont l'indice de Moran et l'indice de Geary. Dans la littérature, l'indice de Moran est souvent préféré à celui de Geary en raison d'une meilleure stabilité [?]. Ces indices sont largement utilisés en géostatistique, statistique et dans les systèmes d'information géographique, ce qui a permis leur développement et leur utilisation par la communauté scientifique.

Ils peuvent aussi être appliqués à des problèmes 3D, par exemple en traitement d'image [?] ou dans le domaine médical [?]. La distance a été choisie comme critère d'interaction spatiale (ou critère de voisinage) car elle s'interprète facilement par la définition d'un rayon autour d'un point. La variable à étudier est le champ électrique et chaque point est représenté par ses coordonnées spatiales (x,y,z) et sa valeur de champ électrique.

4.3.2.1 Définition mathématique des indices de Moran

Pour une zone d'étude donnée avec un ensemble d'éléments de coordonnées spatiales (x,y,z), les indices de Moran peuvent s'utiliser de deux manières : par une analyse des relations locales entre les éléments de la zone appelée, à l'aide de l'indice local noté I_i , ou par une analyse de l'autocorrélation globale de tous les éléments de la zone à l'aide de l'indice global noté I . Ces deux indices se définissent ainsi :

1. Indice global : I

L'indice de Moran global se définit comme étant le ratio de la covariance entre deux observations, pondéré par une mesure d'éloignement entre observations, et la variance totale de l'ensemble des données (??).

$$I = \frac{N \sum_i \sum_j W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{(\sum_i \sum_j W_{ij}) \sum_i (X_i - \bar{X})^2} \quad (4.8)$$

Pour $i \neq j$ où i représente l'indice de référence et j l'indice voisin de i . N est le nombre total de points de réception dans l'échantillon, X_i la valeur du champ électrique au point i , X_j la valeur du champ électrique au point j , W_{ij} un poids appliqué à la comparaison entre les deux localisations. On utilise pour ce dernier la distance entre deux localisations, soit $W_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$ avec d_{ij} la distance entre les récepteurs i et j . $\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N}$ est la moyenne globale des échantillons. Les mesures des I permettent d'estimer si, globalement, l'ensemble des points appartenant à une zone d'étude présente une dépendance spatiale.

2. Indice local : I_i

$$I_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S_x^2} \sum_j (W_{ij}(X_j - \bar{X})) \quad (4.9)$$

Avec $S_x^2 = \sum (X_i - \bar{X})^2$ qui représente la variance globale, X_i la valeur du champ électrique au point i , $\bar{X}$ la moyenne globale, X_j la valeur du champ électrique au point j , $j \neq i$.

Les mesures de I_i décomposent I de façon à identifier la contribution individuelle de chaque point. Ils mesurent successivement pour chacun la dépendance / association spatiale entre la valeur du champ électrique prise au point i et l'ensemble de celles prises dans son voisinage. I , indice global défini dans l'équation (??), et les I_i sont liés par la relation suivante : $\sum_{i=1}^N I_i = S_0 I$ avec $S_0 = \sum_i \sum_j W_{ij}$.

I , de même que I_i varient généralement entre -1 et 1. Plus les points à proximité ont des valeurs similaires, plus l'indice est élevé. Des valeurs positives et fortes indiquent une autocorrélation spatiale positive (les voisins ont des valeurs semblables). Des valeurs négatives et fortes indiquent une autocorrélation spatiale négative (dispersion parfaite entre les voisins) et des valeurs proches de 0 indiquent une absence d'autocorrélation (modèle spatial parfaitement aléatoire). Cependant, il est difficile d'interpréter brutalement les résultats des indices calculés précédemment : à partir de quelle valeur de I peut-on considérer qu'il est fort, faible ou proche de zéro ? C'est à partir de là qu'intervient le test d'hypothèse statistique qui permet de conclure sur une dépendance spatiale ou non des données.

4.3.2.2 Indice de Moran et test de significativité statistique

La significativité statistique des indices de Moran calculés à l'aide des équations (??) et (??) est appréciée par le biais d'un test d'hypothèse de normalité qui compare la distribution empirique de I à une distribution normale Z . Ainsi la pertinence de l'indice de Moran est mesurée en s'intéressant à sa valeur théorique notée Z_I qui dépend d'une moyenne et d'une variance théoriques. Les auteurs [?] ont montré, sous l'hypothèse d'indépendance (hypothèse nulle), que la moyenne théorique de l'indice de Moran I est calculée selon l'équation (??).

$$E(I) = \frac{-1}{N-1} \quad (4.10)$$

La valeur théorique de I notée Z_I se calcule elle selon l'équation (??).

$$Z_I = \frac{I - E(I)}{\sqrt{V(I)}} \quad (4.11)$$

Pour tester la pertinence de Z_I , le calcul de l'espérance et la variance de l'indice a été proposé par Anselin (1995). L'expression de la variance de I dépend essentiellement des poids de pondération W_{ij} et son calcul a été proposé par [?]. Ensuite, on suppose que Z_I suit une distribution normale (moyenne égale à zéro et variance égale à 1). La significativité statistique des indices de Moran est estimée en considérant Z_I et sa probabilité dans la table d'une distribution normale standard. L'interprétation est la suivante : une valeur Z_I positive avec une probabilité faible indique une autocorrélation spatiale positive. Une valeur Z_I négative avec une probabilité faible montre qu'il existe une autocorrélation spatiale négative. Nous pouvons nous demander : quelle valeur de probabilité est faible ? Pour cela une illustration tirée de <http://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.3/tools/spatial-statistics-toolbox/spatial-autocorrelation.htm> est présentée sur la figure ???. Les Z_I très élevés ou très bas (négatifs), associés à des valeurs de P très petites (inférieure à 0,10), figurent dans les extrémités de la distribution normale (voir figure ??). Les valeurs significatives signifient que la probabilité que l'hypothèse nulle (la probabilité que les données soient indépendantes) se réalise est faible.

Il est important de noter que le test de significativité statistique s'applique aussi aux indices de Moran locaux I_i .

Sachant que l'hypothèse posée est soumise à une condition de normalité, la vérification de cette dernière constitue un élément essentiel pour mener à bien cette étude et tirer des conclusions pertinentes. La réalisation de cette étape se fait à l'aide d'un test de normalité que nous présentons dans la partie suivante.

Test de normalité En statistique, les tests de normalité permettent de vérifier si des données suivent une loi normale ou non. Il existe plusieurs tests de normalité dans la littérature. Nous utilisons dans notre cas le test de Shapiro-Wilk, considéré comme le test de normalité le plus fiable et le plus performant [?, ?] pour un nombre d'échantillons inférieur ou égal à 50. Ce test a été conçu par Samuel Shapiro et Martin Wilk en 1965, en vue d'évaluer le caractère gaussien ou non de l'échantillon. Le test est défini selon l'équation (??).

$$W = \frac{\left[\sum_{i=1}^{\left[\frac{n}{2} \right]} a_i (x_{n-i+1} + x_i) \right]^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.12)$$

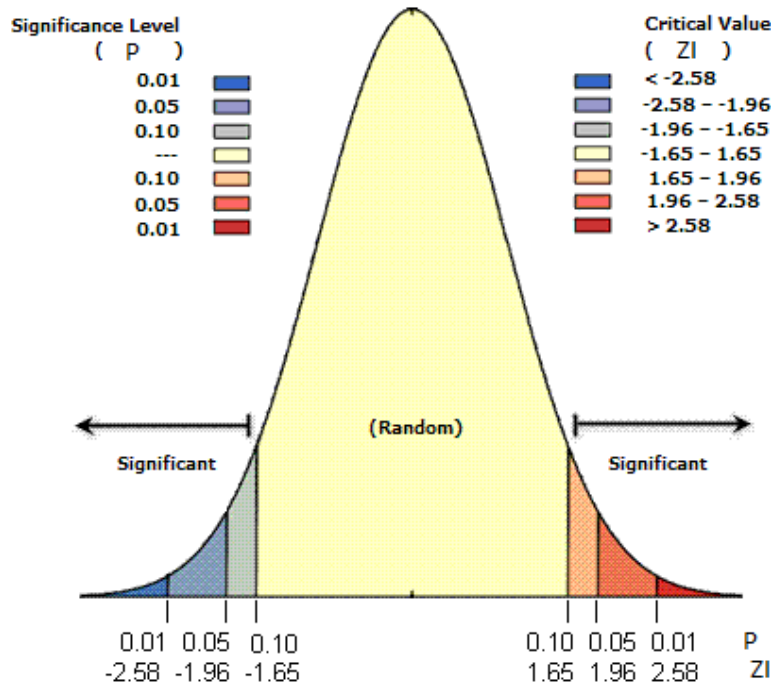


FIGURE 4.6 – Table de correspondance des Z_I et des P

Où x_i correspond à la série des données triées de manière croissante, $[n/2]$ est la partie entière du rapport $n/2$, les a_i sont des constantes générées à partir de la moyenne et de la matrice de variance co-variance des quantiles d'un échantillon de taille n suivant la loi normale. Ces constantes sont fournies dans des tables spécifiques. De nos jours, il existe plusieurs logiciels qui permettent de faire des tests de Shapiro-Wilk pour éviter la lecture des tables de Shapiro-Wilk. Dans notre cas nous utilisons le logiciel R (logiciel libre de traitement des données et d'analyse statistiques) qui, en fonction de l'échantillon donné, donne une valeur de W et la probabilité p – *value* associée. Le test se base sur l'hypothèse nulle : les données suivent une distribution normale. On cherche à partir des résultats de W et de p – *value* à accepter ou rejeter l'hypothèse nulle en fonction d'un seuil d'acceptation. Par exemple, si on se fixe un seuil à 0,1 %, cela signifie qu'on accepte de se tromper dans 1 cas sur 1000 si on affirme que la distribution suit une loi normale. L'interprétation des résultats en fonction des p – *value* est la suivante :

- Si p – *value* > seuil d'acceptation : on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle,
- Si p – *value* < seuil d'acceptation : l'hypothèse nulle est rejetée.

4.3.2.3 Analyse de la variabilité locale du champ électrique simulé en fonction des zones de visibilité

Présentation des données d'étude Nous nous intéressons à la variation spatiale du champ en un point de réception situé dans trois zones de visibilité. Dans chacune de ces zones nous avons un récepteur situé à 1,5 m du sol qui reçoit un champ provenant d'un émetteur GSM dont la longueur d'onde est de 0,16 m. Nous cherchons à comprendre comment le champ varie autour de ce point de réception en prenant en compte tous les voisins situés autour du point de réception dans un espace délimité par une sphère, comme illustré dans la figure ??.

Résultats et discussions

A) Convergence

Pour fixer le nombre de voisins à prendre en compte dans chaque zone de visibilité, nous avons fait varier le nombre de points à l'intérieur de la sphère, pour plusieurs rayons de sphère. L'objectif est d'avoir un nombre de points suffisants pour que l'indice ait convergé. Dans la figure ??, nous avons l'exemple de la courbe de variation de I , calculé à l'aide de l'équation (??), en fonction du nombre de points pour tous les rayons considérés en $Z_{\text{diffractions}}$. Les rayons de sphère considérés sont compris entre $\frac{\lambda}{5}$ et 7λ .

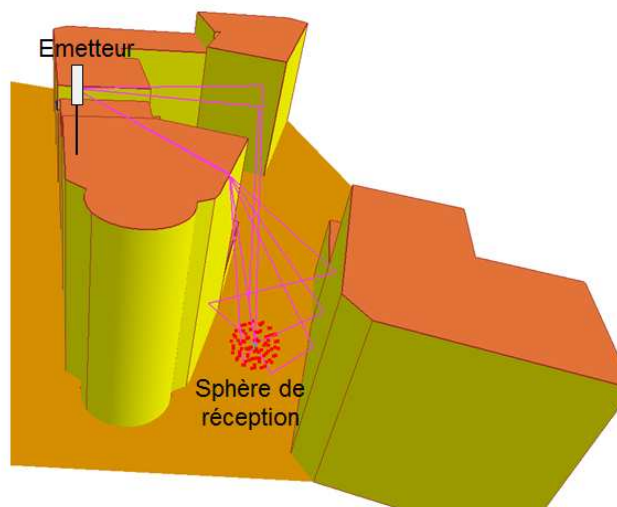


FIGURE 4.7 – Exemple de sphère de réception en $Z_{\text{réflexions}}$

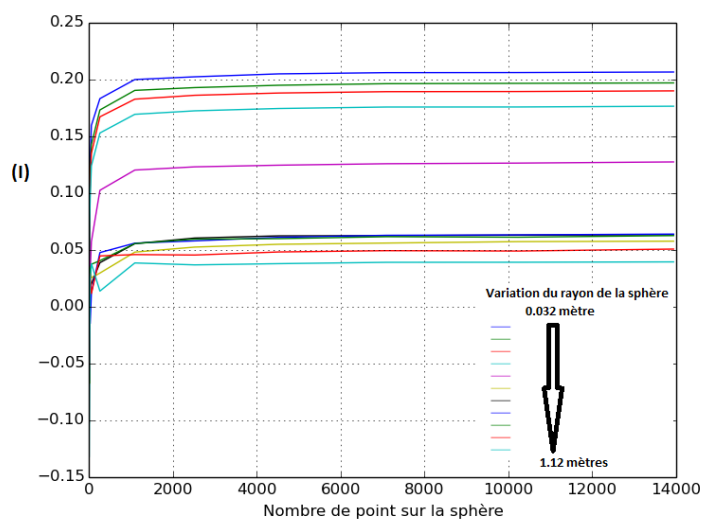


FIGURE 4.8 – Variation de I en fonction du nombre de points en $Z_{\text{diffractions}}$

L'analyse de la courbe de I en fonction du nombre de points (??) montre une croissance de I en fonction du nombre de points, jusqu'à un certain niveau, et devient ensuite relativement constante. Ce comportement se reproduit sur tous les rayons de sphère considérés et pour toutes les zones de visibilité (?? pour Z_{direct} et $Z_{\text{réflexions}}$). Ainsi, pour connaître le nombre de points nécessaires pour que l'indice ait convergé, nous avons étudié la variation en % pour chaque couple de points des courbes de I en fonction du nombre de points à l'aide de l'équation (??). Nous fixons ainsi le nombre de voisins à 1000, et ce quel que soit le rayon de la sphère et la zone, avec un pourcentage de variation de la courbe de l'évolution de I en fonction du nombre de points de l'ordre de 10^{-6} % pour tous les rayons considérés.

$$A[i] = \frac{I[i+1] - I[i]}{nb[i+1] - nb[i]} \quad (4.13)$$

avec $nb[N]$ le vecteur contenant le nombre de points pour chaque rayon et $I[N]$ le vecteur des indices I pour les $nb[N]$ points, N prenant 11 valeurs différentes, correspondant à des fractions de λ .

B) Rayon d'autocorrélation

Dans notre étude, après avoir fixé le nombre de voisins, nous avons analysé l'influence du rayon R de la sphère sur la variation spatiale du champ.

Pour cela nous déterminons, pour un nombre de voisin fixé à 1000, les Z_I à l'aide de l'équation (??) sur une zone allant jusqu'à 7λ de rayon autour du point considéré. Ensuite, le test de normalité de Shapiro-Wilk défini par l'équation (??) est appliqué à la distribution des Z_I . Ainsi, avec un seuil d'acceptation fixé à 0,1%, nous pouvons dire que les Z_I sont distribués normalement sur les trois zones avec les p - *values* suivantes : 0,05826 en Z_{direct} , 0,002604 en $Z_{\text{réflexions}}$, 0,008234 en $Z_{\text{diffractions}}$. Enfin, la significativité des Z_I est déterminée en recherchant leurs probabilités P dans la table d'une distribution normale standard. Le tableau ?? montre les valeurs de Z_I avec les P correspondants, en fonction du rayon de la sphère, et sur les 3 zones de visibilité.

R en fraction de λ	Z_{direct}		$Z_{\text{réflexions}}$		$Z_{\text{diffractions}}$	
	Z_I	P	Z_I	P	Z_I	P
$\frac{1}{5}$	92,85	0	99,68	0	101,18	0
$\frac{1}{4}$	87,92	0	96,57	0	96,38	0
$\frac{1}{3}$	80,79	0	28,75	0	92,48	0
$\frac{1}{2}$	69,39	0	64,49	0	85,77	0
1	57,69	0	89,91	0	61,06	0
2	41,48	0	101,02	0	24,69	0
3	14,17	0	104,50	0	28,45	0
4	5,18	0	107,11	0	28,67	0
5	1,65	0,102	109,08	0	28,49	0
6	-0,19	0,39	110,30	0	23,60	0
7	-1,30	0,17	111,34	0	19,89	0

TABLE 4.4 – Dépendance spatiale du champ en fonction du rayon

L'analyse du tableau ?? montre un comportement similaire entre $Z_{\text{réflexions}}$ et $Z_{\text{diffractions}}$ et un comportement différent pour Z_{direct} . La dépendance spatiale du champ pour un nombre de voisins fixé s'observe dans les zones situées autour de 4λ pour un point de réception en Z_{direct} . Cependant pour $Z_{\text{diffractions}}$ et $Z_{\text{réflexions}}$, cette dépendance est plus vaste : il y a une autocorrélation spatiale positive sur toute la zone étudiée. Cela signifie que les valeurs de champ sont très proches sur des récepteurs situés en $Z_{\text{réflexions}}$ et $Z_{\text{diffractions}}$. Ceci montre encore une fois que Z_{direct} présente la plus grande variabilité, sur les deux autres, le champ électrique est moins influencé par les variations spatiales. Ces résultats ont été reproduits sur d'autres points avec la même antenne et la même scène et ont abouti aux mêmes conclusions ⁵.

4.3.2.4 Validation de l'analyse locale par mesure

La première analyse avec I a permis de caractériser la variabilité locale dans les différentes zones de visibilité en simulation. Ici nous allons vérifier ces résultats en mesure. Les données qui sont utilisées sont les mesures sur plaque présentées dans le chapitre ?. Nous rappelons que la plaque était constituée de 36 trous et que la

5. Une première étude dans [?, ?] sur des points différents de ceux choisis ici avait tiré les mêmes conclusions à l'exception de $Z_{\text{réflexions}}$. [?, ?] avait démontré une dépendance spatiale sur 4λ en $Z_{\text{réflexions}}$ contrairement aux conclusions de ce chapitre où le champ est homogène dans cette zone. Cette différence est due à la présence de quelques points hors zones qui avaient été jugés négligeables pour influencer les résultats. En choisissant un point où il n'existe pas à ses alentours un quelconque point qui n'appartient pas à $Z_{\text{réflexions}}$ les 4λ trouvés dans [?, ?] peuvent être élargis à toute la zone d'étude.

distance entre deux trous correspond à une longueur d'onde sur une ligne et une colonne (voir figure ??). Pour chaque zone de visibilité, nous avons 3 plaques (3×36 trous) correspondant à 108 points de mesure (voir figure ??). La simulation permet d'obtenir des éléments séparés par des distances très faibles (millièmes de mètres) ce qui est impossible en mesures. Ici la plus petite distance entre les éléments est de λ . De ce fait nous utilisons les indices locaux I_i pour analyser la dépendance de chaque élément de la plaque par rapport au point milieu pour pouvoir estimer le rayon de dépendance par rapport au milieu de la plaque. **Une analyse de I_i du point milieu par rapport aux autres points de la plaque a été effectuée à l'aide du diagramme de Moran.** Cette méthodologie est tirée de [?] et permet de représenter sous forme de nuage de points la relation entre l'indice local I_i et la distance par rapport au centre de la plaque. Cette projection selon la distance au centre est très fréquente dans l'étude des phénomènes urbains.

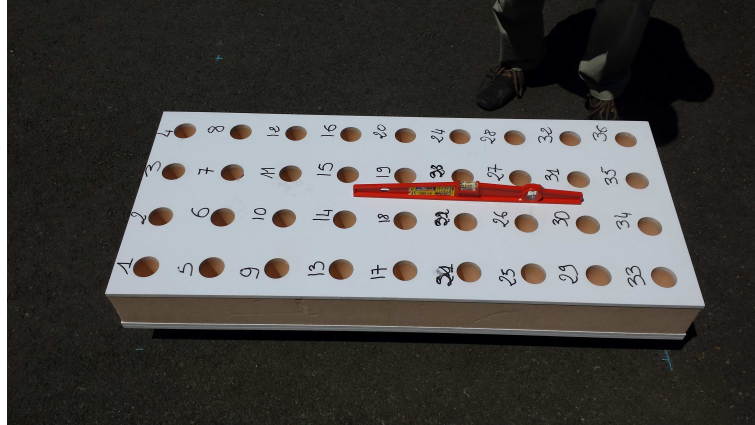


FIGURE 4.9 – Plaque pour l'étude de la variabilité spatiale locale du champ électrique

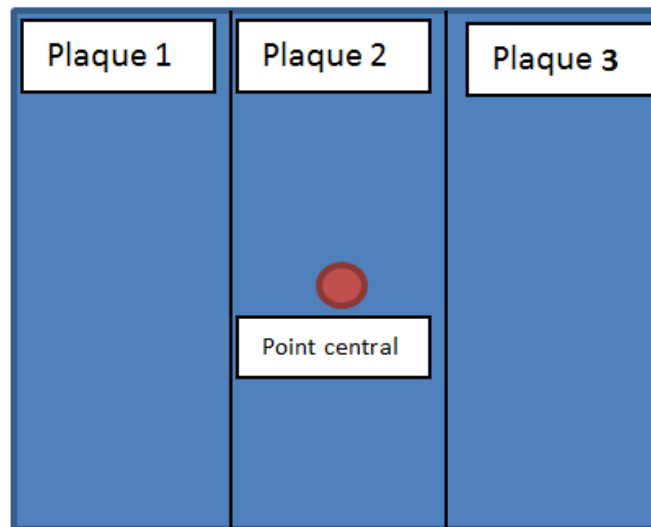


FIGURE 4.10 – Schéma illustrant les 3 plaques aboutées pour l'étude de la variabilité en mesure

Les figures ?? et ?? montrent que les données sont regroupées autour du point central avec une autocorrélation significative (il n'existe pas de $Z(I_i)$ dans l'intervalle $[-1,65 - +1,65]$, qui constitue la zone des $Z(I_i)$ non significatives selon la loi normale, cf.??) pour les 108 points analysés. Autrement dit, le champ électrique est homogène sur $Z_{\text{réflexions}}$ et sur $Z_{\text{diffractions}}$. Cela confirme les résultats des simulations. En revanche en Z_{direct} (cf.??), le rayon de dépendance de 4λ trouvé en simulation s'élargit sur toute la zone étudiée dans les mesures. Cette différence peut s'expliquer par le fait que l'antenne utilisée pour ces mesures est une antenne dipole omnidirectionnelle, alors qu'en simulation nous avons utilisé une antenne GSM réelle, avec un diagramme de directivités présentant des variations importantes autour de la direction principale.

4.3.3 Étude de la variabilité globale du champ électrique

L'objectif de cette partie est d'analyser le comportement global du champ électrique à l'échelle d'une ville en cherchant à identifier la loi statistique qui traduit efficacement ce comportement dans les zones de visibilité.

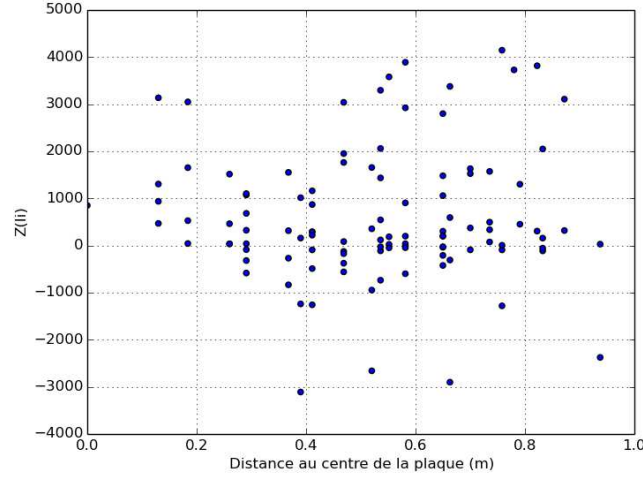


FIGURE 4.11 – Distribution des $Z(I_i)$ en fonction de la distance au centre de la plaque en Z_{direct}

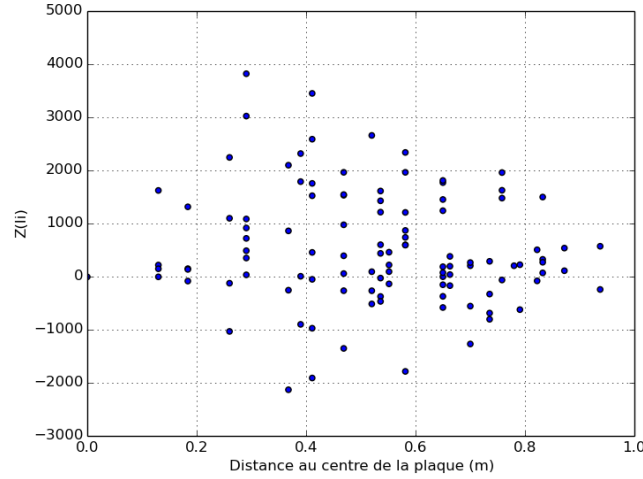


FIGURE 4.12 – Distribution des $Z(I_i)$ en fonction de la distance au centre de la plaque en $Z_{\text{reflexions}}$

Cela se fait à travers des données d'exposition simulées sur plusieurs villes de France.

4.3.3.1 Analyse de la variabilité globale en simulation et mesure

Description des données de simulation Pour mener cette étude nous avons retenu les données de simulation d'exposition aux ondes électromagnétiques des villes de Paris XV^{ème} et Saint-Mandé et pour la recherche de loi statistique et celles des villes de Paris XIV^{ème} et Cannes pour le test et la validation des lois retenues. Sur chacune de ces villes, nous disposons des CDF (Cumulative Distribution Function) du champ électrique sur les zones de visibilité décrites dans le chapitre ?? ainsi que la CDF représentant l'exposition globale toutes zones confondues (noté Tout). Le champ électrique est calculé sur les façades des bâtiments et à 1,5 m du sol dans une zone délimitée (2 km × 2 km). Les services qui sont pris en compte sont les technologies GSM 900, GSM 1800 et l'UMTS 2100. Un exemple de carte d'exposition au sol à l'échelle d'une ville est visible sur la figure ??.

Méthodologie L'approche qui est utilisée ici est l'identification de lois statistiques qui traduisent efficacement le comportement du champ électrique sur les 3 zones de visibilité. Sachant que plusieurs lois peuvent traduire une même variable, nous utilisons un outil dont le principe est basé sur les critères d'information, développé par le laboratoire XLIM-SIC de l'université de Poitiers [?, ?] afin de sélectionner la loi la plus adéquate parmi une dizaine de lois. Cette approche est définie par l'équation (??)

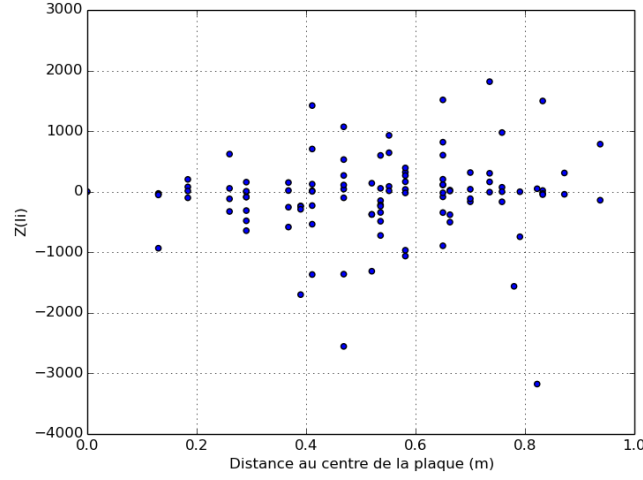


FIGURE 4.13 – Distribution des $Z(I_i)$ en fonction de la distance au centre de la plaque en $Z_{\text{diffractions}}$

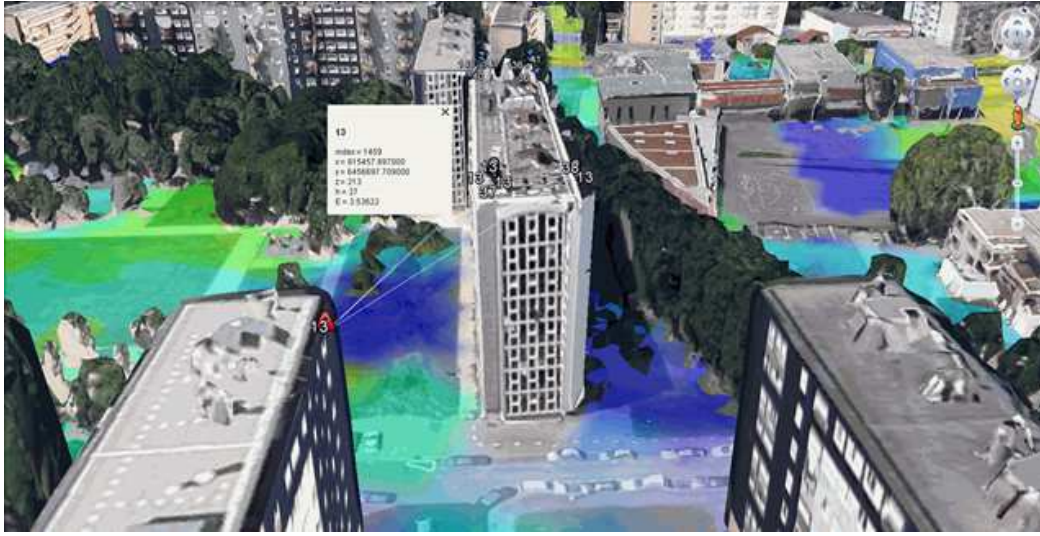


FIGURE 4.14 – Carte de simulation d'exposition au sol à l'échelle d'une ville

$$IC(l) = -2 \sum_{i=1}^N \log(f_i) + kC(N) \quad (4.14)$$

où le premier terme $IC(l)$ est l'estimateur de maximum de vraisemblance, l est l'indice de la loi candidate, k le nombre de paramètres de la loi et $kC(N)$ est la pénalité qui diffère selon le critère choisi. Ici la pénalité qui est utilisée est φ_β qui est traduite par l'équation (??) :

$$\varphi_\beta = kN^\beta \log(\log(N)) \quad (4.15)$$

Avec $0 < \beta < 1$. Ainsi la loi qui traduit au mieux les données simulées est celle qui minimise ce critère.

Résultats et discussion L'ensemble des lois candidates sont les suivantes : Laplace notée “Lap”, Gamma (Gam), Nakagami (Nak), Normale (Nor), Extreme value (Ev), Weibull (Wei), Lognormale (Log) et enfin Extreme Value Generalized (EGV) (voir annexe ?? pour la description de ces lois). Pour chaque loi nous avons la valeur du critère IC au sol et en façade des villes étudiées. La valeur du critère étant parfois très proche entre les lois, nous mettons en évidence les 3 meilleures lois qui représentent le mieux la simulation de l'exposition en façade et au sol. Nous présentons dans les paragraphes suivants la loi retenue ainsi que ses paramètres sur les différentes villes et zones étudiées.

A) **Loi retenue :**

Le test du maximum de vraisemblance sur l'ensemble des lois candidates montre que le comportement global et par zone d'exposition du champ dans les villes étudiées suit la loi EGV. Les tableaux de la valeur des ICs obtenus pour toutes les lois candidates sont représentés en annexe ??, pour toutes zones confondues sur la figure ??, en Z_{direct} sur la figure ??, en $Z_{\text{réflexions}}$ sur la figure ?? et en $Z_{\text{diffractions}}$ sur la figure ??. En résumé nous pouvons dire que le champ électrique à l'échelle d'une ville peut être caractérisé par la loi EGV.

B) **Analyse des paramètres de la loi retenue :**

La CDF de la loi EGV est décrite par l'équation (??).

$$F(\mu, \sigma, \Xi) = \exp \left\{ \left[1 + \Xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right] \right\}^{\frac{-1}{\Xi}} \quad (4.16)$$

Les paramètres de la loi EGV sont analysés dans le tableau ??.

Ville	Façade	Sol
Tout		
Saint-Mandé	-0,23 ; 10 ; 39	0,06 ; 7 ; 35,02
Paris XV ^{ème}	-0,12 ; 9,61 ; 30	0,099 ; 6,18 ; 14,4
Z_{direct}		
Saint-Mandé	-0,11 ; 6,80 ; 29	0,06 ; 7 ; 35,022
Paris XV ^{ème}	-0,10 ; 6,31 ; 24	0,099 ; 6,18 ; 14,4

TABLE 4.5 – Paramètre de la loi EGV (μ, σ, Ξ) en fonction des villes, en façade et au sol

Test de loi EGV

A) Validation mathématique sur d'autres villes

L'analyse des données de simulation sur les villes de Saint-Mandé et Paris XV^{ème} a montré que le champ à l'échelle d'une ville peut être estimé par la loi EGV. Dans cette partie nous validons ces résultats à travers une comparaison des CDF des données simulées de la ville de Cannes et de Paris XIV^{ème} à celle de la loi EGV en utilisant les moyennes des paramètres des villes de test obtenus dans le tableau ??. Des exemples de courbes de comparaisons des CDF simulées et calculées sur les villes de Paris XIV^{ème} et de Cannes sont représentées sur les figures ?? pour Z_{direct} , ?? pour $Z_{\text{réflexions}}$ et ?? pour $Z_{\text{diffractions}}$.

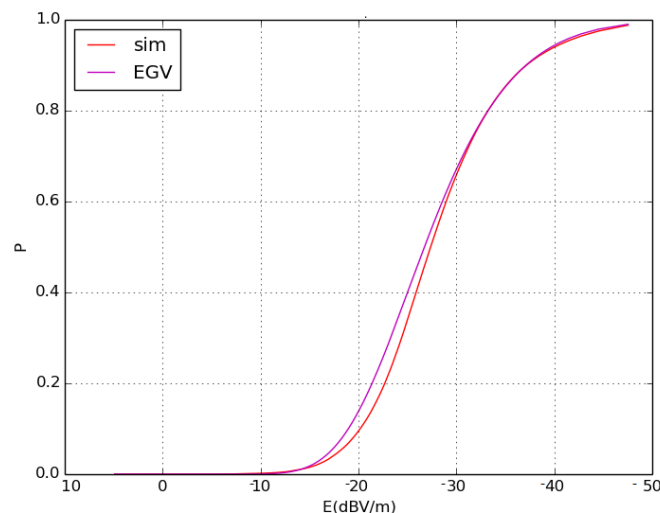


FIGURE 4.15 – Comparaison CDF obtenue par simulation et CDF calculée en Z_{direct} , Paris XIV^{ème}, façade

Les courbes ci-dessus montrent que les lois retenues ainsi que leurs paramètres permettent bien de simuler le comportement du champ à l'échelle d'une ville.

B) Validation par les mesures

Les lois trouvées ont été testées sur les mesures réelles décrites dans le chapitre ??. Nous rappelons que ces

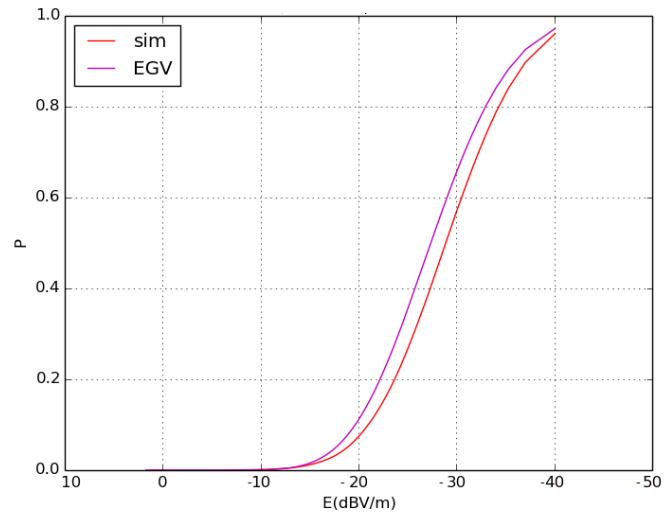


FIGURE 4.16 – Comparaison CDF obtenue par simulation et CDF calculée en $Z_{\text{réflexions}}$, Paris XIV^{ème}, façade

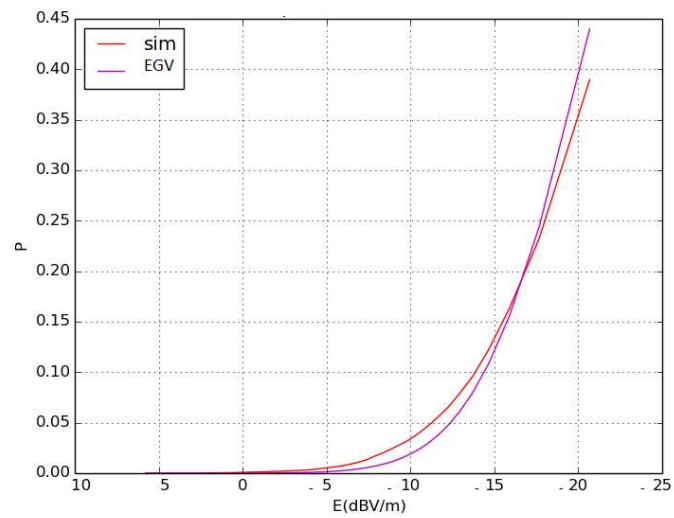


FIGURE 4.17 – Comparaison CDF obtenue par simulation et CDF calculée en $Z_{\text{diffractions}}$, Cannes, au sol

mesures ont été effectuées avec une antenne omnidirectionnelle à la fréquence de 2,3GHz sur 7859 points répartis sur la zone de l'IUT de Poitiers. En appliquant le critère du maximum de vraisemblance sur ces données, la loi EGV ressort parmi les 3 premières lois avec des valeurs du critère très proches pour ces 3 lois. Les paramètres diffèrent car là il s'agit d'une seule antenne, alors que pour les données simulées nous avons plusieurs antennes réelles dans les villes étudiées.

4.3.4 Synthèse

Cette section a été consacrée à la caractérisation de la variabilité spatiale locale de l'exposition en un point donné, et à grande échelle dans les zones de visibilité. L'analyse de la variabilité locale par une étude de l'autocorrélation spatiale du champ électrique a montré que le champ électrique en $Z_{\text{réflexions}}$ et $Z_{\text{diffractions}}$ avait le même comportement et était homogène sur toute la zone considérée (rayon de corrélation autour de 7λ) en mesures et simulations. Cela signifie qu'on peut considérer sur ces deux zones d'exposition un seul point de mesure ou de simulation pour représenter l'ensemble des points de la zone. Quant à la Z_{direct} , les simulations montrent une dépendance de 4λ et les mesures donnent une dépendance sur toute la zone. Cette zone étant apparemment la zone la plus influencée par les variations temporelles et spatiales, l'échantillonnage utilisé en simulation (millièmes de mètre) permettrait de mieux détecter les dépendances entre les éléments par rapport à celui utilisé dans les mesures dont la distance la plus petite entre les éléments est de λ .

L'analyse de la variabilité de l'exposition à grande échelle a montré que le champ électrique à l'échelle d'une ville peut être caractérisé par la loi EGV [?, ?].

4.4 Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif d'étudier l'impact des zones de visibilité sur la caractérisation de l'exposition. Pour traiter cette question, nous nous sommes intéressés au moyennage temporel et spatial du champ électrique pour étudier sa variation locale. Ces deux aspects sont importants pour la caractérisation de l'exposition, car le champ électrique est une grandeur très variable localement, ce qui rajoute une complexité sur la caractérisation de l'exposition. Son comportement à l'échelle globale est aussi étudié. Les résultats qui découlent de l'ensemble de ces études se résument en ces différents points :

- a) la zone de visibilité impacte sur la quantification de l'exposition individuelle réelle,
- b) ces trois zones d'exposition peuvent se résumer en deux pour l'étude de l'exposition : zone d'exposition directe (Z_{direct}) et zone d'exposition indirecte ($Z_{\text{réflexions}}$ et $Z_{\text{diffractions}}$),
- c) le profil (jour ou soir) doit être pris en compte dans le calcul du champ électrique moyen dans la zone d'exposition directe,
- d) sur la base des études COPIC[?], la durée de moyennage des 6mn préconisées par les normes réglementaires peut être ramenée à 1mn,
- e) pour des objectifs de variations inférieures à 30%, la durée de moyennage dépasse celle du protocole, l'instabilité du signal LTE et UMTS fait que ces signaux doivent être traités avec soins en zone de visibilité directe, quant à la technologie GSM sa durée de stabilité temporelle reste toujours inférieure à celle du protocole,
- f) le champ électrique en un point donné peut être représenté par une zone autour de 4λ pour une meilleure quantification de l'exposition et s'affranchir des effets de variabilité locale lorsque le point est en zone de visibilité directe,
- g) l'ensemble des points se trouvant en zone masquée peut être représenté par un seul point,
- h) une manière de mieux quantifier l'exposition est de considérer des indicateurs qui intègrent la zone de visibilité directe (Z_{direct}) et la zone de non visibilité ($Z_{\text{réflexions}}$ et $Z_{\text{diffractions}}$),
- i) une manière d'étudier l'exposition à grande échelle à moindre coût est d'utiliser la loi EGV, en calant ses paramètres à l'aide de simulations sur un sous-échantillonnage de la zone d'intérêt.

Cependant il faut noter que ces conclusions ont été tirées sur un faible échantillon de mesures et des simulations. Celles tirées sur la variabilité temporelle restent faibles car, quelle que soit les données mesurées, les technologies nouvelles sont généralement plus variables temporellement que les technologies anciennes à cause de la diversité des usages et des services de la téléphonie mobile.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Afin d'apporter des éléments de réponses aux problématiques actuelles concernant l'exposition aux ondes électromagnétiques, nous avons orienté nos recherches sur deux grands thèmes : l'utilisation conjointe de mesures et de simulations, et l'exploitation de la notion de zone d'exposition (zone de visibilité). Ces deux thèmes sont traités dans cette thèse à travers quatre chapitres : la modélisation de l'exposition, la mesure de l'exposition et les critères utilisés pour les comparaisons, l'analyse conjointe des mesures et des simulations, l'analyse de la variabilité du champ électrique. Le travail effectué sur chacune de ces parties a permis d'enrichir les connaissances sur la caractérisation de l'exposition réelle. Le bilan tiré de l'ensemble des aspects étudiés ainsi que les perspectives de cette thèse sont présentés dans cette partie.

Chapitre 1 : Modélisation de l'exposition

Ce chapitre présente les méthodes de modélisation existantes en analysant leurs avantages et leurs inconvénients par rapport à l'étude de l'exposition à l'échelle urbaine. Les méthodes de modélisation peuvent être classées en trois catégories : les méthodes rigoureuses, les méthodes statistiques et les méthodes asymptotiques. Compte tenu du volume des zones de calcul en environnement urbain (quartier, ville) et de la variabilité des configurations d'exposition, les deux premières ne sont pas adaptées à l'étude de l'exposition à grande échelle. Cette première étape a motivé le choix du modèle de calcul utilisé pour la prédiction de l'exposition en environnement urbain. Il est basé sur l'optique géométrique et la théorie uniforme de la diffraction, et présente l'avantage de pouvoir analyser les contributions relatives des trajets. Cela permet ainsi d'exploiter la notion de zone d'exposition pour une meilleure quantification de l'exposition réelle. Son implémentation dans un système d'information géographique a permis de mettre en place un logiciel dédié à la cartographie de l'exposition qui est un véritable vecteur de communication et de concertation entre les acteurs interpellés par la question de l'exposition aux ondes électromagnétiques.

Chapitre 2 : Mesure et critère de comparaison avec la simulation

Ce chapitre introduit les problématiques liées à la mesure de l'exposition réelle. Pour assurer le respect des directives et des normes, des mesures doivent être utilisées. Cependant les normes ne précisent pas toujours comment effectuer ces mesures. L'ANFR a mis en place un protocole réglementaire permettant de vérifier les valeurs limites. Or, ces valeurs sont surestimées et ne peuvent pas être utilisées directement pour caractériser l'exposition réelle. Des mesures du champ électrique réel ont été utilisées pour étudier l'exposition, elles ont été toutes présentées dans ce chapitre. Ce chapitre aborde également l'importance du critère de comparaison entre mesures et simulations sur la caractérisation de l'exposition, ceci dans le but de pouvoir exploiter mutuellement les mesures et les simulations pour une meilleure caractérisation de l'exposition. Vu la variabilité des situations d'exposition que l'on peut être amené à étudier, il est impossible de pouvoir traiter l'ensemble des comparaisons avec un seul indicateur. A partir de l'état de l'art sur les critères de comparaison entre mesures et simulations, trois fonctions « objectif » basées sur la corrélation de Spearman, de Pearson et l'erreur quadratique moyenne ont été définies dans le but de mieux exploiter les données de mesures et de simulations pour la caractérisation de l'exposition.

Chapitre 3 : Analyse conjointe mesures-modélisations

Il a été montré que dans le cadre de l'étude de l'exposition à grande échelle, pour une meilleure caractérisation de l'exposition, les mesures et les simulations doivent se compléter. Ceci dans le but de réduire les coûts de mesures et d'étudier l'exposition même dans des endroits difficiles à atteindre en mesure (façades, ...). Ainsi, la question qui est posée dans ce chapitre est comment explorer mutuellement mesures et simulations pour quantifier l'exposition réelle? En ce sens, une caractérisation de l'impact des paramètres du modèle de calcul a été effectuée, suivie d'une analyse de l'influence des données d'entrée du modèle, et enfin l'incertitude liée à la position de mesure a été évaluée. Toutes ces études se sont basées sur les critères définis dans le chapitre 2. Les résultats de cette partie ont permis de caractériser l'incertitude globale de la méthode de calcul et de connaître son degré de validité par rapport aux modèles existants. Ces résultats sont conformes à ceux trouvés dans la littérature. Les paramètres les plus importants dans ce modèle sont le nombre de réflexions sur les façades verticales et la prise en compte précise de la diffraction. Les matériaux du sol n'influent pas sur le modèle, par contre ceux des bâtiments doivent être bien pris en compte pour une meilleure optimisation. Le rayon d'incertitude du système de géolocalisation utilisé par l'appareil de mesure doit être évalué avec précision pour améliorer la comparaison entre mesures et simulations. Les efforts sur la modélisation de la végétation et du modèle géométrique nécessitent d'être poursuivis pour une meilleure prise en compte de la modélisation dans l'étude de l'exposition.

Chapitre 4 : Analyse de la variabilité de l'exposition

Vu l'importance de la zone de propagation (champ proche, champ lointain) sur la caractérisation de l'exposition, ceci nous interpelle sur l'importance des zones d'exposition sur cette même caractérisation. Nous nous sommes alors intéressés à la variabilité du champ électrique, et ce chapitre traite donc de la variabilité à la fois spatiale et temporelle du champ électrique. L'étude de la variabilité temporelle s'est focalisée sur le moyennage temporel, car celui-ci intervient dans les normes et les protocoles, et ne repose non pas sur la mesure de l'exposition réelle, mais sur des critères sanitaires. De ce fait, en considérant la zone de visibilité et en prenant en compte les nouvelles technologies, nous avons analysé cette durée de moyennage sous plusieurs angles. La variabilité spatiale locale a été aussi analysée à l'aide de l'autocorrélation spatiale, de même que la variabilité globale, pour la relier à des distributions statistiques. Les études de ce chapitre ont permis de montrer l'importance de la zone d'exposition sur la quantification de l'exposition réelle. Une manière de mieux quantifier l'exposition est de prendre en compte dans les indicateurs la zone d'exposition directe et la zone d'exposition indirecte. Et en fonction de ces zones, la durée du moyennage temporel et le rayon du moyennage spatial trouvés peuvent s'appliquer.

Les résultats de cette thèse ont permis une meilleure connaissance des limites des méthodes de prévision et de l'interprétation des résultats, de même que celles liées aux mesures. Cela permet d'être en adéquation avec les applications et l'utilisation des méthodes de prévision dans le contexte actuel (gestion de risque, conformité réglementaire, ...). Au-delà des applications industrielles et des clients du logiciel Mithra-REM, cette thèse apporte des éléments de réponse à la communauté scientifique pour une meilleure connaissance de l'exposition.

A l'état actuel des connaissances, les normes et recommandations n'ont pas encore intégré la simulation sur l'étude et la quantification de l'exposition. Au niveau réglementaire, seules les mesures permettent de tester la conformité des valeurs limites d'exposition. Cette thèse a montré qu'aujourd'hui, l'utilisation conjointe des mesures et des simulations permettrait de mieux aborder la question de l'exposition. Cette nécessité de mutualisation mesures-simulations est due aux raisons suivantes :

1. coûts des mesures ;
2. accessibilité des lieux de mesures ;
3. modèles numériques de plus en plus performants et à moindre coût.

De plus les normes doivent nécessairement suivre l'évolution du marché en prenant en compte les nouvelles technologies et applications ainsi que les nouvelles fréquences. Les travaux de cette thèse ont ainsi apporté des connaissances solides sur la manière d'aborder cette question pour une possible intégration de la simulation dans les normes et recommandations du futur. En ce sens, il serait important de bien prendre en compte les paramètres du modèle numérique, les incertitudes de mesure, la végétation, la variabilité temporelle et spatiale, la zone d'exposition ainsi que le critère d'évaluation de la fiabilité du modèle numérique (fonction "objectif"). Les outils (OpenTurns) et les approches statistiques (métamodèle, Monte Carlo, indice de sensibilité) permettront d'étudier facilement les codes de calcul.

Cette thèse a apporté certes des solutions sur la manière de traiter l'exposition, néanmoins certaines questions peuvent toujours être améliorées du fait de la complexité du problème. Par conséquent, dans les perspectives, il serait intéressant d'intégrer plusieurs cas de tests de mesures et de simulations et étudier les différents critères définis dans le cadre de cette thèse. Ce travail aura pour objectif de connaître les scénarios les plus intéressants dans le cadre d'une étude de l'exposition et le critère adéquat à utiliser. A défaut d'autres critères peuvent être définis. Ce travail peut être effectué sous forme d'analyse de sensibilité et d'incertitude liée à la situation d'exposition sur les critères d'évaluation. De même la variabilité spatiale du champ électrique sur la verticale et sur les façades serait intéressante à quantifier, d'autant plus que la plupart des études effectuées dans cette thèse considèrent la hauteur du champ électrique à 1,5m de hauteur. Les lois statistiques aussi peuvent être intégrées à l'étude et la quantification de l'exposition. Un indicateur en fonction des zones d'exposition, de la durée, de la technologie et de la surface d'exposition permettrait de mieux quantifier l'exposition en champ lointain en un point donné. Pour l'exposition à l'échelle urbaine, il serait intéressant d'intégrer la densité de la population, le moyennage spatiale et la zone d'exposition pour fournir des cartes d'exposition aux stations de base assez représentatives de l'exposition réelle. Pour les indicateurs tels que **IGE** [?] et **IE** [?], qui intègrent aussi le champ proche, la prise en compte de la zone d'exposition permettrait de mieux quantifier l'exposition en adaptant l'indice pour chaque zone d'exposition.

ANNEXES

4.5 ANNEXE 0 : Historique des normes et standards pour l'évaluation de l'exposition aux OEMs

4.5.1 ANSI/IEEE

Osepchuk et Petersen ont fait le tour des normes dans [?]. Le premier projet officiel de normalisation dédié à l'exposition aux radiofréquences a été lancé en 1960 lorsque l'Association Américaine des Standards (actuel ANSI, American National Standards Institute) a approuvé le projet de norme sur le danger des rayonnements électromagnétiques. Ce projet, sous la tutelle du Ministère de la Marine et de l'Institut des Ingénieurs Radio actuel IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) a permis la mise en place d'un comité chargé de développer des normes de sécurité dédiées aux rayonnements électromagnétiques (Committee C95). En 1966, le premier standard [?] du groupe a été publié, suivi des révisions en 1974 [?] et en 1982 [?]. Les normes de 1966 et de 1974 sont basées sur un simple modèle thermique limitant la puissance absorbée à moins de 100 W, valeur comparable à la vitesse de chauffage métabolique au repos d'un être humain adulte. La norme de 1974 prenait aussi en compte les limites de champs électriques et magnétiques pour les ondes planes pour tenir compte de l'exposition en champ proche aux fréquences inférieures à quelques centaines de MHz.

Les limites d'exposition pour le corps entier sont de 100 W/m² pour une exposition continue. Pour l'exposition à court terme, la valeur limite recommandée était de 10 mWh/m², basée sur un moyennage temporel de 6 minutes. Cette durée de moyennage est considérée comme la constante de temps thermique approximative des organes importants tels que les yeux et les testicules, et n'a pas d'autre justification que ce côté lié aux risques thermiques.

En 1982, la norme a reconnu l'importance de la dosimétrie (dose absorbée par un organisme ou un objet) et a été le premier à définir ses limites en Débit d'Absorption Spécifique (DAS) pour les fréquences comprises entre 100 et 6 GHz. Le DAS est un indicateur permettant de quantifier la quantité d'énergie véhiculée par les ondes radiofréquences reçues par l'utilisateur d'un appareil radioélectrique (téléphone portable, par exemple), lorsque cet appareil fonctionne à pleine puissance et dans les pires conditions d'utilisation. Le Committee C95, devenu en 1988 SCC28 (Standards Coordinating Committee 28), dans la continuité de son travail avec ses collaborateurs, a mis en place la norme IEEE C95.1-1991 [?] qui définit deux valeurs pour le DAS : une pour empêcher la possibilité de brûlures de la peau pour une exposition à court terme et dans un environnement professionnelle et les limites de courant de contact pour un environnement public. En 2001, Osepchuk et Petersen [?] ont introduit dans la norme le seuil de DAS considéré comme potentiellement nocif pour l'être humain, quel que soit la nature du mécanisme d'interaction. Les restrictions de base sont définies ainsi à 0,4 W/kg pour une exposition en environnement professionnelle et 0,8 W/kg dans un environnement public. Pour des raisons pratiques, les valeurs limites d'exposition (VLEs) ou niveaux de référence ont été définis. Ils sont dérivés des restrictions de base et sont exprimés en quantité plus facile à mesurer en dehors du corps. Les restrictions de base sont les mêmes pour toutes les normes et directives mais les VLEs diffèrent car leurs calculs dépend du modèle utilisé pour calculer les champs incidents et de la marge de sécurité intégrée. En 2001, le standard SCC28 change de nom pour devenir ICES (International Committee on Electromagnetic Safety). En 2005, la norme a encore subi des révisions et actuellement aux Etats-Unis deux standards d'application obligatoires régulent l'exposition des humains aux champs électromagnétiques, le standard IEEE C95.1 pour les fréquences inférieures à 3kHz et le standard IEEE C95.6 pour les fréquences de 3 kHz à 300 GHz.

4.5.2 ICNIRP

ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) développe également des directives pour l'exposition aux rayonnements électromagnétiques ; ses débuts remontent à 1973 au cours du 3ème congrès internationale de l'IRPA (International Radiation Protection Association). Il est devenu commission indépendante en 1992 pour poursuivre les travaux de l'INIRC (International Non-Ionizing Radiation Committee) de l'IRPA (International Radiation Protection Association). En 2009 le ministère de la santé et du sport français

a publié un rapport sur l'état des lieux des normes radiofréquences, en Europe et plus globalement dans le monde [?]. Pour l'exposition du grand public, dans la gamme des ondes radio, les niveaux de référence sont identiques pour les normes IEEE et la recommandation ICNIRP, sauf en dessous de 30 MHz où la valeur limite retenue dans la norme IEEE est supérieure à la recommandation ICNIRP. Quant aux limites d'exposition des travailleurs, elles se situent au-dessus de celles de la recommandation ICNIRP dans la gamme des radiofréquences, sauf entre 30 MHz et 300 MHz, où elles sont identiques. Concernant les restrictions de base, la méthodologie de mesure n'est pas la même, le DAS mesuré selon les normes IEEE conduit à des valeurs limites en apparence un peu plus restrictives. Les 18 Etats membres concernés par cette commission ont mis en place la limitation de l'exposition du public par voie réglementaire (Allemagne, Autriche, Espagne, Estonie, Finlande, France, Hongrie, Portugal, République Tchèque, Slovaquie, Roumanie) ou sous forme de recommandations (Danemark, Irlande, Lettonie, Malte, Pays-Bas, Royaume-Uni, Suède). Chypre constitue une exception dans l'Union européenne puisqu'elle n'aurait pas encore mis en place une réglementation en la matière. Toutefois, des approches plus strictes sont appliquées dans certains Etats membres. Huit Etats membres de l'Union européenne (la Belgique, l'Italie, le Luxembourg, la Grèce, la Pologne, la Lituanie, la Bulgarie, la Slovénie) ont choisi des valeurs limites inférieures à celles recommandées par l'ICNIRP. Dans l'Europe élargie, la Suisse et le Liechtenstein ont également des réglementations plus restrictives. Les valeurs choisies par ces autorités ne reposent pas sur une étude scientifique semblable à celle réalisée par l'ICNIRP mais sont défendues par l'application du principe de précaution face à d'éventuels risques sanitaires liés à l'exposition aux ondes électromagnétiques. Les valeurs limites ont été dans la majeure partie des cas fixées de manière arbitraire. On notera néanmoins les exceptions belge et grecque qui se fondent sur les valeurs ICNIRP auxquelles elles appliquent des coefficients d'abattement. Dans une très grande majorité des pays de l'Europe, et tout particulièrement dans ceux de l'Union européenne y compris la France, les valeurs limites ont pour origine les travaux de l'ICNIRP. Un certain nombre d'autres pays sont alignés sur la réglementation américaine, assez peu différente de celle de l'ICNIRP pour les radiofréquences.

4.6 ANNEXE 1 : Méthodologie globale de traitement des incertitudes utilisée par OPENTURNS

- **Étape A : spécification de l'étude (source d'incertitude, modèle et critère).** L'objectif de cette partie est d'identifier les sources d'incertitudes, les variables d'intérêt et les critères pour mesurer l'incertitude de la variable d'intérêt. La variable d'intérêt désigne une variable scalaire dont nous souhaitons estimer l'incertitude. Le modèle f représente le processus mathématique d'estimation des variables d'intérêt en fonction des variables d'entrée.
- **Étape B : quantification des sources d'incertitudes.** L'objectif de cette étape est de caractériser les sources d'incertitudes par une approche probabiliste ou déterministe.
- **Étape C : propagation des sources d'incertitudes.** Il s'agit de calculer l'incertitude totale de la méthode de calcul à travers des algorithmes.
- **Étape C' : classification des sources d'incertitudes/étude de la sensibilité de la méthode.** Dans cette partie, il s'agit d'étudier la sensibilité du modèle par rapport à ses paramètres d'entrée.

4.7 ANNEXE 2 : Intégration de MITHRA-REM dans OpenTURNS

Il existe deux façons pour appeler un code externe sur OpenTURNS :

- ☐ Par appel d'une fonction Python : Python wrapper ;
- ☐ Par utilisation d'une bibliothèque dynamique : bibliothèque wrapper.

Nous allons décrire la particularité de chacune de ces méthodes.

4.7.1 Python wrapper

Il existe deux emballages disponibles pour interfacer un code externe en utilisant Python wrapper.

- `PythonFunction` : c'est une enveloppe où le code de la fonction à exécuter est écrit en Python ;
- `DistributedPythonFunction` : c'est un emballage de Python permettant de lancer le code en parallèle sur la machine locale ou de le déployer sur plusieurs ordinateurs.

Lorsque le code de calcul est simple, avec un temps d'exécution inférieur à 0,1 s et qu'en plus la taille de l'échantillon à calculer est inférieure à 1 million, le choix idéal est PythonFunction. Il suffit simplement de traduire son code en une fonction Python et l'implémentation de l'enveloppe est assez facile. Si nous souhaitons faire le calcul sur plusieurs machines, DistributionPythonFunction est le choix idéal. Son implémentation est la même que PythonFunction à la seule différence que nous avons la possibilité de déployer le calcul sur un groupe d'ordinateurs.

Ci-dessous un exemple d'utilisation de l'emballage de PythonFunction avec un code scilab : Lorsque le calcul

```
$ scilab -nb -nwni -f code.sce
1 // code.sce
2 exec("input.data", -1)
3 y = x1 + x2;
4 f = mopen("result.data", "wt");
5 fprintf(f, "y = %.20e", y);
6 file("close", f);
7 quit
```

FIGURE 4.18 – Ce script scilab dure 0,07 s par échantillon (par calcul)

```
1 def _exec( X ):
2     return X[0] + X[1]
3 model = ot.PythonFunction(2, 1, _exec)
```

FIGURE 4.19 – Conversion en Python du script Scilab en une fonction Python, il prend maintenant 0,00001 s pour calculer un échantillon

s'effectue sur un échantillon de taille 1000 et une machine de 8 cœurs, le temps d'exécution du script converti dure 0,01 s, alors que la bibliothèque wrapper l'exécuterait en 10s dans les mêmes conditions.

La méthode de calcul du niveau d'exposition aux champs électromagnétique est assez complexe et fait appel à plusieurs étapes. Le temps d'exécution d'un échantillon peut être très long jusqu'à (3mn) en fonction des paramètres considérés. Dans ce cas le choix d'un wrapper Python est inenvisageable car les calculs seront lents et sa mise en œuvre nécessiterait aussi la transformation du code en Python, ce qui est une perte de temps énorme d'où le choix de la bibliothèque wrapper que nous allons présenter dans l'étape suivante. Nous omettons le terme bibliothèque, nous utilisons le terme wrapper pour indiquer la bibliothèque wrapper.

4.7.2 Bibliothèque Wrapper

D'un point de vue de l'informatique, le wrapper est composé de deux fichiers : Interface logicielle (bibliothèque dynamique permettant d'appeler du code C, C++, Fortran ou un exécutable) wrapper.so; Un fichier décrivant la bibliothèque XML : wcode.XML.

Pour qu'OpenTURNS puisse utiliser un code de calcul pour le traitement des incertitudes, ce dernier sera vu par OpenTURNS comme une fonction mathématique à l'aide d'un wrapper. Cette fonction est passée en argument à NumericalMathFunction, qui est capable de l'interpréter et de l'exécuter. NumericalMathFunction est une classe d'OpenTURNS permettant de simuler une fonction numérique. La syntaxe `f=NumericalMathFunction(« code de calcul »)` appelle le constructeur de la classe NumericalMathFunction, en passant en argument une chaîne de caractère, voir figure ?? (OT : OpenTURNS, NMF : NumericalMathFunction). La chaîne indique le code de calcul avec lequel l'utilisateur souhaite interfacer. Suite à cet appel, en supposant qu'aucune erreur ne s'est produite, le wrapper pour le code de calcul est chargé. La connexion entre l'objet `f` et l'emballage est établie.

Cette opération s'effectue en cinq étapes : Etape 1 : Création du NumericalMathFunction Tout commence avec la création de l'objet NumericalMathFunction au sein de la librairie d'OpenTURNS. Bien que le code (syntaxe de la figure ??) soit écrit à partir du langage Python, il est immédiatement transcrit en C++ pour être exécuté au sein d'OpenTURNS. Etape 2 : Recherche du fichier de description Après la transcription de la syntaxe de la figure ??, la chaîne de caractères « code de calcul » sera interprétée comme le nom du fichier de description « code de calcul.XML ». Après avoir trouvé le nom de ce fichier, il est recherché sur le système de fichiers de l'ordinateur dans une liste de répertoire prédéfinie (voir figure ??). Si le fichier n'est pas trouvé, une erreur est générée et l'objet `f` n'est pas créé.

Etape 3 : Analyse du fichier de description Si le fichier est présent, il est lu. Toute erreur de lecture provoque une erreur de programme et l'objet `f` n'est pas créé. Les détails de ce fichier de description seront discutés plus tard mais, à ce stade, il suffit de savoir qu'il contient le chemin vers la bibliothèque dynamique « code de calcul.so » (voir figure refAN2 :figure4). Etapes 4 et 5 : Recherche et Chargement de la librairie dynamique De

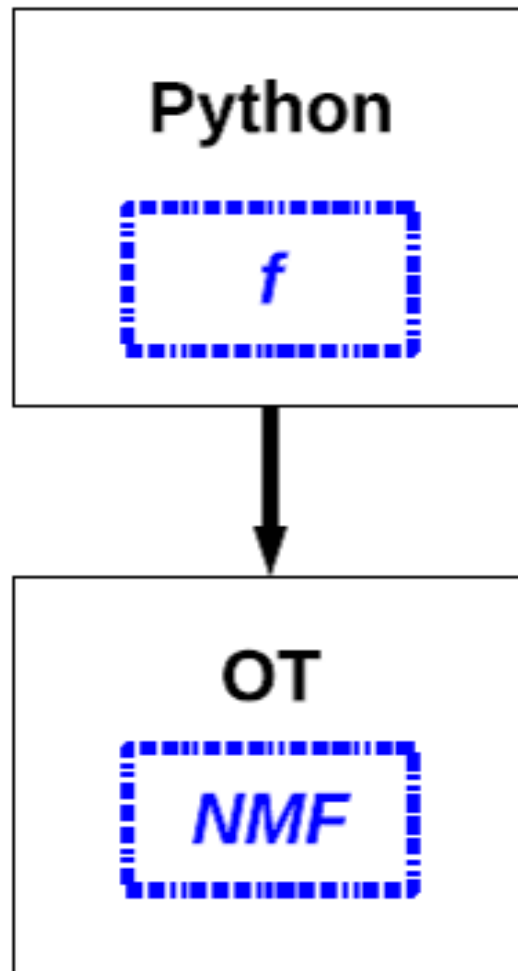


FIGURE 4.20 – Création d'un NumericalMathFunction

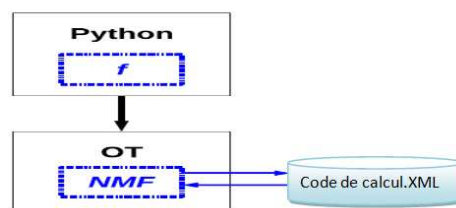


FIGURE 4.21 – Recherche du fichier XML

même, la bibliothèque dynamique sera recherchée dans ces mêmes répertoires (répertoires du fichier XML). Si elle est trouvée, elle est automatiquement chargée par OpenTURNS. Une fois que la bibliothèque est chargée,

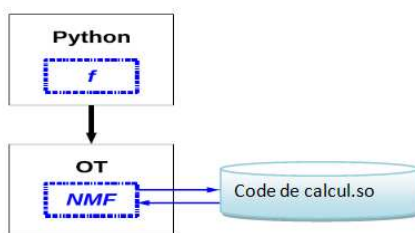


FIGURE 4.22 – Recherche de la bibliothèque dynamique

OpenTURNS maintient un lien interne à la bibliothèque dynamique de l’emballage et retourne un objet `NumericalMathFunction` bien construit. Il est donc possible de l’utiliser pour l’étude des incertitudes. Nous allons présenter maintenant les grandes étapes de la mise en œuvre de cet outil.

4.7.3 Mise en œuvre du wrapper

La mise en œuvre du wrapper est constituée essentiellement de trois grandes étapes qui sont la mise en place du code, de la librairie dynamique qu’on appellera « code de calcul.so », du fichier de description nommé lui aussi « code de calcul.XML », et enfin son installation dans la machine.

4.7.3.1 Description de la librairie dynamique « code de calcul.so »

La librairie dynamique contient tout le code de l’ensemble des opérations du wrapper. Elle est chargée lorsque le wrapper est utilisé. Le mécanisme de chargement de la librairie dynamique empêche la coexistence de plusieurs instances de la même enveloppe. Pour faciliter la mise en place d’un wrapper par les utilisateurs, des exemples de fichiers `wrapper.c` sont déjà disponibles. Il suffit juste de les modifier et si on veut de les améliorer. Nous avons modifié ces exemples afin de les adapter à notre code de calcul.

4.7.3.2 Description du wrapper.XML

Ce fichier sert à informer la plate-forme OpenTURNS des fonctionnalités offertes par la bibliothèque du wrapper. Il contient :

- Le chemin indiquant à OpenTURNS où trouver la bibliothèque dynamique ;
- La description des variables d’entrée et sortie du code externe ;
- Le nom de la fonction à faire exécuter par le wrapper ;
- La définition de la connexion entre le wrapper et le code externe.

La tâche qui était la plus difficile lors de la mise en place de cet interfaçage, était la mise en place de ce fichier. S’il n’est pas correctement écrit c’est-à-dire que toutes les variables ne sont pas connues par le wrapper avec le bon format et la bonne expression régulière, tous les calculs seront faux. Lorsque le format ou l’expression régulière d’une variable n’est pas bien renseigné et que son nom est bien renseigné, le wrapper connaîtra la variable par son nom mais il ne la remplacera jamais. Le wrapper prendra toujours les valeurs initiales du fichier d’entrée. De ce fait, les résultats d’analyse peuvent être vraiment aberrants. S’il y a des erreurs de syntaxe ou de structure du fichier XML, cela entraîne le rejet immédiat de la bibliothèque dynamique et le wrapper ne sera pas chargé.

Description des variables d’entrées et sorties du code externe Pour décrire une variable afin que celle-ci puisse être reconnue par OpenTURNS à l’aide du wrapper, il faut 4 paramètres importants :

- Id : spécifie le nom de la variable ;
- Type : pour spécifier si la variable est une variable d’entrée ou de sortie ;
- L’expression régulière : permet de localiser la variable dans un fichier d’entrée ou de sortie ;
- Format : le format de la variable.

A noter que les variables doivent être énumérées dans leur ordre naturel (variables d'entrée d'abord, ensuite variables de sortie) car lors de l'évaluation de la fonction, cette commande sera utilisée par OpenTURNS afin de déterminer à quelles variables il doit attribuer les valeurs d'entrées et les variables de sorties. Ainsi, la première composante sera affectée à la première variable dans la liste, la deuxième composante à la deuxième variable de la liste, et ainsi de suite. Pour ce qui concerne l'expression régulière, il s'agit dans ce cas d'indiquer l'emplacement de chaque variable dans les fichiers de paramètres d'entrée.

Exemple : pour le paramètre d'entrée $C2=0$ qui se trouve à la première ligne du fichier, il est recherché par la librairie dynamique, dans le fichier XML par cette expression régulière : `<regexp>§*c2=R*§</regexp>` Cela signifie que cette variable se trouve en début de ligne du fichier avec éventuellement des blancs et commence par `c2` suivi de « = », ensuite d'un réel et la fin de ligne.

Définition de l'interfaçage entre le wrapper et le code externe Cette partie est constituée de 3 balises définissant les éléments suivants : Balise « data » : Cette balise définit les fichiers que l'on souhaite échanger entre le wrapper et le code externe et les variables qui nous intéressent dans ces fichiers car il peut y avoir des cas où nous ne souhaitons pas que toutes les variables d'entrée soient connues par OpenTURNS par exemple si on ne souhaite pas étudier l'influence du nombre de réflexion on peut ne pas la déclarer sur le fichier XML du coup sa valeur ne sera jamais modifiée lors de l'exécution de la fonction. Pour décrire un fichier afin que celui-ci puisse être reconnu par OpenTURNS à l'aide du wrapper, il faut 4 paramètres importants :

- Id : son identifiant ;
- Type : s'agit-il d'un fichier d'entrée ou de sortie ? ;
- Le chemin où l'on trouve le fichier ;
- La(les) variable(s) que l'on souhaite substituer dans ces fichiers.

Balise « wrapper-mode » : Cette balise décrit le mode de transfert des données entre l'enveloppe et le code de calcul. La description du mode de transfert nécessite 3 paramètres importants :

- Type : indique que la fonction est directement codée dans le wrapper (static-link) ou si celle-ci fait appel à d'autres commandes externes (forks) ;
- Mode de transfert des données d'entrée : fichier ou argument ;
- Mode de transfert des données de sortie : fichier ou argument.

Balise « commande » : Celle-ci indique la commande du système qui appelle le code externe quand il est totalement indépendant et séparé du wrapper.

4.7.3.3 Installation du wrapper sur la machine

Il y a aussi d'autres étapes qui sont liées à la configuration et à l'installation du wrapper. Il faut s'assurer d'abord d'avoir automake, autoconf, libtool, gcc. Sur les fichiers de configuration nous avons :

- Configure.ac ;
- Makefile.am.

Pour installer le wrapper il faut suivre les étapes suivantes :

- Se placer dans le dossier contenant les fichiers décrit ci-dessus ;
- `./bootstrap` ;
- `./configure` ;
- `Make` ;
- `Make install` ;
- Copier l'exécutable dans `/OpenTURNS/bin` ;
- Export `PATH=$PATH : /OpenTURNS/bin/`.

```

mame@pc-ece-stagiaire1: ~/Bureau/totomame
mame@pc-ece-stagiaire1:~/Bureau/totomame$ code_C1 code_C1.data code_C1.result
[message-0] 2088 batiments
[message-0] 970 points source
[progres-0] 0% de "création du terrain"
[progres-0] 100% de "création du terrain"
[progres-0] 0% de "création de la topologie"
[progres-0] 9% de "création de la topologie"
[progres-0] 18% de "création de la topologie"
[progres-0] 27% de "création de la topologie"
[progres-0] 35% de "création de la topologie"
[progres-0] 44% de "création de la topologie"
[progres-0] 53% de "création de la topologie"
[progres-0] 61% de "création de la topologie"
[progres-0] 70% de "création de la topologie"
[progres-0] 78% de "création de la topologie"
[progres-0] 86% de "création de la topologie"
[progres-0] 95% de "création de la topologie"
[progres-0] 100% de "création de la topologie"
[progres-0] 0% de "ajout des arêtes libres"
[progres-0] 100% de "ajout des arêtes libres"
[progres-0] 0% de "suppression des arêtes cachées"
[progres-0] 1% de "suppression des arêtes cachées"
[progres-0] 2% de "suppression des arêtes cachées"
[progres-0] 3% de "suppression des arêtes cachées"

```

FIGURE 4.23 – Lancement du calcul de champs de MITHRA-REM en ligne de commande (initialisation)

```

mame@pc-ece-stagiaire1: ~/Bureau/totomame
[progres-0] 98% de "suppression des sommets cachés"
[progres-0] 99% de "suppression des sommets cachés"
[progres-0] 100% de "suppression des sommets cachés"
[progres-0] 0% de "finalisation du moteur de calcul"
[progres-0] 100% de "finalisation du moteur de calcul"
[progres-0] 0% de "création des structures accélératrices (grilles)"
[progres-0] 100% de "création des structures accélératrices (grilles)"
[message-0] durée d'initialisation 0.86s
[message-1] traitement de "/home/mame/Bureau/toto/source.xml"
[progres-1] 0% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 1% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 2% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 3% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 4% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 5% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 6% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 7% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 8% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 9% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 10% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 11% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 12% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 13% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 14% de "lancer de faisceaux"

```

FIGURE 4.24 – Lancement du calcul de champs de MITHRA-REM en ligne de commande (calcul)

```

mame@pc-ece-stagiaire1: ~/Bureau/totomame
[progres-1] 87% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 88% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 89% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 90% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 91% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 92% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 93% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 94% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 95% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 96% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 97% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 98% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 99% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 100% de "lancer de faisceaux"
[message-1] trouve 715 trajets, 448 en 2D, 715 en 3D
[message-1] durée de calcul 0.13s
[message-0] au total 448 trajets en 2D, 715 en 3D
[message-0] durée de calcul 0.13s (équivalent mono-cœur), 0.13s (grâce au multi-cœurs)
[message-0] conclusion
[message-0] durée de conclusion 0.01s
[message-0] fin
Resultat::Resultat(): un émetteur lu
/home/mame/Bureau/toto/route.emf: 1 émetteurs, 1 composantes, sans hauteur, boît

```

FIGURE 4.25 – Lancement du calcul de champs de MITHRA-REM en ligne de commande (post-traitement)

4.7.4 Exemple de résultat

4.7.4.1 MITHRA-REM exécuté en ligne de commande

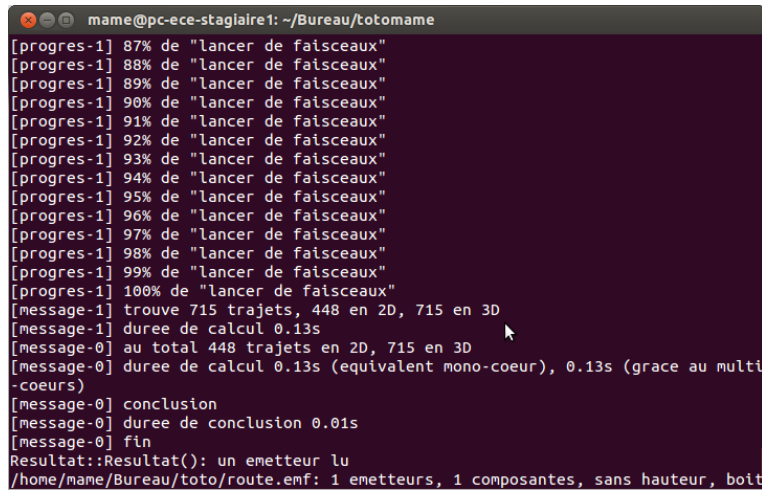
Dans cet exemple, le calcul prend en entrée le modèle géométrique de la zone de Munich et son antenne et calcule en sortie, la corrélation entre les mesures de champs et la simulation effectuée par MITHRA-REM.

En sortie, nous avons le fichier de résultat de la simulation du champ électrique, et le fichier de calcul des variables d'intérêt comme le montre l'exemple ci-dessous. nombre_echantillons_retenus0=83 moyenne_ref0=-22,9048 ecart_type_ref0=124,728 moyenne_res0=-31,5712 ecart_type_res0=229,417 moyenne_type_dif0=8,66635 ecart_type_dif0=16,0565 correlation0=0,926531

4.7.4.2 Résultat de test du wrapper : MITHRA-REM est intégré dans OpenTURNS

Pour tester le wrapper, on utilise un script Python (test.py). Nous appelons le wrapper par la fonction NumericalMathFunction d'OpenTURNS. **test.py** :

```
f = NumericalMathFunction("wcode")
print "f = ", f
inP = NumericalPoint(f.getInputDimension())
print "inP = ", inP
outP = f(inP)
print "outP = ", outP
```



```
mame@pc-ece-stagiaire1: ~/Bureau/totomame
[progres-1] 87% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 88% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 89% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 90% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 91% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 92% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 93% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 94% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 95% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 96% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 97% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 98% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 99% de "lancer de faisceaux"
[progres-1] 100% de "lancer de faisceaux"
[message-1] trouve 715 trajets, 448 en 2D, 715 en 3D
[message-1] duree de calcul 0.13s
[message-0] au total 448 trajets en 2D, 715 en 3D
[message-0] duree de calcul 0.13s (equivalent mono-coeur), 0.13s (grace au multi-coeurs)
[message-0] conclusion
[message-0] duree de conclusion 0.01s
[message-0] fin
Resultat::Resultat(): un emetteur lu
/home/mame/Bureau/toto/route.emf: 1 emetteurs, 1 composantes, sans hauteur, boiti
```

FIGURE 4.26 – MITHRA-REM dans OpenTURNS

4.8 ANNEXE 3 : Mise en oeuvre du métamodèle pour le calcul des indices de sobol, de la moyenne et la variance globale du modèle de calcul

4.8.1 Définition du métamodèle

La méthode des surfaces de réponse ou "métamodèle" a pour objectifs de construire une fonction qui simule le comportement de notre code de calcul pour le calcul du niveau d'exposition dans le domaine de variation des variables d'entrée, et ce, à partir d'un certain nombre d'expériences. Il permet ainsi d'obtenir un modèle mathématique représentatif du code de calcul en termes de qualité d'approximations, ayant de bonnes capacités de prédictions, et dont le temps de calcul pour évaluer une réponse est négligeable.

4.8.1.1 Représentation du modèle de calcul par chaos polynomial

Cette méthode consiste à remplacer le code de calcul $Y = f(\underline{X})$ par un modèle approximé où $\underline{X}$ est le vecteur aléatoire à composantes indépendantes et Y la sortie du modèle. Son développement par chaos polynomial est :

$$\tilde{Y} = \sum_{k \in K} \alpha_k \varphi_{k0} T(\underline{X}) \quad (4.17)$$

(22) Les α_k sont des coefficients à calculer qui caractérisent complètement la réponse Y . Les φ_j sont des polynômes multivariés orthonormaux. T est la transformation isoprobabiliste correspondant à la distribution multivariée de $\underline{X}$ dans la distribution multivariée $\mu = \prod_{i=1}^n \mu_i$ et φ_k $k \in N$ la base polynomiale multivariée. K est un sous ensemble de N . Pour construire la base multivariée orthonormée, il faut associer à chaque distribution d'entrée une famille de polynômes univariés.

4.8.2 Mise en oeuvre dans OpenTURNS

Pour mettre en oeuvre ce métamodèle avec OpenTURNS, il faut :

1. Construire la base multivariée φ ;
2. Tronquer la base pour choisir un ensemble fini d'éléments ;
3. Approximer les coefficients α_k ;
4. Appliquer l'algorithme de chaos polynomial en lui donnant comme paramètre d'entrée le modèle f (vrai modèle de calcul), la distribution multivariée du vecteur d'entrée, le nombre d'éléments à tronquer et la méthode d'approximation des coefficients α_k .

OpenTURNS construit la base multivariée par φ_k $k \in N$ par le produit cartésien des familles de polynômes univariés. Pour construire la base multivariée, les variables d'entrée de notre modèle qui ont des distributions continues uniformes sont remplacées par les polynômes de Legendres. Pour les distributions discrètes uniformes, OpenTURNS propose des algorithmes pour construire des familles de polynômes univariés associés à ces dernières. Pour la troncature de la base multivariée, nous avons choisi de ne prendre que les polynômes de degré 2. Pour cette partie, nous avons une contrainte sur le choix du degré des polynômes imposé par nos distributions discrètes. Nous avons des distributions discrètes qui ne contenaient que trois éléments, ce qui fait que nous ne pouvions pas dépasser le degré 2. La méthode utilisée pour approximer les coefficients de ces polynômes est la méthode des moindres carrés avec une expérience de Monte Carlo de taille 1000 pour l'évaluation du modèle.

4.8.3 Validation du modèle

Un métamodèle est une approximation du vrai modèle, de ce fait il est important de faire la comparaison avec le vrai modèle. Cela nous permet de voir si nous avons une bonne approximation. Cette vérification s'effectue par la représentation des nuages de point faisant la comparaison entre les valeurs du modèle et celles du métamodèle. Si l'adéquation est parfaite, les points doivent être sur la diagonale. Nous avons effectué cette étape sur 100 échantillons, dans lesquels nous calculons la sortie du vrai modèle et celle du métamodèle et faisons ainsi une comparaison des nuages de points. Nous donnons un exemple de graphe de validation du modèle dans la figure suivante. Cet exemple correspond à la scène de Poitiers. Le code pour la mise en place de ce métamodèle est disponible Annexe 3.

Nous pouvons constater que le métamodèle approxime bien le modèle de calcul car nous avons l'ensemble des points qui se trouve sur la diagonale. Les indices de sobol sont obtenus directement à partir de ce métamodèle.

4.9 ANNEXE 4 : Décomposition de la variance fonctionnelle pour estimer les indices de sobol

La décomposition de la variance fonctionnelle consiste à estimer l'importance des entrées sur la sortie d'un modèle dont la forme analytique n'est pas connue en le décomposant en sommes de fonction élémentaires.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_p) = f_0 + \sum_{i=1}^p f_i(X_i) + \sum_{1 \leq i < j \leq p} f_{ij}(X_i, X_j) + f_{1,2,\dots,p}(X_1, X_2, \dots, X_p), \quad (4.18)$$

où

$$f_0 = E[Y] \quad (4.19)$$

$$f_i(X_i) = E[Y|X_i] - E[Y],$$

$$f_{ij}(X_i, X_j) = E[Y|X_i, X_j] - E[Y|X_i] - E[Y|X_j] + E[Y],$$

$$f_{i,j,k}(X_i, X_j, X_k) = E[Y|X_i, X_j, X_k] - E[Y|X_i, X_j] - E[Y|X_i, X_k] - E[Y|X_j, X_k] + \dots$$

La variance V de Y peut alors se décomposer selon le théorème de la décomposition de Sobol. Lorsque les entrées sont indépendantes ce qui est le cas pour notre code de calcul, la variance du modèle se décompose en :

$$V = \sum_{i=1}^p V_i + \sum_{1 \leq i < j \leq p} V_{ij} + \dots + V_{1\dots p} \quad (4.20)$$

où

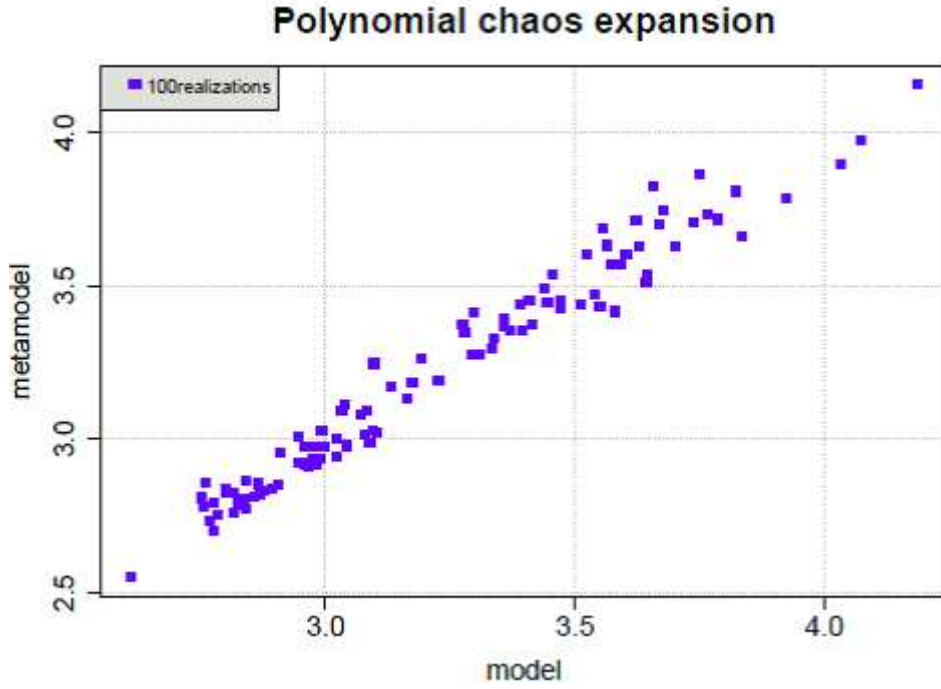


FIGURE 4.27 – Comparaison métamodèle-modèle pour le RMSE

$$V_i = V(E[Y|X_i]),$$

$$V_{ij} = V(E[Y|X_i, X_j]) - V_i - V_j,$$

$$V_{i,j,k} = V(E[Y|X_i, X_j, X_k]) - V_{ij} - V_{ik} - V_{jk} - V_i - V_j - V_k,$$

$$V_{1\dots p} = V - \sum_{i=1}^p V_i - \sum_{1 \leq i < j \leq p} V_{ij} - \dots - \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_{p-1} \leq p} V_{i_1 \dots i_{p-1}}$$

L'objectif est d'étudier la décroissance de la variance de Y lorsque nous fixons la variable X_i . De ce fait l'indice de sensibilité de Y à X_i se définit comme suit :

$$S_i = \frac{V(E[Y|X_i])}{V(Y)} \quad (4.21)$$

Cet indice est appelé indice de sensibilité du premier ordre par Sobol. Il quantifie la sensibilité de Y à la variable d'entrée X_i ou encore la part de la variance de Y due à la variable X_i . Sobol a introduit aussi les indices d'ordre deux qui expriment la sensibilité de la variance de Y à l'interaction des variables X_i et X_j c'est-à-dire la sensibilité de Y aux variables X_i et X_j qui n'est pas prise en compte dans l'effet des variables seules.

$$S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V} \quad (4.22)$$

Ainsi que les indices d'ordre trois qui expriment la sensibilité de la variance de Y aux variables X_i, X_j, X_k qui n'est pas prise en compte dans l'effet des variables seules et des interactions deux à deux.

$$S_{ijk} = \frac{V_{ijk}}{V} \quad (4.23)$$

Et ainsi de suite jusqu'à l'ordre p . Sobol a aussi introduit la notion d'indice de sensibilité total pour exprimer tous les effets d'une variable d'entrée sur la sortie et qui se définit comme suit :

$$S_{Ti} = S_i + \sum_{j \neq i} S_{ij} + \sum_{j \neq i, k \neq i, j < k} S_{ijk} + \dots \quad (4.24)$$

4.10 ANNEXE 5 : Exemples de paramètres d'entrée du modèle pour le calcul d'incertitude par la méthode déterministe

Comparaison mesures / modélisations pour les valeurs extrêmes : exemple RMSE Munich 0

Parcours 0 Munich

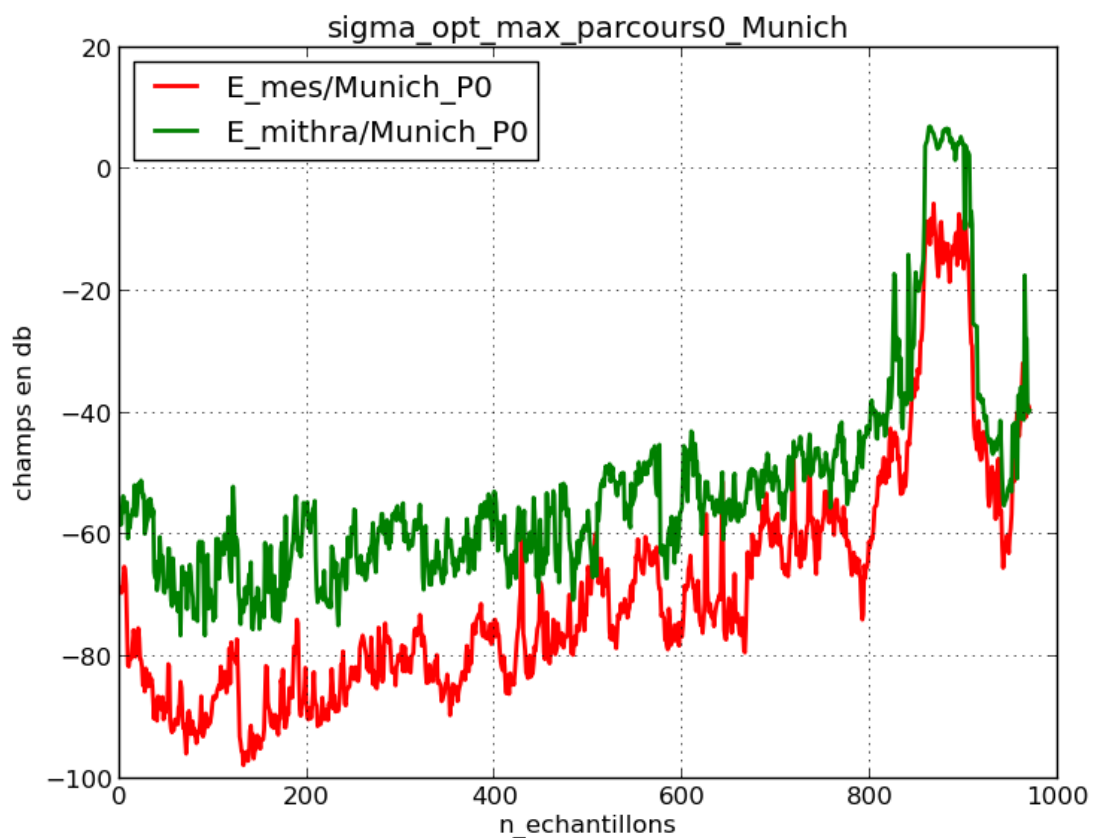
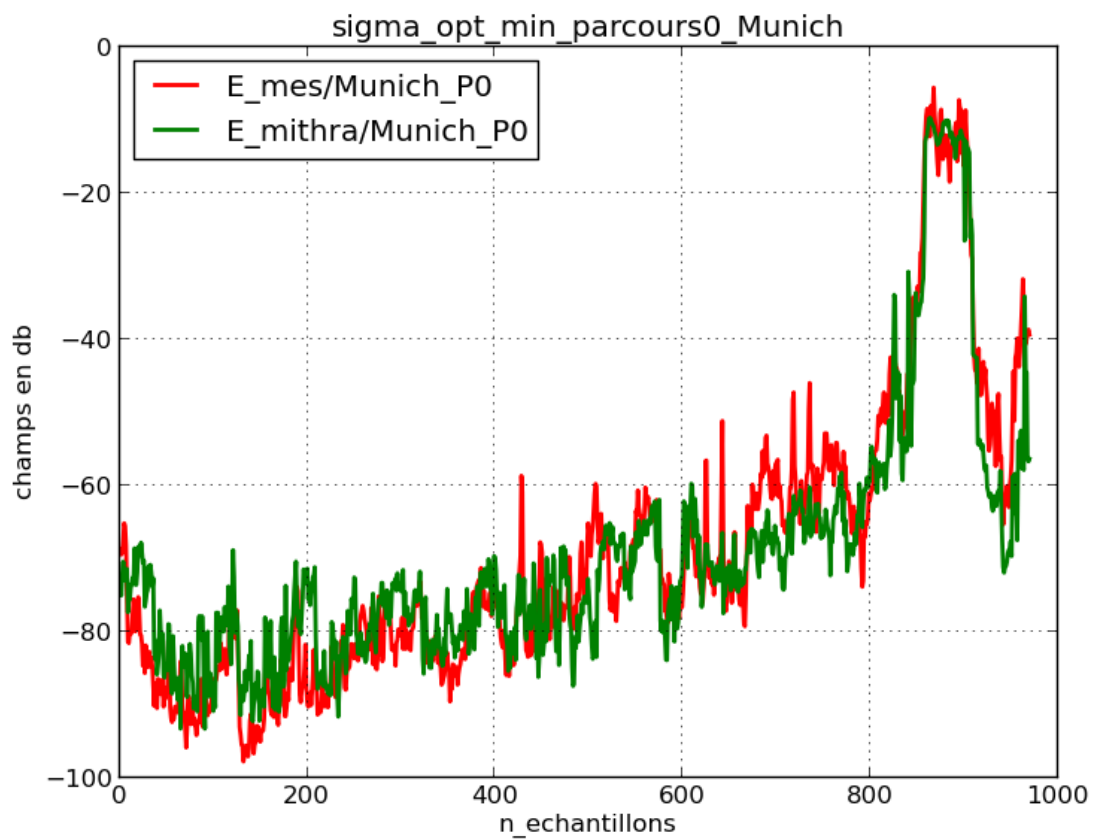
	Pearson		RMSE (dB)	
Paramètres	Min	Max	Min	Max
C2	Lâche	Lâche	Lâche	Stricte
C3	Toujours_une	Jamais	Jamais	Au moins_une
C4	Réflexion toit	Ni sol cubique, ni toit	Reflexion_toit	Réflexion toit
F1	16	30	30	60
F2	942MHz	945MHz	937MHz	942MHz
F3	948MHz	953MHz	955MHz	953MHz
M11	14.88	11.72	8.56	1.77
M12	0.204	0.277	0.271	0.0061
R	0	2	2	0
S	Diffractant vertical	Capolino	Capolino	Capolino
ray	1.87	7.08	3.73	9.64

Paramètres d'entrée des valeurs extrêmes du parcours 0 de Munich

Parcours 1 Munich

	Corrélation		σ_{opt} (dB)	
param	Min	Max	Min	Max
C2	Sans	Sans	Sans	Stricte
C3	Au moins_une	Jamais	Jamais	Au moins_une
C4	Factoriser diffraction	Cubique/toit	Cubique/toit	Sol cubique
F1	16	16	16	45
F2	936MHz	941MHz	941MHz	942MHz
F3	950MHz	948MHz	948MHz	954MHz
M11	11.42	14.71	14.71	6.98
M12	0.164	0.351	0.351	0.074
R	0	2	2	0
S	0	Energétique/capolino	Energétique/capolino	0
Ray	2.03	9.48	9.48	8.354

Paramètres d'entrée des valeurs extrêmes du parcours 1 de Munich



4.11 ANNEXE 6 : Analyse de la variabilité temporelle du champ électrique

4.11.1 Analyse des signaux lissés

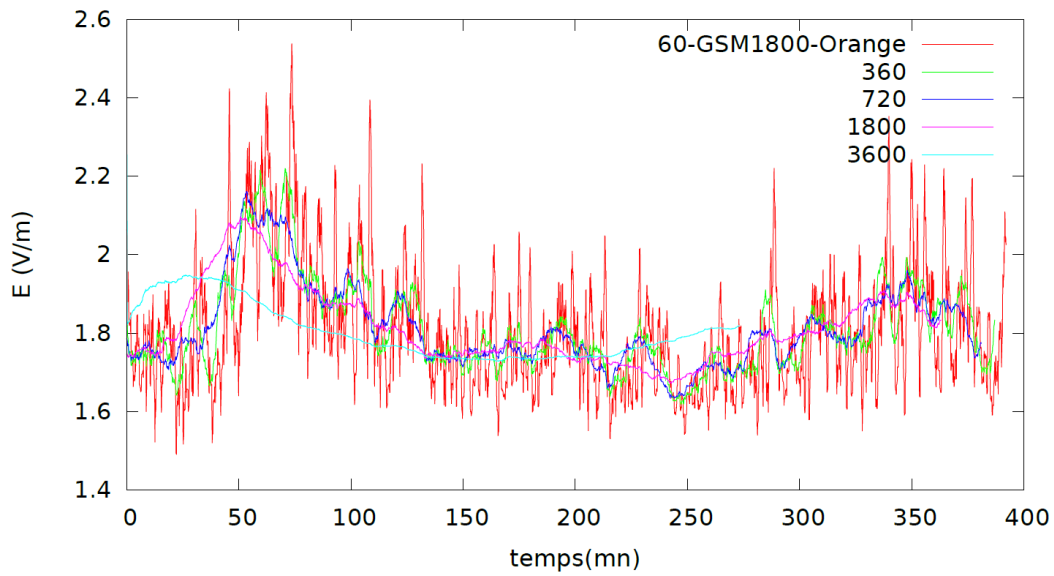


FIGURE 4.28 – Influence de la taille de la fenêtre de moyennage temporel sur le niveau de champ électrique - cas du GSM1800-Orange

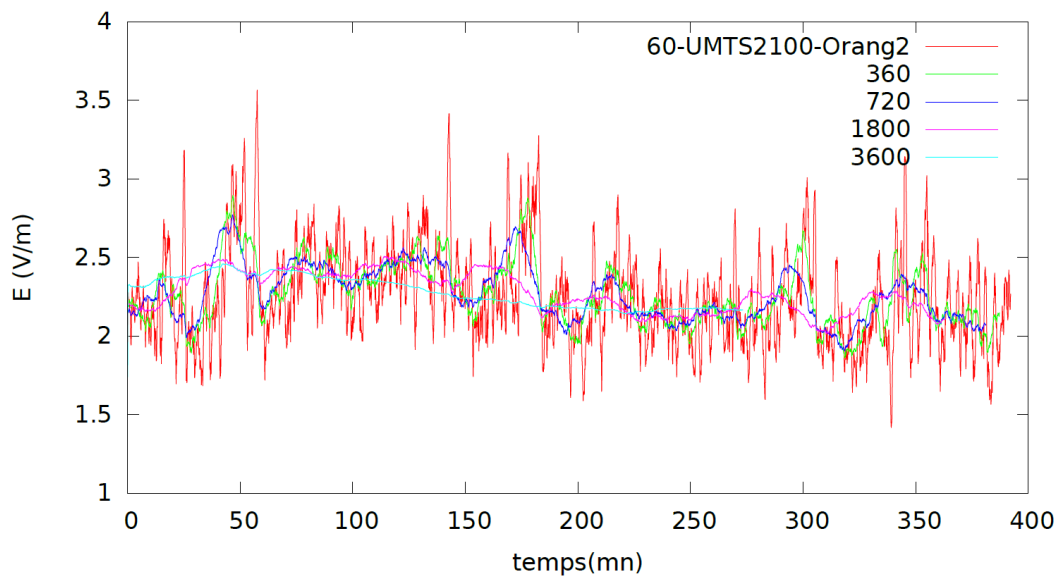


FIGURE 4.29 – Influence de la taille de la fenêtre de moyennage temporel sur le niveau de champ électrique - cas de UMTS21002-Orange

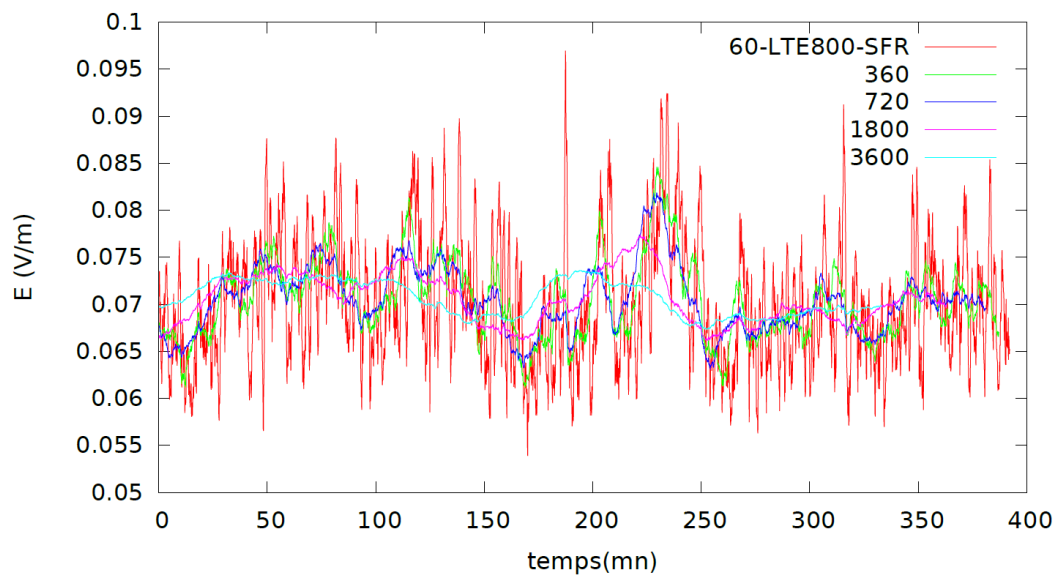


FIGURE 4.30 – Influence de la taille de la fenêtre de moyennage temporel sur le niveau de champ électrique - cas du LTE800-SFR

Bouygues

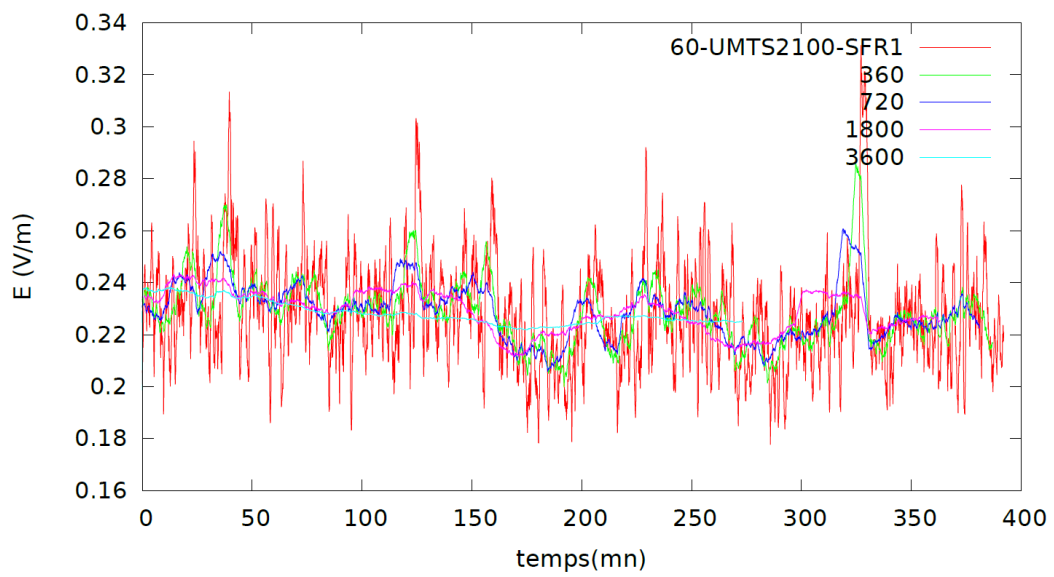


FIGURE 4.31 – Influence de la taille de la fenêtre de moyennage temporel sur le niveau de champ électrique - cas de UMTS2100-SFR

h

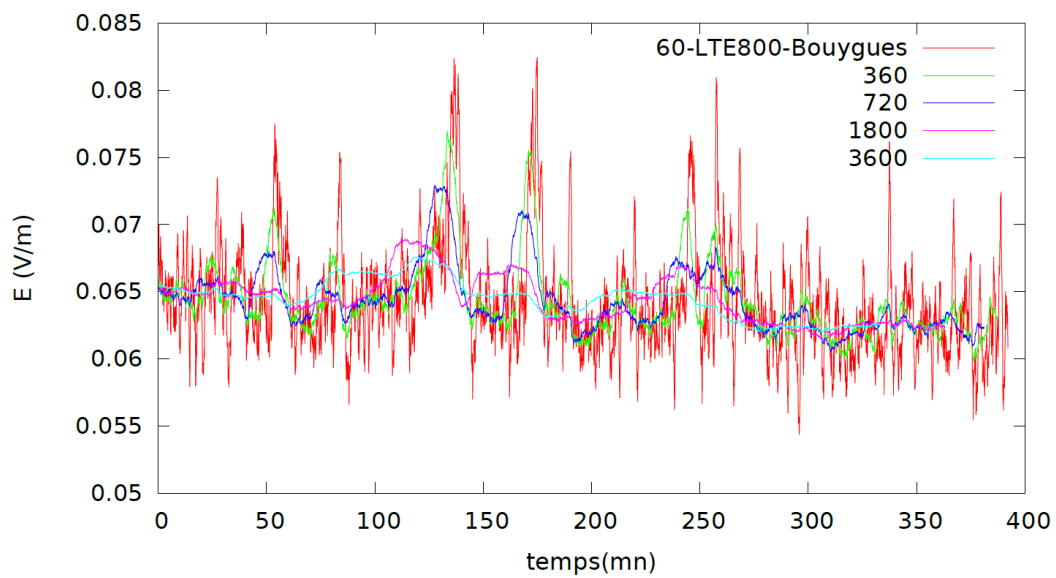


FIGURE 4.32 – Influence de la taille de la fenêtre de moyennage temporel sur le niveau de champ électrique - cas du LTE800-Bouygues

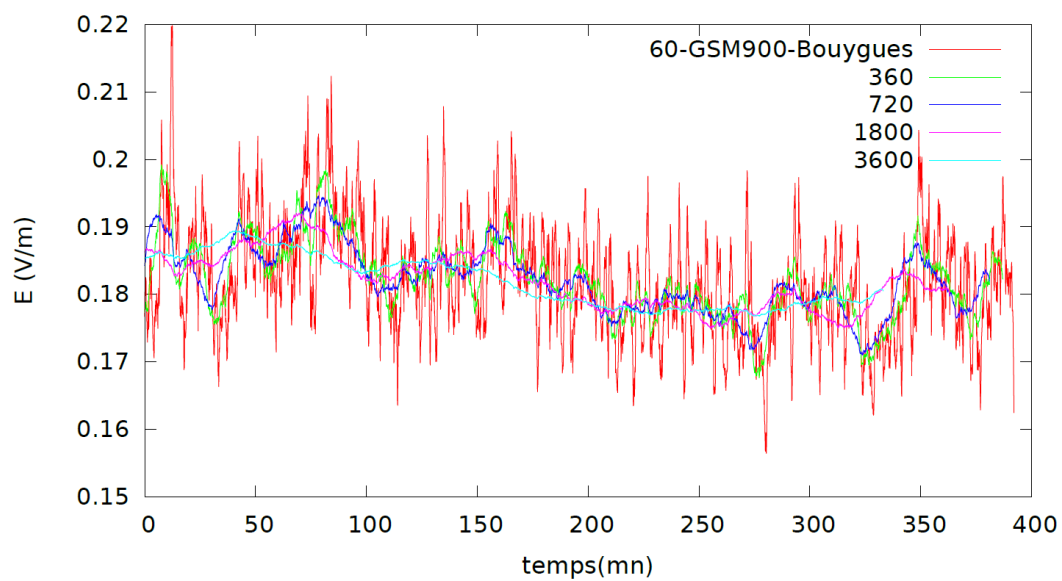


FIGURE 4.33 – Influence de la taille de la fenêtre de moyennage temporel sur le niveau de champ électrique - cas du GSM900-Bouygues

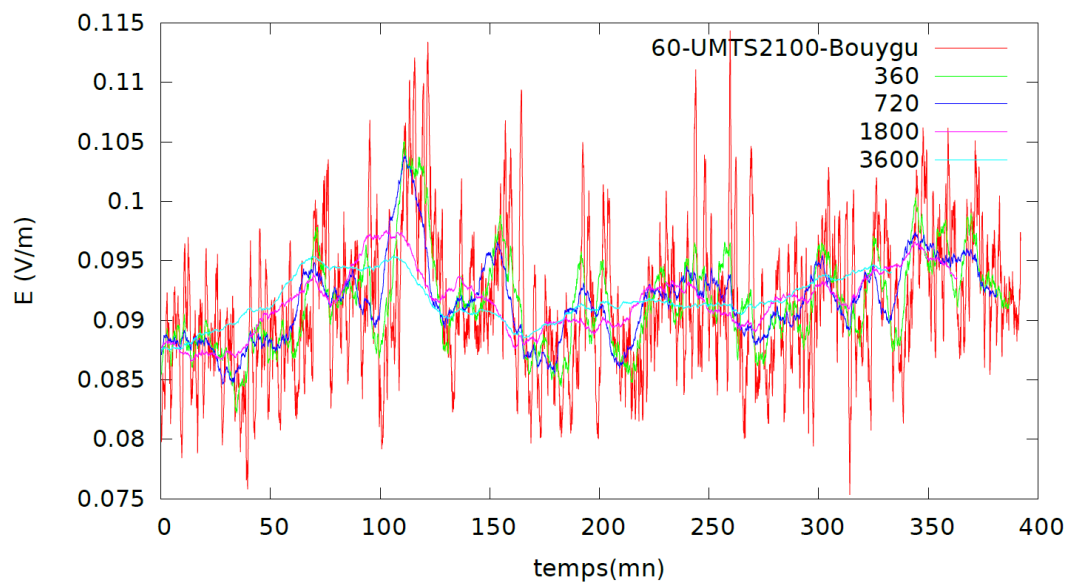


FIGURE 4.34 – Influence de la taille de la fenêtre de moyennage temporel sur le niveau de champ électrique - cas de UMTS2100-Bouygues

4.11.2 Segmentation en profil du signal mesuré sur 24 h

1 échantillon = 15mn pour rendre plus visible la segmentation du signal **LTE ORANGE**

numéro d'échantillon de la première rupture = 55 nombre d'échantillons de la période de rupture = 34 E2 = 1.94049 E1 = 2.69089 **GSM1800 ORANGE**
numéro d'échantillon de la première rupture = 48 nombre d'échantillons de la période de rupture = 36 E2 = 1.43152 E1 = 1.50761

UMTS2100

numéro d'échantillon de la première rupture = 62 nombre d'échantillons de la période de rupture = 25 E2 = 2.16414 E1 = 3.01636

LTE800 SFR

numéro d'échantillon de la première rupture = 58 nombre d'échantillons de la période de rupture = 27 E2 = 0.108264 E1 = 0.121106

UMTS2100 SFR

numéro d'échantillon de la première rupture = 53 nombre d'échantillons de la période de rupture = 41 E2 = 0.209907 E1 = 0.247146

LTE800 Bouygues

numéro d'échantillon de la première rupture = 4 nombre d'échantillons de la période de rupture = 54 E2 = 0.140968 E1 = 0.134762

UMTS2100 Bouygues

numéro d'échantillon de la première rupture = 5 nombre d'échantillons de la période de rupture = 48 E2 = 0.187101 E1 = 0.171866

GSM900 Bouygues

numéro d'échantillon de la première rupture = 56 nombre d'échantillon de la période de rupture = 28 E2 = 0.111603 E1 = 0.132772

4.12 ANNEXE 6 : Analyse de la variabilité spatiale du champ électrique

4.12.1 Loïs utilisées dans l'analyse de la variabilité spatiale

$$CDF_{laplace} = 0,5 [1 + \text{signe}(x - \mu)(1 - \exp(-|x - \mu|/b))] \quad (4.25)$$

$$CDF_{Gamma} = \frac{\gamma(k, \frac{x}{\theta})}{\Gamma(k)} \quad (4.26)$$

$$CDF_{nakagami} = \frac{\gamma(m, \frac{m}{w} x^2)}{\Gamma(m)} \quad (4.27)$$

$$CDF_{normale} = 0,5 \left(1 + \text{erf}\left(\frac{x - \mu}{\sigma/2}\right) \right) \quad (4.28)$$

$$CDF_{weibull} = 1 - \exp(-(x/\lambda)^k) \quad (4.29)$$

$$CDF_{Extremevalue} = \exp(-\exp(\frac{(\mu - y)}{b})) \quad (4.30)$$

Avec $\text{Inf} < y < \text{Inf}$; $b > 0$

$$CDF_{Lognormale} = 0,5 + 0,5 \text{erf} \left[\frac{\ln(x) - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right] \quad (4.31)$$

$$CDF_{ExtremeValueGeneralized} = \exp \left\{ - \left[1 + \Xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right] \right\}^{\frac{-1}{\Xi}} \quad (4.32)$$

4.12.2 Valeurs du critère sur les 8 lois testées et les différentes zones d'exposition

Loi 1 Façade	Loi 1 Sol
Loi 2 Façade	Loi 2 Sol
Loi 3 Façade	Loi 3 Sol

Tout	Saint-Mandé	Paris15
Lap	1.708017e7	4.277186e6
	3.266634e6	6.091372e5
Gam	1.672213e7	4.145075e6
	3.121662e6	5.864900e5
Nak	1.665805e7	4.142664e6
	3.143455e6	5.926515e5
Nor	1.664428e7	4.159973e6
	3.185815e6	6.064596e5
Ev	1.683526e7	4.256889e6
	3.322239e6	6.426221e5
Wei	1.820698e7	4.401316e6
	3.270657e6	5.973481e5
Log	1.682876e7	4.160336e6
	3.109656e6	5.844314e5
EGV	1.663547e7	4.140038e6
	3.106140e6	5.841621e5

Z _{direct}	Saint-Mandé	Paris15
Lap	4.668903e6	1.945093e6
	1.443273e6	3.857222e5
Gam	4.632264e6	1.933828e6
	1.441831e6	3.752136e5
Nak	4.643794e6	1.939956e6
	1.444743e6	3.760594e5
Nor	4.668291e6	1.953212e6
	1.451638e6	3.798127e5
Ev	4.935352e6	2.073424e6
	1.554969e6	4.051529e5
Wei	5.250060e6	2.143995e6
	1.699806e6	3.959299e5
Log	4.638003e6	1.936638e6
	1.447205e6	3.773361e5
EGV	4.631162e6	1.932655e6
	1.441146e6	3.749619e5

Z _{réflexions}	Saint-Mandé	Paris15
Lap	3.564538e6	7.605008e5
	5.147202e5	9.486103e4
Gam	3.536258e6	7.490265e5
	5.098762e5	9.154557e4
Nak	3.518526e6	7.468521e5
	5.088229e5	9.147524e4
Nor	3.511241e6	7.467689e5
	5.098032e5	9.244189e4
Ev	3.595825e6	7.680752e5
	5.309776e5	9.611164e4
Wei	3.965033e6	8.508330e5
	5.614770e5	9.326154e4
Log	3.567987e6	7.540504e5
	5.134619e5	9.242226e4
EGV	3.524116e6	7.463671e5
	5.089063e5	9.158875e4

Z _{diffractions}	Saint-Mandé	Paris15
Lap	6.462127e6	9.842528e5
	6.782533e5	4.997375e4
Gam	6.417588e6	9.855029e5
	6.744867e5	4.973549e4
Nak	6.390473e6	9.783100e5
	6.699326e5	4.932313e4
Nor	6.375488e6	9.725623e5
	6.677617e5	4.908422e4
Ev	6.537679e6	9.809736e5
	6.850461e5	4.996262e4
Wei	7.497430e6	1.163597e6
	7.385272e5	5.448033e4
Log	6.463085e6	9.962144e5
	6.829415e5	5.049017e4
EGV	6.412659e6	9.746737e5
	6.706156e5	4.907795e4

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [asa, 1966] (1966). *Safety levels of electromagnetic radiation with respect to personnel. USASI standard C95.1-1966*. ASA.
- [ans, 1974] (1974). *Safety levels of electromagnetic radiation with respect to personnel. ANSI standard C95.1-1974*. ANSI.
- [ans, 1982] (1982). *Safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 300 kHz to 300 GHz. ANSI standard C95.1-1982*. ANSI.
- [iee, 1999] (1999). *IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz, IEEE Std C95.1-1991 (1999 Edition)*. IEEE.
- [Alata et al., 2013] Alata, O., Olivier, C., and Pousset, Y. (2013). Law recognitions by information criteria for the statistical modeling of small scale fading of the radio mobile channel. *Signal Process.*, 93(5) :1064–1078.
- [ANFR, 2015] ANFR (2015). Protocole de mesure visant à vérifier sur site pour les stations émettrices fixes, le respect des limitations, en termes de niveaux de référence, de l'exposition du public aux champs électromagnétiques prévues par le décret numéro 2002-775 du 3 mai 2002. <https://www.anses.fr/fr/system/files/ANSES-Ft-ResumesProjetsPNREST2015.pdf>.
- [Beekhuizen et al., 2013] Beekhuizen, . J., Vermeulen, R., Kromhout, H., Bürgi, A., and ", A. H. (2013). Geospatial modelling of electromagnetic fields from mobile phone base stations. *Science of The Total Environment*, 445 :202–209.
- [Bouche and Molinet", 1994] Bouche, D. and Molinet", F. (1994). *Méthodes asymptotiques en électromagnétisme*, volume 16. Springer Science & Business Media.
- [Chen et al., 2003] Chen, T. J., Chuang, K. S., W, J., Chen, S. C., Hwang, I. M., and Jan, M. L. (2003). A novel image quality index using moran i statistics. *Physics in Medicine and Biology*, 48(8) :N131.
- [Cliff and k Ord, 1981] Cliff, A. D. and k Ord, J. (1981). *Spatial processes : Models and applications*. Pion Ltd, London.
- [Cliff and Ord", 1973] Cliff, A. D. and Ord", J. K. (1973). *Spatial autocorrelation*. London : Pion. Includes index.
- [Conil, 2005] Conil, E. (2005). *Propagation électromagnétique en milieu complexe du champ proche au champ lointain*. PhD thesis, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE.
- [COPIC, 2013] COPIC (2013). Diminution de l'exposition aux ondes électromagnétiques émises par les antennes relais de téléphonie mobile. Technical report, Le ministère de la santé, avec le concours du ministère du développement durable et du secrétariat d'État chargé de la prospective et du développement de l'économie numérique.
- [Corre and Lostanlen, 2009] Corre, Y. and Lostanlen, Y. (2009). Three-dimensional urban em wave propagation model for radio network planning and optimization over large areas. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(7) :3112–3123.
- [Corre et al., 2002] Corre, Y., Lostanlen, Y., and Helloco, Y. L. (2002). A new approach for radio propagation modeling in urban environment : Knife-edge diffraction combined with 2d ray-tracing. In *IEEE 55th Vehicular Technology Conference (VTC Spring 2002)*, volume 1, page 507–511.
- [COST, 1999] COST (1999). Digital mobile radio towards future generations systems. http://www.lx.it.pt/cost231/final_report.htm.

- [CSTB, 2016] CSTB (2016). *Le BIM sous l'angle du droit*. CSTB.
- [da Silva et al., 2008] da Silva, E. C., Silva, A. C., de Paiva, A. C., and Nunes, R. A. (2008). Diagnosis of lung nodule using moran's index and geary's coefficient in computerized tomography images. *Pattern Analysis and Applications*, 11(1) :89–99.
- [Gaudaire, 1997] Gaudaire, F. (1997). *Caracterisation de l'affaiblissement electromagnetique de composants du batiment*. PhD thesis, INPG GRENOBLE.
- [Gaudaire, 2015] Gaudaire, F. (2015). Système autonome de caractérisation de l'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences issus des stations de base de téléphonie mobile, hybridant acquisition collaborative sur smartphones et simulation numérique. <https://www.anses.fr/fr/system/files/ANSES-Ft-ResumesProjetsPNREST2015.pdf>.
- [Gaudaire et al., 2015] Gaudaire, F., Caudeville, J., Demaret, P., Wiart, J., and Person, C. (2015). Définition d'indicateurs pour la caractérisation de l'exposition radioélectrique. <https://www.anses.fr/fr/system/files/RSC121015-DossierParticipant.pdf>.
- [Ghanmi, 2015] Ghanmi, A. (2015). *Analyse de l'exposition aux ondes électromagnétiques des enfants dans le cadre des nouveaux usages et nouveaux réseaux*. PhD thesis, UNIVERSITE PARIS-EST MARNE-LA-VALLEE.
- [Huang et al., 2015] Huang, Y., Krayni, A., Hadjem, A., Wiart, J., Person, C., and Varsier, N. (2015). Comparison of the average global exposure of a population induced by a macro 3g network in urban, suburban and rural areas. In *Radio Science Conference (URSI AT-RASC), 2015 1st URSI Atlantic*, pages 1–1.
- [ITU, 2003] ITU (1992-2003). Attenuation in vegetation (question itu-r 202/3). Technical report, International Telecommunication Union.
- [Kay and Keller, 1954] Kay, I. and Keller, J. B. (1954). Asymptotic evaluation of the field at a caustic. *Journal of Applied Physics*, 25(7) :876–883.
- [Kouyoumjian and Pathak, 1974] Kouyoumjian, R. G. and Pathak, P. H. (1974). A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface. *Proceedings of the IEEE*, 62(11) :1448–1461.
- [Lô-Ndiaye et al., 2015a] Lô-Ndiaye, M. D. B., Noé, N., Combeau, P., Pousset, Y., and Gaudaire, F. (2015a). Analysis of electric field spatial variability in simulations of electromagnetic waves exposure to mobile telephony base stations. In *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pages 1–5.
- [Lô-Ndiaye et al., 2015b] Lô-Ndiaye, M. D. B., Noé, N., Combeau, P., Pousset, Y., and Gaudaire, F. (2015b). Analysis of electric field spatial variability in simulations of electromagnetic waves exposure to mobile telephony base stations. In *Radio Science Conference (URSI AT-RASC), 2015 1st URSI Atlantic*, pages 1–1.
- [Lee, 1985] Lee, W. C. Y. (1985). Estimate of local average power of a mobile radio signal. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 34(1) :22–27.
- [Levine, 2004] Levine, N. (2004). Crimestat ii : A spatial statistics program for the analysis of crime incident locations, levine & associates/the national institute of justice. Technical report, Ned Levine & Associates/the National Institute of Justice.
- [Ministère, 2009] Ministère (2009). Fiche 03 - comparaison des réglementations européennes. http://www.radiofrequences.gouv.fr/IMG/pdf/Comparaison_reglementations_UE.pdf.
- [Moran, 1950] Moran, P. A. P. (1950). Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika*, 37(1/2) :17–23.
- [Morency, 2006] Morency, C. (2006). Étude de méthodes d'analyse spatiale et illustration à l'aide de microdonnées urbaines de la grande région de montréal. Technical report, les Cahiers Scientifiques du Transport N° 49/2006 - Pages 77-102.
- [Nikonova, 1999] Nikonova, K. (1999). Status and implementation of russian hygienic radiofrequency standards. *Electromagnetic Fields : Biologic Effects and Hygienic Standardization. WHO/SDE/OEH/99.5. Geneva : World Health Organization*, pages 477–83.
- [Noé et al., 2013] Noé, N., Gaudaire, F., and Lô, M. D. B. (2013). Estimating and reducing uncertainties in ray-tracing techniques for electromagnetic field exposure in urban areas. In *Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), 2013 IEEE-APS Topical Conference on*, pages 652–655.

- [Noé et al., 2015] Noé, N., Gaudaire, F., Diarra Bousso Lo-Ndiaye, M., and Combeau, P. (2015). Toward a stand-alone monitoring system for mobile telephony base stations exposure using simulations and smartphones crowdsourcing. In *First URSI Atlantic Radio Science Conference*, Gran Canaria, Canary Islands, Spain.
- [OpenTURNS, 2012] OpenTURNS (2012). Open turns – wrappers guide. <http://www.openturns.org/>.
- [Osepchuk and Petersen, 2003] Osepchuk, J. M. and Petersen, R. C. (2003). Historical review of rf exposure standards and the international committee on electromagnetic safety (ices). *Bioelectromagnetics*, 24(S6) :S7–S16.
- [palm, 2002] palm, R. (2002). Macros minitable pour la régression linéaire. http://orbi.ulg.ac.be/bitstream/2268/81766/1/Macros_Minitab_r%C3%A9g._lin%C3%A9aire.pdf.
- [Paniagua et al., 2012] Paniagua, J. M., Rufo, M., Jiménez, A., Antolín, A., and Pachón, F. T. (2012). Estimation of uncertainties in electric field exposure from medium-frequency am broadcast transmitters.
- [Pereira et al., 2010] Pereira, C., Coq, G., Li, X., Pousset, Y., Olivier, C., Alata, O., Vauzelle, R., Arnaudon, M., and Combeau, P. (2010). Application of information criteria for the selection of the statistical small scale fading model of the radio mobile channel. *{AEU} - International Journal of Electronics and Communications*, 64(6) :521 – 530.
- [Pierce, 1981] Pierce, A. (1981). *An introduction to its physical principles and applications*. McGraw-Hill.
- [Pousset, 1999] Pousset, Y. (1999). *Optimisations pour la prédiction de zone couverture radioélectrique*. PhD thesis, UNIVERSITE DE POITIERS.
- [Prado, 2001] Prado, P., editor (2001). *Sensitivity Analysis in IctNeo*. CIEMAT.
- [Rejiba, 2002] Rejiba, F. (2002). *Modélisation de la propagation des ondes électromagnétiques en milieux hétérogènes - Application au Radar Sol* –. PhD thesis, UNIVERSITE PIERRE et MARIE CURIE.
- [Rouvière, 1997] Rouvière, J. F. (1997). *Calcul de la diffraction par des dièdres et des prismes diélectriques ou métalliques par la théorie uniforme de la diffraction*. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- [Royston, 1982] Royston, J. P. (1982). *An Extension of Shapiro and Wilk’s W Test for Normality to Large Samples*. Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics).
- [S, 1996] S, W. (1996). Finite-difference time-domain approach to underwater acoustic scattering problems. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 99(4) :1924–1931.
- [Saltelli, 1993] Saltelli, A. (1993). *Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models*. MMCE 1.
- [Saltelli et al., 2000] Saltelli, A., Chan, K., and Scott, E. M. (2000). *Sensitivity Analysis*. Springer Science and Business Media.
- [Slama, 1997] Slama, J. B. H. (1997). *Modélisation du rayonnement, électromagnétique des circuits, d’électronique de puissance. Application à un hacheur*. PhD thesis, ECOLE CENTRALE DE LYON.
- [V et al., 2016] V, H. K., T, V. R., A, N., and A, K. (2016). Finite difference time domain modelling of sound scattering by the dynamically rough surface of a turbulent open channel flow. *Applied Acoustics*, 110 :13–22.
- [Vermet, 2011] Vermet, M. (2011). *Simulation par l’acoustique géométrique en présence de surfaces courbes avec prise en compte de la diffraction*. PhD thesis, UNIVERSITE DE POITIERS.
- [Wiart, 2015] Wiart, J. (2015). Low emf exposure networks. <http://www.lexnet.fr/>.