

UNE TECHNIQUE D'ACCELERATION POUR LA PREDICTION DE ZONE DE COUVERTURE RADIOELECTRIQUE

P. Combeau, R. Vauzelle, L. Aveneau, Y.Pousset
Université de Poitiers - IRCOM-SIC UMR CNRS n°6615
Bât.SP2MI, Bd Marie et Pierre Curie, Téléport 2, BP 30179
86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex,
Téléphone : 5.49.49.65.67, Fax : 5.49.49.65.70,
e-mail : combeau@sic.univ-poitiers.fr

Mots clés : Couverture radio, Radiocommunication, Optimisation, Ondelettes, Propagation d'ondes.

Résumé

Cet article présente une méthode d'accélération du temps de calcul pour la prédiction de zones de couverture radiomobiles. Elle est réalisée par un logiciel d'analyse électromagnétique qui s'appuie sur l'hypothèse que l'environnement peut être partitionné en éléments, caractérisés chacun par un comportement stationnaire du niveau de puissance reçue. Ainsi, le calcul optimisé de la zone de couverture s'obtient en appliquant un modèle de propagation dans chacun de ces éléments de la partition sur seulement un ou deux points et d'extrapoler le niveau estimé à l'élément tout entier.

1. CONTEXTE

Pour un site géographique, la technique classique de calcul de la zone de couverture d'un émetteur consiste à appliquer un modèle de propagation vectoriel ou scalaire des ondes électromagnétiques en différentes positions définies selon un pas spatial constant. Ce pas est généralement de quelques mètres en milieu urbain. Toutefois, cette méthode conduit à un temps de calcul très important voire prohibitif dans certains contextes.

Ainsi, la technique proposée d'accélération en temps de calcul pour la prédiction de la zone de couverture radioélectrique repose sur l'hypothèse précisée dans le paragraphe 2. Elle permet d'appliquer un modèle de propagation sur quelques points seulement de l'environnement, contrairement aux méthodes de prédiction classiques.

Pour vérifier cette hypothèse et ainsi pouvoir appliquer notre méthode d'optimisation, il est nécessaire de disposer de deux outils présentés dans le paragraphe 3. Le

Abstract

This paper presents a method to accelerate the calculation times for radiomobile coverage prediction. It is based on an software of electromagnetic analyse which shares the environment into several parts which are characterised by a particular combination of electromagnetic interactions such as reflexion and diffraction. Each elements of the partition is homogeneous in term of reception level. So, to calculate the coverage, it is enough to set a propagation model in each element of partition on only one or two points and to extrapolate the level being estimated in all elements.

premier est un outil de segmentation reposant sur les maxima d'ondelettes. Il permet de détecter des changements de comportement des signaux mesurés par un récepteur mobile. Le deuxième outil, cœur même de la technique d'accélération, est un logiciel d'analyse électromagnétique développé au laboratoire qui met en œuvre les mécanismes de propagation inhérents à l'environnement et à la position de l'émetteur.

Le processus permettant de vérifier notre hypothèse est ensuite décrit en s'appuyant sur un exemple simple. Enfin, nous présentons l'organigramme de notre méthode d'optimisation et une évaluation des performances est fournie dans des configurations de type petite et micro cellules.

2. HYPOTHESE

Sur la base d'analyse de nombreux signaux radioélectriques acquis lors de campagnes de mesures et compte tenu de la modélisation des phénomènes physiques, la méthode s'appuie sur l'hypothèse suivante :

Hypothèse : Les variations d'un signal radioélectrique, reçu par un récepteur mobile sur un parcours, sont homogènes pour une même combinaison d'interactions électromagnétiques (l'onde en visibilité, lorsqu'elle existe, doit être intégrée à la combinaison).

Ainsi, l'ensemble des points pour lesquels le signal reçu résulte d'une même combinaison d'interactions électromagnétiques conduit à délimiter une région de l'environnement dans laquelle la dynamique et le niveau moyen du signal varient peu. Nous en déduisons alors que la zone géographique étudiée est une partition spatiale composée de différents éléments dans lesquels le signal reçu a un comportement homogène. Passer d'un élément à un autre revient donc à considérer des signaux dont la « forme » change.

La figure 1 permet d'illustrer cette hypothèse sur un exemple schématique.

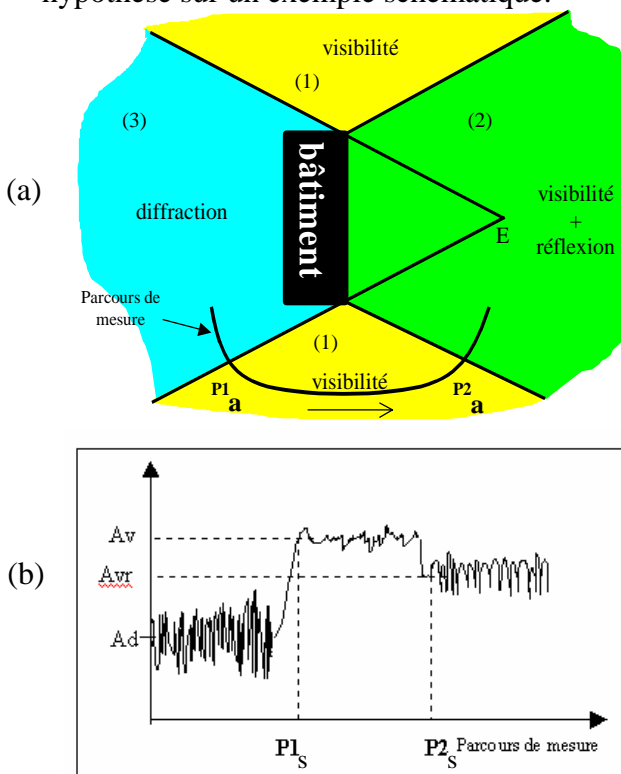


Figure 1:(a) Partition spatiale - (b) Signal schématique reçu sur le parcours de mesure

En considérant la position de l'émetteur par rapport au bâtiment comme l'illustre la figure 1.(a), l'application des lois physiques [Pouss99] associées à la propagation des ondes fait apparaître différentes régions caractérisées chacune par une combinaison d'interactions électromagnétiques : (1) visibilité, (2) visibilité et réflexion, (3) diffraction. Un récepteur

mobile, effectuant le parcours schématisé sur cette figure, va traverser ces différentes régions de la partition et ainsi recevoir un signal présentant des fluctuations (Figure 1.(b)). En effet, à chaque région est associée une combinaison particulière d'interactions électromagnétiques induisant, selon l'hypothèse formulée, un comportement spécifique du signal.

Ainsi, on constate aux points P_{1a} et P_{2a} situés sur le parcours, des changements significatifs de la forme du signal reçu traduisant les limites des différents éléments composant la partition spatiale ($P_{1a}=P_{1s}$, $P_{2a}=P_{2s}$).

Compte tenu de cette hypothèse, pour optimiser le temps de calcul de la zone de couverture, il devient alors possible d'appliquer un modèle de propagation sur seulement quelques points de chaque élément, et d'extrapoler le résultat à l'élément tout entier contrairement à la technique classique où le modèle est appliqué selon un pas spatial constant.

Deux outils sont nécessaires à la vérification de cette hypothèse : une technique permettant de détecter les changements de forme des signaux acquis sur des parcours prédéfinis et une analyse électromagnétique de l'environnement de propagation.

3. LES OUTILS

3.1. Segmentation par maxima d'ondelettes

Les maxima d'ondelettes constituent une transformée en ondelettes particulière fondée sur l'analyse multi-échelle et la théorie des bancs de filtres [TdS]. A chaque échelle correspond une bande de fréquences particulière ; ainsi une montée en échelle correspond à une descente en fréquences. Sonder les basses fréquences du signal revient alors à le lisser. La fonction lissant le signal et permettant ainsi de calculer l'échelle suivante est appelée fonction d'échelle ($\zeta(d)$), où d est la variable spatiale.

Si l'ondelette $\psi^1(d)$ est définie comme la dérivée première de la fonction d'échelle, les extrema locaux de la transformée correspondent aux discontinuités du signal à

chaque échelle. Ces extrema sont appelés maxima d'ondelettes.

La fonction d'ondelette $\psi^1(d)$ est définie par :

$$\psi_e^1(d) = \frac{1}{e} \psi^1\left(\frac{d}{e}\right) \quad (1)$$

où $\psi_e^1(d)$ est la dilatation par le facteur d'échelle e de la fonction d'ondelette $\psi^1(d)$.

La transformée en ondelettes d'un signal $s(d)$ à l'échelle e peut s'écrire sous la forme :

$$W_e^1 s(d) = \left(e \frac{ds}{dt}\right) * \zeta_e(d) \quad (2)$$

En d'autres termes, la transformée en ondelettes $W_e^1 s(d)$ définie en (2) s'interprète comme une dérivation du signal suivie d'un lissage par la fonction $\zeta_e(d)$ à l'échelle e . Plus l'échelle est grande, plus la convolution avec $\zeta_e(d)$ fait disparaître les petites fluctuations ou variations rapides, les extrema sont alors dus aux variations lentes du signal.

Soulignons que les signaux étudiés étant discrets, la transformation en ondelettes doit, elle aussi, être discrète. Pour permettre un calcul numérique rapide, il est imposé à l'échelle de varier selon la séquence dyadique $(2^j)_{j \in \mathbb{Z}}$, ([Mey90]) tel que :

$$W_{2^j}^1 s(d) = \left(2^j \frac{ds}{dt}\right) * \zeta_j(d) \quad (3)$$

Il en résulte que :

- ◆ Pour des discontinuités, les maxima d'ondelettes augmentent lorsque j augmente c'est à dire lorsque l'échelle devient plus grande.

- ◆ Pour des singularités (Dirac), les maxima d'ondelettes diminuent lorsque j augmente.

A travers les échelles, l'étude des maxima permet d'évaluer la régularité du signal et par conséquent son comportement spatial.

La figure 2 présente un exemple de décomposition sur 9 échelles obtenu par maxima d'ondelettes (figure 2(b)) pour un signal simulé (figure 2(a)).

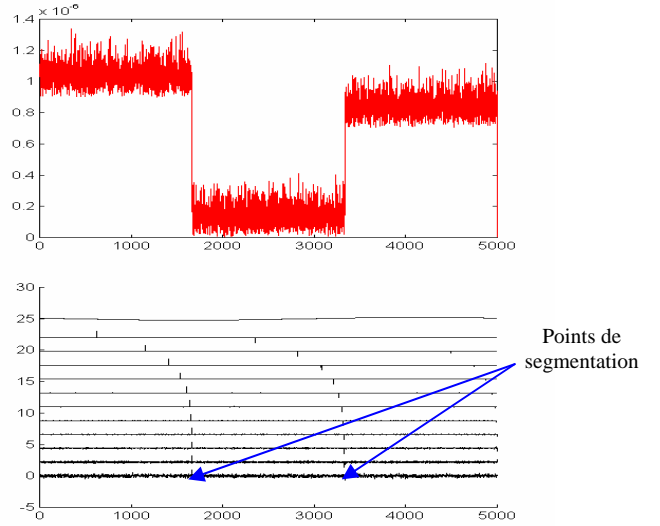


Figure 2 : (a) Signal simulé – (b) Segmentation d'un signal sur 9 échelles

Concrètement, cette représentation en maxima d'ondelettes contient les positions et les valeurs des maxima locaux de $W_j s(d_j)$ pour chaque échelle.

À l'échelle des hautes fréquences, les discontinuités correspondent à l'ensemble des variations du signal. Au contraire, à l'échelle des basses fréquences, les discontinuités ne correspondent plus qu'aux variations lentes.

La méthode permettant de segmenter le signal ne prend donc en compte que les maxima à l'échelle des basses fréquences. Toutefois, cette composante ayant été plus ou moins filtrée, elle a subi un déphasage plus ou moins important. Les maxima ont donc également été décalés en position. Il est donc important, pour éviter ces erreurs de positions, de remonter fréquemment les positions de ces différents maxima. Autrement dit, il est important de trouver à l'échelle des hautes fréquences, qui ne subit pas de déphasage, la position des maxima considérés à l'échelle des basses fréquences. Il s'agit de l'étape de chaînage. Le procédé dit de chaînage est présenté sur l'exemple de la figure 2.(b) où les deux points de segmentation sont matérialisés par des flèches.

3.2. Analyse électromagnétique

L'analyse électromagnétique se décompose en trois étapes que sont la propagation des ondes, le partitionnement spatial de la zone géographique et le regroupement d'éléments ayant des caractéristiques physiques proches.

Chaque élément de la partition finale ainsi obtenue est caractérisé par une combinaison d'interactions (diffraction, réflexion et visibilité directe).

Bien que l'idéal aurait été de réaliser cette analyse en trois dimensions, nous avons choisi pour des raisons de facilité de construire trois modules indépendants : un s'appuie sur une étude dans un plan horizontale (2DH), un autre la situe dans un ensemble de plans verticaux (2DV) et le dernier (2.5D) consiste à fusionner les informations des deux premiers cas.

Quelle que soit la version considérée, le logiciel repose sur une recherche des frontières optiques qui consiste à déterminer les faces réfléchissantes et les arêtes diffractantes de l'environnement. Dans le cas d'une analyse dans un plan horizontal, les phénomènes de réflexion et de diffraction produisent les effets illustrés respectivement par les figures 3 et 4.

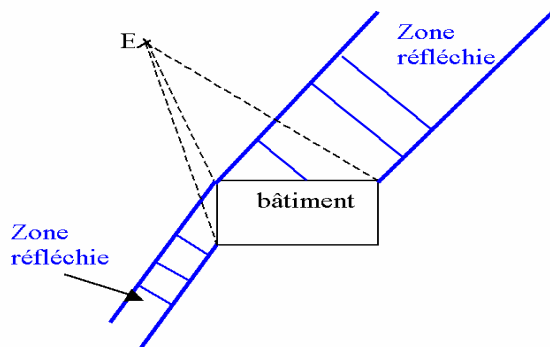


Figure 3 : zones réfléchies créées par un bâtiment

Comme le montre la figure 3, le bâtiment engendre des zones de réflexion lorsque des faces sont en visibilité directe de l'émetteur. Elles sont définies en respectant les lois de l'optique géométrique qui indique que l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

En ce qui concerne les zones diffractées, nous avons considéré comme nulle l'influence des rayons diffractés en dehors de la zone d'ombre. La figure 4 illustre ce principe dans le cas d'un bâtiment.

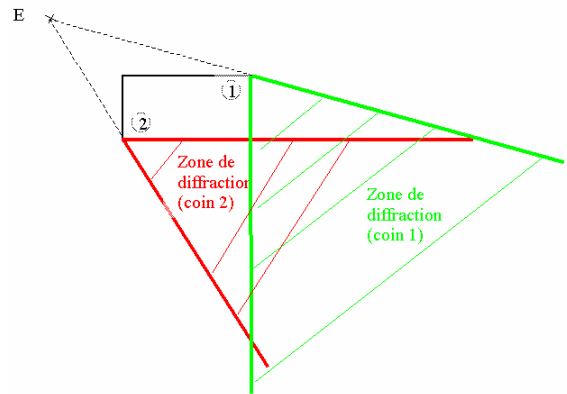


Figure 4 : zones diffractées créées par un bâtiment

Il faut noter qu'il y a alors superposition partielle de deux zones initiales de diffraction. En effectuant un parallèle avec une approche de type rayons, cela signifie qu'un récepteur situé dans cette zone de superposition recevrait deux trajets simplement diffractés.

En associant les phénomènes précédents de réflexion et de diffraction, dans le cas du même bâtiment, l'analyse électromagnétique fournit le résultat proposé sur la figure 5. Il s'agit d'une partition spatiale composée de dix éléments dont les couleurs permettent d'identifier la nature des interactions associées. A nouveau, il faut souligner des éléments définis par des superpositions de zones initiales tel que celui identifié comme étant produit par l'intersection d'une zone en visibilité directe et d'une zone de simple réflexion.

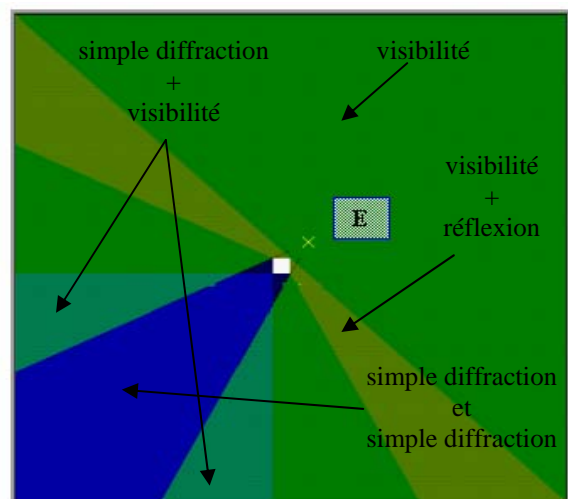


Figure 5 : les différentes zones produites par un bâtiment

L'étape de partitionnement permet de gérer cette superposition de zones en les découpant afin d'obtenir un ensemble de zones caractéristiques de toutes les couches possibles

de combinaisons d'interactions électromagnétiques.

Rappelons que l'objectif de l'analyse électromagnétique est de fournir une partition qui conduise à un calcul de couverture. Or, un tel calcul repose sur la détermination des variations lentes significatives des signaux reçus (§3.1). Aussi la partition ne doit être constituée que des éléments traduisant de telles variations. Il est donc indispensable d'établir un lien entre les combinaisons d'interactions identifiées par l'analyse électromagnétique et le niveau du signal qui pourrait être reçu dans les éléments de la partition comme l'illustre la figure 1. Cela nécessite de définir une hiérarchie entre l'influence des différentes interactions électromagnétiques afin de déterminer une combinaison prédominante, en termes de niveau énergétique reçu, pour chaque élément issue du partitionnement. Ainsi, sur la figure 5, l'élément identifié visibilité + réflexion sera finalement considéré comme étant un élément en visibilité. En effet, il correspond à des points recevant un trajet direct plus énergétique qu'un trajet réfléchi. Sur de telles considérations et après d'éventuels regroupements de zones contiguës ayant des caractéristiques identiques, la partition de la figure 5 se transforme finalement en celle représentée sur la figure 6.

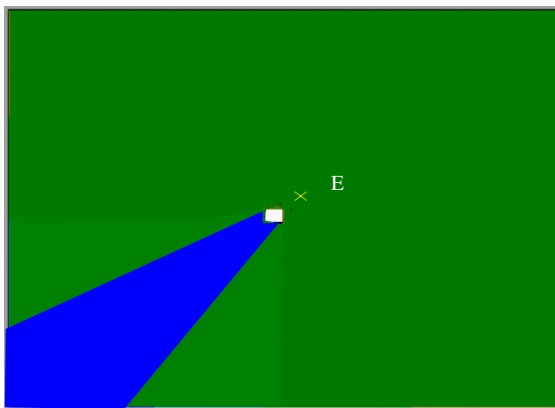


Figure 6 : partition résultante de l'analyse électromagnétique après regroupement.

Pour la version de l'analyse électromagnétique développée en vertical, la démarche suit le même principe mais est légèrement plus lourde à mettre en œuvre : précédemment, la partition issue d'une étude en horizontal était obtenue grâce à un seul plan horizontal. Dans le cas vertical, la partition doit traduire

l'influence des phénomènes de propagation qui ont agi dans des plans verticaux mais dont le résultat n'est observé qu'à la hauteur du récepteur ($H = 1.5\text{m}$). Cette partition est obtenue en associant les informations extraites à une hauteur de 1.5 m d'un grand nombre de plans verticaux ; dans chacun de ces plans, une étude semblable à celle réalisée dans le plan horizontal est effectuée. Cette démarche est illustrée par les figures 7.(a), 7.(b).

La figure 7.(a) illustre le balayage de l'environnement étudié par une succession de plans verticaux notés (1), (2), La technique retenue consiste à choisir un pas angulaire constant comme le montre la figure.

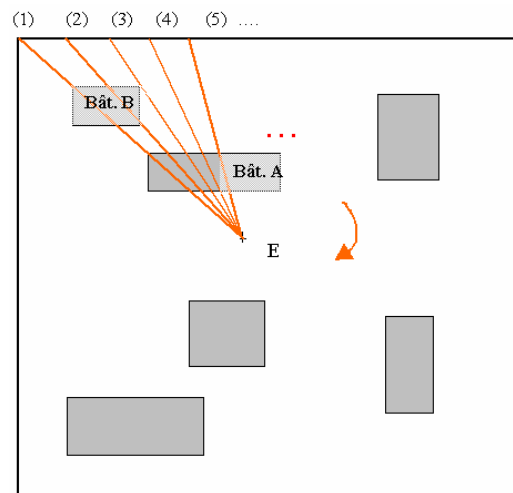


Figure 7-(a) : balayage régulier de l'environnement par plan verticaux

Ensuite, dans chaque plan vertical précédent, une analyse électromagnétique est réalisée comme dans un plan horizontal. Pour la coupe notée (1) de la figure 7.(a) qui intersecte deux bâtiments, la figure 7.(b) illustre une telle analyse dans le cas où seul le phénomène de simple diffraction est considéré.

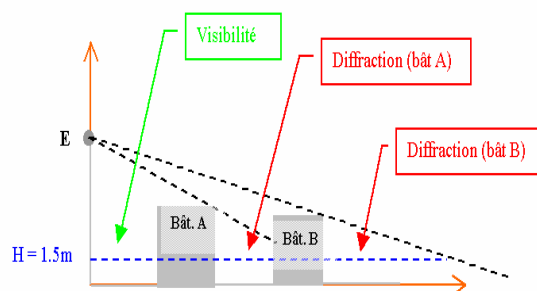


Figure 7-(b) : analyse électromagnétique dans un plan vertical(cas d'une diffraction)

Il reste à extraire l'information à 1.5 m au dessus du sol sur toute la longueur du profil, et ce pour l'ensemble des profils verticaux balayant la zone géographique étudiée. Il est ainsi obtenu une partition de l'environnement issue de l'étude en vertical dont le résultat est du même type avec celui produit par une analyse horizontale.

Comme pour l'analyse électromagnétique en horizontal, il faut noter qu'ici aussi dans le cas d'éléments créés par superposition de zones initiales, le principe de hiérarchie des interactions est appliqué, puis suivi d'éventuels regroupements d'éléments contigus de même caractéristique.

Concernant la version de l'analyse électromagnétique réalisée en 2.5D, la partition résulte de la fusion des partitions horizontale et verticale sur laquelle il aura été appliqué la hiérarchisation des interactions et le regroupement des éléments contigus.

Quelle que soit la version considérée, le logiciel d'analyse électromagnétique a comme informations d'entrée des données caractérisant l'environnement de propagation. Ce dernier est défini par des bases de données, fournissant en 3D le sol et le sursol, établies par l'Institut Géographique National (I.G.N.). En outre, il est paramétré par le nombre et la nature des interactions électromagnétiques (diffraction et réflexion) pris en compte pour le calcul de la partition. Par exemple, les figures 5 et 6 ont été obtenues en considérant une diffraction et une réflexion. Ces paramètres sont essentiels car ils interviennent directement sur la finesse de la partition. Considérer des combinaisons complexes d'interactions revient à déterminer une partition constituée d'un grand nombre d'éléments. Comme le schématise la Figure 1.(b), il est estimé que les paramètres sont corrects si le signal reçu sur un parcours de mesures présente des changements significatifs de variations au voisinage des frontières des éléments de la partition spatiale.

Cette identification des paramètres est au cœur de la vérification de notre hypothèse pour l'optimisation de la prédiction de zone de couverture. Cette identification fait l'objet du paragraphe suivant.

4. VERIFICATION DE L'HYPOTHESE

L'objet de ce paragraphe est de vérifier expérimentalement la validité de l'hypothèse formulée dans le paragraphe 2 qui est la base de notre méthode d'optimisation pour la prédiction de zone de couverture. Rappelons que cette hypothèse est qu'il existe une corrélation très forte entre les variations lentes de signaux mesurés sur le terrain et les mécanismes de propagation des ondes radioélectriques. La technique utilisée pour valider cette hypothèse consiste à vérifier, sur un grand nombre de signaux, que la segmentation fournie par notre algorithme (§ 3.1) correspond effectivement à la partition spatiale obtenue par le logiciel d'analyse électromagnétique (§ 3.2).

Pour présenter cette technique dont l'organigramme est proposé sur la figure 8, un exemple simple est traité en détail.

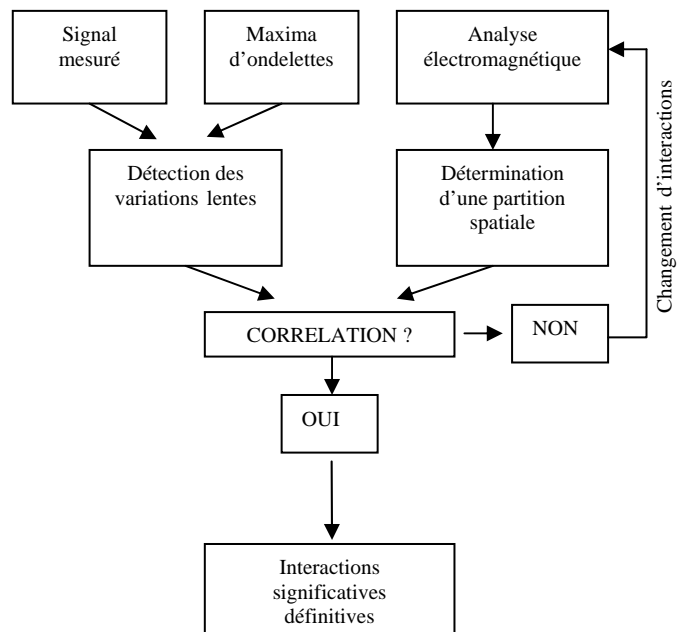


Figure 8 : organigramme de la phase de validation de l'hypothèse pour un parcours de mesure

Considérons le signal de la figure 10 mesuré dans le quartier de l'étoile à Paris, sur le parcours présenté sur la figure 9, à une fréquence de 932 MHz. Ce signal a subi ensuite un calcul de champ médian sur une fenêtre glissante de 10 longueurs d'ondes, ce qui correspond à une période d'acquisition spatiale de 3m.



Figure 9 : parcours de mesure étudié

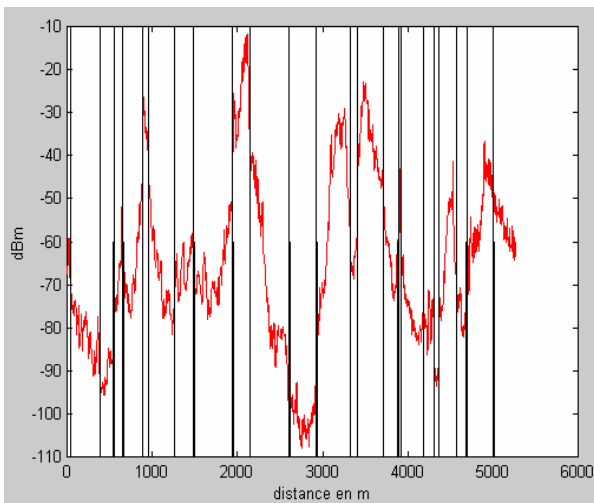


Figure 10 : signal mesuré et résultat de la segmentation (traits noirs)

Nous lui appliquons alors l'algorithme de segmentation qui repose sur l'opération de chaînage des maxima d'ondelettes. Rappelons que celle-ci consiste à déterminer la position exacte des maxima d'ondelettes en partant d'une échelle grossière (figure 2.b) vers l'échelle la plus fine. Ainsi le choix de l'indice de l'échelle grossière est un paramètre important de l'algorithme. En effet, si une échelle trop fine est choisie pour initialiser le chaînage des maxima, des ruptures non significatives du signal seront retenues et il ne sera pas possible d'associer à certaines d'entre elles des changements notables de combinaisons d'interactions électromagnétiques. A l'opposé, si une échelle trop grossière est choisie, il y a le risque de ne pas prendre en compte des modifications significatives de combinaisons d'interactions.

Une étude statistique a conduit à l'élaboration d'un critère permettant d'identifier l'échelle optimale pour notre application. Il repose sur la stabilité des intervalles segmentés par rapport à la dispersion du signal total ce qui est traduit par le rapport σ_i/σ_s (σ_i : écart type de l'intervalle considéré et σ_s : écart type du signal entier).

Les traits verticaux noirs sur la figure 10 traduisent le résultat de la segmentation appliquée sur le signal mesuré. Il est ensuite nécessaire d'identifier les paramètres du logiciel d'analyse électromagnétique (nombre et nature des interactions électromagnétiques) permettant d'obtenir une partition correcte par rapport à la segmentation du signal mesuré. La figure 11 présente le résultat de la partition du site de la figure 9 obtenue par le logiciel pour 2 diffractions et 1 réflexion.

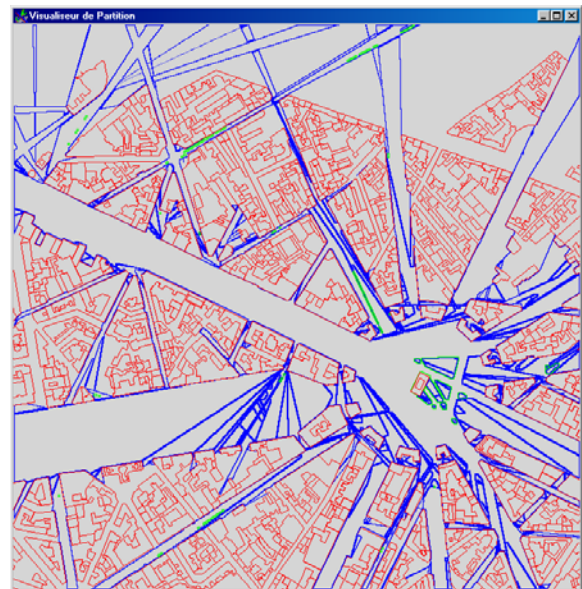


Figure 11 : partition obtenue pour une réflexion et deux diffractions et leurs combinaisons

Le nombre d'éléments de partition étant assez élevé il est difficile à première vue de déterminer si les changements de zones correspondent bien aux ruptures détectées sur le signal de mesure. A cette fin, nous avons établi deux critères.

-Le premier critère est défini comme suit : si N_1 est le nombre de segments donnés par l'algorithme de segmentation du signal de mesure par maxima d'ondelettes, et N_2 le nombre d'éléments de partition issus du logiciel électromagnétique traversés par le parcours de mesure, alors notre critère est

$$C_1 = \frac{|N_1 - N_2|}{N_1}$$

-Le deuxième critère repose sur l'exploitation de la fonction de répartition de l'erreur de position entre les points de changement d'éléments de partition le long du parcours de mesure et les points issus de la segmentation par maxima d'ondelettes du signal mesuré.

Plus simplement, en prenant l'exemple des figures 1.a et 1.b, ce critère traduit l'erreur de position entre les couples de points P_{1a} - P_{1s} et P_{2a} - P_{2s} .

Une première information significative à tirer de cette fonction de répartition est sa valeur médiane notée C_2 .

Pour l'exemple donné en figure 9 les résultats de nos deux critères sont les suivants :

$$C_1 = 4,16 \%$$

$$C_2 = 6 \text{ m}$$

Ces résultats indiquent donc une très forte corrélation entre la segmentation par maxima d'ondelettes du signal mesuré et le logiciel d'analyse électromagnétique paramétré correctement (1 réflexion et 2 diffractions). En effet, pour une erreur sur le nombre de segment de 4.16 % seulement, la moitié des points de changements d'éléments de partition ont une erreur de position inférieure à 6m.

Pour donné tout son sens à ce résultat, précisons que la précision des données de terrain est de 2m et que le pas spatial du signal mesuré est de 3m.

La dernière étape de notre méthode est le calcul effectif de la zone de couverture. Une étude préalable [Comb2001] a montré qu'il suffit d'appliquer un modèle de propagation sur seulement un point dans les zones en visibilité et d'extrapoler le niveau sur la zone entière par la formule d'atténuation en espace libre. Pour les autres zones, le modèle est appliqué sur deux points et on attribue le niveau estimé à toute la zone.

Il en résulte donc un gain en temps de calcul directement proportionnel au nombre de points sur lesquels est appliqué le modèle de propagation.

Finalement sur notre exemple, un calcul classique de couverture conduirait à appliquer

le modèle de propagation sur 38411 points, en considérant un pas spatial constant de 5m, alors que notre méthode réduit celui-ci à 1164. Il apparaît donc un gain en temps de calcul égal à 33.

La qualité de la couverture ainsi obtenue, en terme de précision, est alors satisfaisante. Toutefois il faut noter qu'elle est directement liée aux nombres d'interactions (réflexion et diffraction) passées en paramètres du logiciel d'analyse électromagnétique. Une étude complète sera proposée lors de la présentation.

5. CONCLUSION

Nous avons montré que notre méthode visant à optimiser un calcul de zone de couverture en terme de temps de calcul nous donne des résultats encourageants par rapport à la méthode de calcul classique.

En effet, sur l'exemple détaillé dans cet article, un gain en temps de calcul égal à 33 a pu être obtenu. Toutefois, il est crucial de valider statistiquement les performances de notre méthode sur un nombre conséquent de mesures réalisées dans différents types de configurations géographiques.

6. REFERENCES

- [TdS] CARRE (P.)-« Segmentation de signaux par maxima d'ondelettes : application à la prédiction de zones de couverture radioélectrique », Revue Traitement du Signal, 18 pages, n°11, 2001.
- [Mey90] MEYER (Y.)-« Ondelettes et Opérateurs I », Hermann, 1990.
- [Pouss99] POUSET (Y.)-« Optimisations pour la prédiction de zones de couverture radioélectrique », mémoire de thèse.
- [Comb2001] COMBEAU (P.)-« Contribution à l'optimisation de la zone de couverture d'un émetteur dans le domaine des radiocommunications mobiles », rapport de DEA.

7. REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié du soutien financier de FTR&D de Belfort dans le cadre du contrat n°01 1B 323.