

# Validation de la méthode de prédiction de couverture radio MR-FDPF.

Katia Runser, Philippe Buhr, Guillaume de la Roche et Jean-Marie Gorce.

*Projet ARES - INRIA, Laboratoire CITI, INSA de Lyon, 20 av. Albert Einstein, F-69621 CEDEX, Villeurbanne, France  
katia.runser@insa-lyon.fr; jean-marie.gorce@insa-lyon.fr*

---

Dans cet article nous présentons l'approche utilisée pour valider les résultats de la méthode de prédiction de couverture MR-FDPF. Cette méthode permet de prédire des cartes de couverture radio indoor en deux dimensions. Elle est basée sur la résolution des équations de ParFlow qui résultent de la discrétisation des équations de Maxwell. Le calcul de couverture se fait à partir d'une représentation discrétisée d'un étage d'immeuble et prend en compte les indices et coefficients d'absorption des matériaux présents dans l'environnement. Pour diminuer la charge algorithmique de la méthode, une fréquence de simulation inférieure à la simulation réelle est utilisée. Pour compenser les simplifications dues à la représentation en 2D et au choix de la fréquence de simulation, nous avons choisi de relaxer les paramètres des matériaux (indices et coefficients d'absorption). Ainsi, nous avons défini un problème d'optimisation aux moindres carrés qui vise à trouver le jeu de paramètres optimaux minimisant l'écart quadratique moyen entre des mesures réelles et les prédictions obtenues avec la méthode MR-FDPF. Nous avons choisi de résoudre ce problème par l'algorithme d'optimisation globale DIRECT. Les résultats obtenus sont présentés et analysés dans cet article.

**Keywords:** Prédiction de couverture Indoor, ParFlow, MR-FDPF, Wireless LAN, Optimisation, Moindres carrés, algorithme DIRECT.

---

## 1 Introduction

Le développement croissant des réseaux locaux sans fils a mis en évidence le besoin de mettre en place des outils de prédiction de couverture radio précis et performants. Des outils de prédiction basés sur des modèles empiriques ou sur du lancer de rayon existent déjà. Les méthodes empiriques [2] prédisent des cartes de couvertures souvent peu fiables, notamment dans des environnements clos. Les méthodes de lancer de rayon sont bien plus efficaces, particulièrement si elles utilisent le modèle UTD [1] qui permet de prendre en compte le phénomène de diffraction. Mais le nombre de réflexions et de diffractions qui surviennent dans un environnement clos est très important et impose un compromis entre la qualité de la simulation et le temps de calcul. Ce compromis se traduit par le choix du nombre maximal de rayon émis et de réflexions par rayon autorisées. Les méthodes discrètes ont été très peu utilisées du fait de leur coût de calcul important. Pourtant, les estimations obtenues avec de telles méthodes sont réalistes et fiables.

Compte tenu de ce constat, nous avons choisi de mettre en place une nouvelle méthode discrète nécessitant une puissance de calcul moindre. Cette méthode, la méthode "adaptative Multi-Resolution FDPF", permet d'estimer la puissance moyenne reçue dans un environnement à deux dimensions à différentes résolutions. L'originalité de la méthode réside dans la mise en place d'une structure multi-résolution, que nous dédions sous le terme de pyramide, calculée dans une phase de pré-traitement. Dans cette phase, les caractéristiques de l'émetteur n'interviennent pas, seule la connaissance de l'environnement est nécessaire. Le calcul de la puissance moyenne du champ émis se fait dans une phase de propagation qui exploite la pyramide. Cette pyramide permet de calculer des cartes de couvertures à différentes résolutions.

Pour obtenir des temps de calcul intéressants, il est nécessaire de travailler à une fréquence de simulation plus faible que la fréquence réelle. Pour compenser les simplifications dues à ce choix et à la simulation en 2 dimensions d'un phénomène en 3 dimensions, nous avons choisi de ne pas fixer les paramètres de propagation des matériaux (indices de réfraction  $n$  et coefficients d'affaiblissement  $\alpha$ ) et de les interpréter comme des variables pour obtenir des simulations réalistes. Ainsi, nous proposons ici un processus d'identification des paramètres des matériaux à partir de mesures effectuées sur le terrain. Il est difficile de connaître

les paramètres théoriques pour tous les matériaux utilisés dans un bâtiment, plus particulièrement quand ces matériaux sont des matériaux composites. Le processus d'identification peut être utilisé pour obtenir les paramètres de ces matériaux sans avoir à effectuer des mesures complexes de permittivité et de conductivité.

Pour déterminer un jeu de paramètres optimaux, nous minimisons l'écart quadratique moyen entre la puissance mesurée et la puissance estimée remise à l'échelle en un nombre fini de points. Le critère d'optimisation a été formulé comme un processus aux moindres carrés. L'analyse de la difficulté du problème nous a mené à choisir un algorithme d'optimisation globale dénommé DIRECT [6]. Cet algorithme recherche un optimum en alternant implicitement entre recherche globale et locale. Nous avons testé ce processus d'identification des paramètres après avoir réalisé un ensemble de mesures dans notre laboratoire. L'écart-type moyen sur ces mesures est de 3.2 dB/Points. Après avoir identifié le jeu de paramètres, nous arrivons à estimer la puissance reçue au niveau des points de mesure avec une erreur de 2.14 dB/points, ce qui est inférieur aux variations locales de mesure.

Cet article présente brièvement dans la partie 2 le principe de la méthode MR-FDPF, puis décrit plus particulièrement le problème d'identification des paramètres de propagation des matériaux dans la partie 3. La partie 4 précise les raisons qui ont mené au choix de l'algorithme d'optimisation. Cette partie présente par la suite l'algorithme DIRECT. Les résultats sont présentés dans la partie 5.

## 2 La méthode 'Adaptive Multi-Résolution FDPF'.

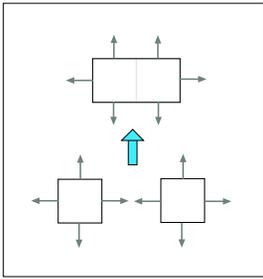


FIG. 1: Regroupement par Blocs.

Une première approche, la méthode "Fourier Domain ParFlow" (FDPF), a été présentée dans [3]. Une amélioration de celle-ci, la méthode "adaptive Multi-Resolution FDPF" présentée ici, a été proposée en 2003 dans [4]. Ces algorithmes ont pour point de départ l'approche ParFlow proposée en 1997 par Chopard et al. [5] développée dans le contexte de la planification GSM. Cette approche temporelle discrète, similaire aux méthodes TLM utilisées dans le développement de circuits électroniques, reflète fidèlement la propagation des ondes électro-magnétiques mais nécessite une puissance de calcul importante.

La méthode temporelle simule le champ émis par une source placée en un point appartenant à une grille discrète recouvrant l'environnement de test. Chaque unité de grille est définie ci-après par le terme 'bloc'. Dans cette méthode, le champ électrique est décomposé en 5 composantes, les flux, qui sont propagés de proche en proche à l'aide de matrices de propagation (Transmission Line Matrices) dérivées des équations de Maxwell. Dans [3], le problème a été formulé dans le domaine de Fourier. Ici, le calcul du champ émis par une source se fait par la résolution de l'équation 1.

$$\underline{\mathbf{F}}(\mathbf{v}) = \underline{\mathbf{\Omega}} \cdot \underline{\mathbf{F}}(\mathbf{v}) + \underline{\mathbf{S}}(\mathbf{v}) \quad (1)$$

$\underline{\mathbf{F}}(\mathbf{v})$  est le vecteur contenant tous les flux de l'environnement, c.à.d. les 5 flux de chaque bloc.  $\underline{\mathbf{S}}(\mathbf{v})$  et  $\underline{\mathbf{\Omega}}$  sont respectivement le vecteur donnant la position des sources dans la grille et la matrice globale de diffusion 5-bande. Dans [4], on propose de résoudre ce système linéaire par une approche multi-résolution basée sur le regroupement par blocs (cf. fig. 1). Ce principe permet de définir une pyramide de blocs pour laquelle il est nécessaire de calculer des matrices de passage entre les différents niveaux. Ce calcul est réalisé dans la phase de pré-traitement et ne nécessite pas la connaissance de la position des sources.

Pour un calcul de couverture, une source est propagée jusqu'au sommet de la pyramide (cf. fig. 2) et les flux obtenus sont rétro-propagés vers le bas de la pyramide. Cette phase de propagation utilise les matrices de passage entre les niveaux calculées dans la

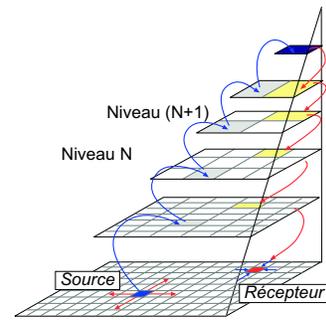


FIG. 2: La pyramide pendant la phase de propagation.

phase de pré-traitement. Il est possible d'arrêter la rétro-propagation à n'importe quel niveau de la pyramide et d'obtenir un niveau de puissance moyen pour chaque bloc. Ce niveau de puissance a un sens physique si le bloc n'est constitué que d'un unique matériau. Plus la résolution de propagation est fine, plus la taille des blocs est faible et plus le nombre de diffusions de flux est important. Donc plus on augmente la résolution de calcul, plus le temps de traitement est long.

D'après [5], pour une fréquence de simulation donnée, la taille des blocs à résolution maximale doit être inférieure à  $\lambda/6$ . Pour une fréquence de  $2.4\text{GHz}$ , on devrait travailler avec des blocs unitaires de taille inférieure à  $2 \times 2\text{ cm}$ . Pour réduire le nombre de blocs et donc le temps de traitement, on choisit de travailler à une fréquence de simulation inférieure à la fréquence réelle, multiple de celle-ci. Dans les résultats présentés ci-après, nous travaillons à une fréquence de simulation  $f_{sim} = 2.4 / 5 = 0.48\text{ GHz}$  avec  $\lambda_{sim} = 62.5\text{ cm}$ . La taille des blocs unités est de  $10\text{cm}$ .

Ainsi, l'obtention d'une carte pour un environnement de  $80 \times 18.4$  mètres dure 20s à la résolution la plus précise (cf. Fig 3-a) et 0.6s. à la résolution la plus grossière (la résolution des blocs homogènes - cf. Fig 3-b) où on calcule la puissance moyenne dans chaque pièce de l'étage. La phase de pré-traitement dure environ 1min avec un processeur à  $2.66\text{GHz}$  et  $512\text{Mo}$  de RAM.



FIG. 3: a - Carte de couverture à  $10\text{cm}$  de résolution ; b - Carte à la résolution des blocs homogènes.

### 3 Identification des paramètres des matériaux.

#### 3.1 Les paramètres $n$ et $\alpha$ .

L'indice de réfraction  $n$  et le coefficient d'absorption  $\alpha$  d'un matériau sont déterminés expérimentalement par la mesure de la permittivité électrique relative  $\epsilon_r$  et de la conductivité  $\sigma$ . La valeur de ces grandeurs physiques pour un même matériau dépend de la fréquence de l'onde, la température, l'hygrométrie et de la quantité d'eau présente dans le matériau. Ainsi ces grandeurs n'auront pas les mêmes valeurs pour le béton mouillé et le béton sec. Pour des matériaux conducteurs (métaux, ...), la perméabilité magnétique relative  $\mu_r$  n'est plus égale à 1 et doit être mesurée pour définir l'indice de réfraction ( $n = \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}$ ). Des résultats de mesures de ces paramètres sont donnés dans la littérature [7], mais si l'on ne connaît pas exactement le type de matériau utilisé dans une construction, il est difficile de choisir des valeurs pour  $n$  et  $\alpha$ . Dans [7], on trouve par exemple un indice de béton variant de 1.4 à 1.5 quand la fréquence varie de 3 à 24 GHz.

#### 3.2 Définition du problème d'identification.

Comme nous l'avons présenté dans la partie 3.1, il est complexe d'estimer les paramètres de propagation théoriques. Il est donc intéressant d'identifier ces paramètres à partir de mesures. De plus, cette identification permet de valider les résultats obtenus avec la méthode de prédiction MR-FDPF car elle compense les erreurs dues à l'approximation en 2 dimensions et au choix de la fréquence de simulation.

Cette identification se fait à partir d'un ensemble de mesures réalisées dans un bâtiment. On cherche ici à minimiser l'erreur quadratique moyenne entre la puissance mesurée et la puissance estimée remise à l'échelle. C'est un problème d'optimisation continue qui comporte  $(2N + 1)$  variables, avec  $N$  le nombre de matériaux. Ces variables se décomposent comme suit :

- 2 variables  $(n_i, \alpha_i)_{i \in [1..N]}$  par matériau,
- le facteur d'atténuation de l'air  $\alpha_{air}$  (compense l'approximation 2D de la propagation 3D).

Le critère à minimiser est défini dans l'équation (2). C'est un critère aux moindres carrés. Il représente l'erreur moyenne que l'on effectue pour chaque point de mesures. On l'exprime en dB/point.

$$f(S) = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^m \|\Psi_m(i) - (\Psi_s(i) + \Delta\Psi)\|^2}{m}} \quad (2)$$

S représente une solution composée des  $2N + 1$  variables.  $\Psi_m(i)$  et  $\Psi_s(i)$  sont les valeurs des puissances mesurées et simulées au  $i^{\text{ème}}$  point de mesure.  $\Delta\Psi$ , le facteur de mise à l'échelle des simulations, est donné par l'erreur relative moyenne dans l'équation (3).

$$\Delta\Psi = \frac{\sum_{i=0}^m (\Psi_m(i) - \Psi_s(i))}{m} \quad (3)$$

## 4 Processus de résolution.

### 4.1 Choix d'un algorithme.

La recherche exhaustive d'un jeu de paramètre n'est pas abordable au vu du nombre de variables. En effet, dans un bâtiment standard, il y a au moins 3 matériaux présents, ce qui implique la présence de 7 paramètres bornés. L'évaluation d'un jeu de paramètres nécessite un calcul de pré-traitement et un calcul de couverture. Une telle opération dure plus d'une minute, ce qui représente une durée importante. De plus, le critère d'optimisation n'est pas une fonction directe des paramètres des matériaux. Il est alors difficile d'analyser ses variations et on ne sait pas si la fonction est mono- ou multi-modale.

Pour ces raisons, l'utilisation d'un algorithme de descente (méthode des gradients ou de quasi-newton) a été exclue dans un premier temps. En effet, les méthodes de descente convergent vers un minimum local. Or nous cherchons un minimum global et nous ne savons pas si la fonction est convexe. De plus, l'évaluation du gradient en un point de la fonction n'est réalisable qu'en effectuant une estimation aux différences finies de celui-ci. Or, ceci nécessite une évaluation de fonction dans chaque direction du gradient, ce qui coûte cher en temps de calcul. C'est pourquoi nous avons opté pour des méthodes de recherche directe, qui ne nécessitent pas de calcul de pente.

Nous avons choisi une méthode de recherche directe dénommée 'DIRECT'. Cette méthode alterne implicitement entre recherche globale et recherche locale.

### 4.2 L'algorithme DIRECT.

DIRECT a été proposé par Jones et al. [6] en 1993 pour l'optimisation de fonctions à plusieurs variables dans un espace continu borné. Cet algorithme normalise l'espace de recherche dans un hypercube et évalue la solution qui se trouve au centre de ce cube. Par la suite, il évalue des solutions dans les plus grandes dimensions du problème et divise le cube en plus petits cubes en favorisant les zones où les évaluations sont faibles. A chaque itération, un sous-ensemble de cubes optimaux est sélectionné et le même processus de division est réalisé récursivement sur chaque bloc. La sélection des blocs optimaux est basé sur un compromis entre la taille et l'évaluation du centre d'un bloc. Ainsi, si l'on représente l'évaluation  $f$  du centre des blocs en fonction de la taille des blocs, on sélectionne les blocs qui se trouvent sur l'enveloppe convexe inférieure de cet ensemble. Ainsi, on sélectionne d'une part des petits blocs possédant une évaluation intéressante et d'autre part de grands blocs peu performants au sens du critère. Dans le premier cas, on se comporte comme un algorithme de recherche locale et dans le second comme une méthode de recherche globale.



FIG. 4: Localisation des points de mesure et des points d'accès.

## 5 Résultats.

Notre laboratoire (cf. fig 3) a servi d'environnement de test. 18 mesures ont été réalisées à l'aide de deux points d'accès et d'un ordinateur portable équipé d'une carte d'extension 802.11b. A chaque point

de mesure, la puissance moyenne sur une zone de  $1\text{m}^2$  a été mesurée pour les deux points d'accès. Un écart-type de  $3.2\text{dB}/\text{point}$  a été obtenu sur ces mesures. Cet environnement est composé de 3 matériaux : béton, cloison et une cloison extérieure composée de verre, de panneaux en métal et de plâtre. Le processus d'identification des paramètres a été appliqué au jeu de mesures relatif au premier point d'accès (cf. figure 4).

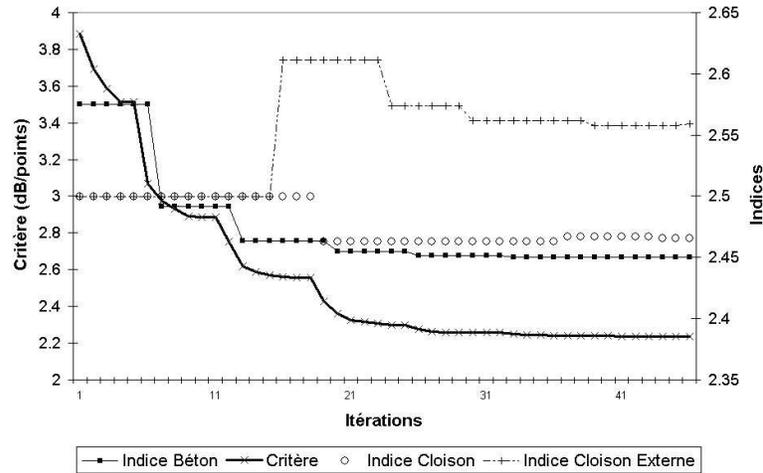


FIG. 5: Evolution des indices et du critère de coût.

Après optimisation, une solution admettant un minimum à  $2.25\text{ dB}/\text{point}$  a été trouvée. L'évolution du critère et des indices est représenté dans la figure 5. Nous avons alors observé que les paramètres  $\alpha_i$  des matériaux tendent tous vers 1. Ceci s'explique par la faible épaisseur des murs et donc le peu d'affaiblissement qu'ils induisent. En fixant ces paramètres à 1, nous avons obtenu une solution à  $2.14\text{ dB}/\text{point}$ . Les valeurs respectives des indices du béton, des cloisons et de la cloison externe obtenus sont de 2.496, 2.446 et 1.993. Ces valeurs sont proches des valeurs que l'on trouve dans la littérature. Nous avons testé ces valeurs avec le second jeu de mesures et nous avons obtenu une erreur de prédiction de  $2.5\text{ dB}/\text{point}$ . Au vu de l'écart-type que l'on observe au niveau des mesures, nous pouvons conclure qu'avec une erreur moyenne de prédiction de  $2.14\text{ dB}/\text{point}$  la méthode MR-FDPF est fiable. La convergence de l'algorithme DIRECT est longue mais permet d'obtenir une représentation du critère. Nous allons maintenant exploiter ces données pour pouvoir définir un algorithme plus efficace en terme de vitesse de convergence.

## Références

- [1] S.J. Fortune, "A beam-tracing algorithm for prediction of indoor radio propagation" in *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 1148, pp. 157-166, 1996.
- [2] S.Y. Seidel and T.S. Rappaport, "914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multi-floored buildings", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, February 1992.
- [3] J.M. Gorce and S. Ubeda, "Propagation simulation with the ParFlow method : fast computation using a multi-resolution scheme." in *IEEE 54th VTC*, Atlantic City, USA, October 2001.
- [4] J.M. Gorce, E. Jullo and K. Runser, "An adaptative multi-resolution algorithm for 2D simulations of indoor propagation" in *Proceedings of the 12th ICAP Conference*, Exeter, UK, vol. I, pp. 216-219, April 2003.
- [5] B. Chopard, P.O. Luthi and J.F. Wagen, "A lattice boltzmann method for wave propagation in urban microcells", *IEEE Proceedings of Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 144, pp. 251-255, 1997.
- [6] D.R. Jones, C.D. Perttunen and B.E. Stuckman, "Lipschitzian Optimization without the Lipschitz Constant", *J. of Optimization Theory and Applications*, vol. 79, pp. 157-181, October 1993.
- [7] S. Stavrou and S.R. Saunders, "Review of constitutive parameters of building materials" in *Proceedings of the 12th ICAP Conference*, Exeter, UK, vol. I, pp. 211-215, April 2003.