

Influence de la modélisation d'environnements indoor sur la caractérisation de canaux MIMO.

C.Pereira⁽¹⁾, Y.Chartois⁽¹⁾, Y.Pousset⁽¹⁾, R.Vauzelle⁽¹⁾

⁽¹⁾ Université de Poitiers,
Bât.SP2MI, Bd 3 Téléport 2, BP 179 - 86960 Futuroscope Cedex,
Téléphone : 05 49 49 65 67, Fax : 05.49.49.65.70
{pereira, chartois, pousset, vauzelle}@sic.sp2mi.univ-poitiers.fr

Résumé -

La modélisation des environnements est un facteur déterminant pour la prédiction de la propagation des ondes radio réalisée par une méthode à tracé de rayons 3D. Ce travail traite de l'influence de la finesse de la description d'environnements indoor sur la caractérisation de canaux MIMO (Multiple Input Multiple Output) simulés. Deux scènes sont considérées : la première est un milieu de type hall ; la seconde est un espace plus confiné de type couloir. Pour ces deux environnements, trois niveaux de description sont proposés pour définir leurs caractéristiques géométriques et électriques. Les résultats produits sont obtenus par analyse de l'évolution de la capacité du canal et de la corrélation entre les différentes liaisons radio en fonction de la polarisation, du caractère LOS ou NLOS des liaisons, de l'espacement entre antennes et du nombre d'antennes à l'émission et à la réception.

Mots clé - modélisation d'environnement, tracé de rayons 3D, polarisation, caractérisation du canal MIMO.

I. Introduction

Depuis quelques années, l'intérêt croissant pour les systèmes de transmission sans fil MIMO a entraîné de nombreux travaux sur la caractérisation du canal, tant du point de vue expérimentation que simulation [1] [2]. Dans le cas de la simulation, un des éléments clés est la modélisation de l'environnement de propagation.

En effet, des travaux antérieurs ont montrés cette influence dans le cas SISO [3]. En MIMO, une étude a déjà été réalisée pour analyser l'effet de murs hétérogènes sur la modélisation du canal MIMO à 900MHz [4]. Elle a montrée qu'il existe une différence notable entre une caractérisation issue de murs hétérogènes et celle provenant de murs homogènes.

Dans cet article, nous proposons une étude complémentaire, plus macroscopique, consistant à analyser l'impact d'une modélisation géométrique et électrique plus ou moins fine d'environnements indoor sur la caractérisation MIMO et ce, à une fréquence porteuse plus importante.

Deux scènes modélisées en 3D servent de support à notre étude. La première est un couloir entouré de pièces ; la

deuxième est un hall de dimensions plus importantes. Ces environnements sont modélisés selon trois niveaux de description allant de simples parallélépipèdes à des pièces plus finement décrites tant géométriquement qu'électriquement.

L'étude s'appuie sur un simulateur de propagation d'ondes électromagnétiques basé sur un tracé de rayons 3D optimisé [5] [6]. Ces optimisations visent à améliorer le temps de prédiction du comportement du canal tout en gardant des résultats conformes à la réalité. En effet, pour les simulations, la précision se fait souvent au détriment du temps de calcul. Ainsi, la pertinence des résultats obtenus réside dans la capacité à trouver un bon compromis entre le temps d'évaluation et la précision. Dans le même ordre d'idée, la question que l'on est en droit de se poser est la suivante : existe-t-il un niveau de description minimum requis permettant d'obtenir rapidement une caractérisation précise du canal radio ?

Les informations fournies par le simulateur sont utilisées par un logiciel de caractérisation [7] qui calcule les paramètres caractéristiques du canal en fonction de l'environnement étudié. L'analyse de ces résultats pour différentes conditions de transmission permet d'évaluer l'impact de la modélisation de l'environnement.

La suite de cet article se décompose comme suit : tout d'abord la section II décrit les outils de simulation et de caractérisation du canal de propagation MIMO. La section III présente les différents niveaux de description utilisés permettant de mettre en valeur les effets respectifs de la modélisation géométrique et électrique de l'environnement. Puis, dans la section IV, les différents contextes de simulations sont présentés. Ceux-ci sont liés aussi bien à la nature et à la polarisation des antennes ; qu'au caractère LOS ou NLOS de leur configuration. Enfin en section V, les résultats de l'évolution des paramètres caractéristiques du canal MIMO, en fonction de la modélisation de l'environnement et du contexte d'étude, sont analysés.

II. Modélisation et caractérisation du canal MIMO

A. Le simulateur de propagation d'ondes

La prédiction de la propagation des ondes se base sur une connaissance fine du canal radio électrique. Ce dernier est le support de transmission sans fil offrant la particularité, par

rapport aux supports de transmission guidée, de présenter un signal reçu résultant de la somme vectorielle induite par le phénomène de multi trajet. Ce dernier est dû aux interactions électromagnétiques (réflexion, diffraction et transmission) de l'onde avec l'environnement de propagation et provoque des interférences au niveau du signal reçu.

Un simulateur de propagation conçu au sein du laboratoire [5], nous permet de prédire le comportement de ce type de canal de manière déterministe. Il associe à un tracé de rayons 3D l'optique (OG) géométrique et la théorie uniforme de la diffraction (TUD). Ainsi, comme le montre le synoptique de la figure 1, ce logiciel prend en considération différentes informations d'entrée et de sortie. Les données d'entrée vont d'une description géométrique et électrique de l'environnement, au nombre d'interactions électromagnétiques, tout en définissant la nature, la position et la fréquence d'antennes. En sortie, nous retrouvons, entre autres, les réponses impulsionnelles et les angles d'arrivée en azimut et en élévation. C'est précisément de ces données que découle la caractérisation du canal MIMO.

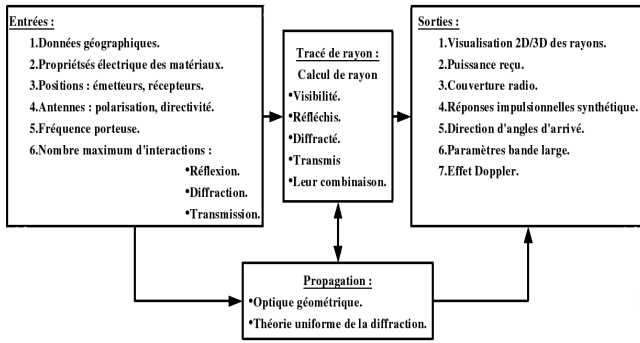


FIG. 1. Schéma de principe du simulateur de propagation d'onde.

B. La caractérisation du canal MIMO

À partir des informations fournies par le simulateur de propagation, un logiciel de caractérisation, également développé au laboratoire [7] permet de calculer et de visualiser les fonctions et paramètres caractéristiques du canal SISO et MIMO.

Dans cette section, nous ne nous attacherons qu'aux paramètres caractéristiques du canal MIMO. Ceux-ci correspondent à la corrélation entre les liaisons MIMO et à la capacité ergodique (associé au débit maximum). Ces deux paramètres dépendent de la matrice de canal définie dans la section suivante.

B.1. La matrice de canal MIMO

Cette matrice, notée H_{BE} , est de nature bande étroite. Elle est de dimension $N_r * N_t$, où N_r est le nombre d'antennes à la réception et N_t , le nombre d'antennes à l'émission. H_{BE} est définie par l'expression (1) :

$$H_{BE} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1N_t} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2N_t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r,1} & h_{N_r,2} & \cdots & h_{N_r,N_t} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Chacun de ses coefficients bande étroite h_{ij} , calculé pour chaque liaison $i,j \in [1, N_r; 1, N_t]$, résulte de la somme vectorielle de tous les trajets qui composent la réponse impulsionnelle complexe de la liaison considérée.

B.2. La corrélation

Deux notions importantes doivent être distinguées : la matrice de corrélation et le critère de corrélation. La matrice de corrélation est définie de la manière suivante :

$$C_{H_{BE}} = E\{vec(H_{BE}).vec(H_{BE})^H\} \quad (2)$$

Où $E\{\cdot\}$ est l'expression de l'espérance mathématique ; $vec(\cdot)$ l'opérateur « mise en colonne » et $(\cdot)^H$ l'opérateur hermitien. Cette matrice de corrélation a pour dimension celle de la matrice H_{BE} élevé au carré.

Bien que cette dernière tienne compte du degré de ressemblance entre les différentes liaisons, elle n'est pas normalisée. C'est la raison pour laquelle on introduit la notion de critère de corrélation. Ce dernier est défini par la matrice de variance-covariance [8] des coefficients de la matrice canal H_{BE} . Il correspond, ainsi, à la matrice de corrélation normalisée par les variances. Ce critère noté ρ s'exprime par :

$$\rho = \frac{cov(X,Y)}{\sqrt{var(X).var(Y)}} \quad (3)$$

Avec X et Y représentant les h_{ij} de H_{BE} .

B.3. La capacité

La capacité est le second paramètre important pour l'évaluation des performances des canaux MIMO. En effet, elle permet de connaître la quantité maximale d'information en bit/s/Hz qu'il est possible de transmettre sur un canal de propagation et reçu avec une probabilité d'erreur nulle [9]. Dans le cas où les puissances des antennes émettrices sont identiques, cette capacité [10] est définie, par l'équation suivante :

$$C = E\{\log_2(det(I_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} \cdot (H_{BE} H_{BE}^H)))\} \quad \text{pour } N_r \leq N_t \quad (4)$$

Où ρ est le RSB (Rapport Signal à Bruit) et I_{N_r} est une matrice diagonale de dimensions $N_r * N_r$.

Dans le cas où le nombre d'antennes réceptrices devient strictement supérieur au nombre d'antennes émettrices l'expression (4) devient :

$$C = E\{\log_2(det(I_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} \cdot (H_{BE}^H \cdot H_{BE})))\} \quad \text{pour } N_r > N_t \quad (5)$$

C. La caractérisation semi-déterministe

L'évaluation de la caractérisation du canal MIMO se fait, dans notre contexte d'étude, au travers de l'association du simulateur et du logiciel de caractérisation tel que le montre la figure 2.

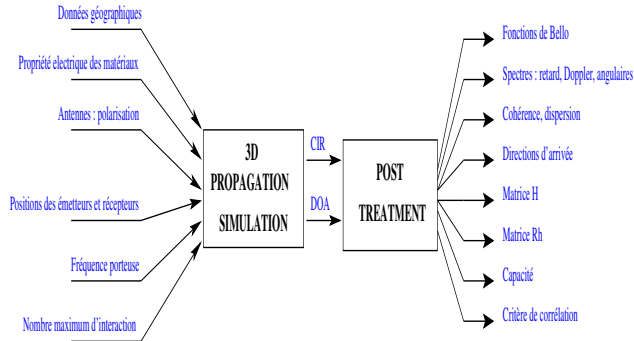


FIG. 2. Association du simulateur de propagation d'onde et du logiciel de caractérisation de canal.

Toutefois une étude semi-déterministe est nécessaire. Son objectif est de donner une dimension statistique aux résultats fournis par l'association des deux logiciels. Ainsi, ces travaux consistent à conduire une étude sur des zones considérant la diversité spatiale à l'émission comme à la réception.

De plus, l'étude réalisée se fait selon les critères de stationnarité au sens large. Ainsi, les zones émettrices et réceptrices sont de dimension n'excédant pas quelques longueurs d'ondes.

La caractérisation semi-déterministe nous permet d'analyser le comportement moyen du canal (cf B.3 et B.2) en fonction de l'écartement et du nombre d'antennes émettrices et réceptrices ; celles-ci étant considérées comme rectilignes.

III. Modélisation de l'environnement

Les travaux effectués portent sur deux environnements distincts de part leur forme et leur dimension. Le premier est un couloir entouré de plusieurs pièces (figure 3) et possède une superficie d'environ $750 m^2$. Le second est un large hall (figure 4) d'une superficie voisine de $1200 m^2$.

Puisque l'intérêt de ces travaux consiste à analyser l'influence de la modélisation d'environnements sur la caractérisation du canal, trois niveaux de descriptions ont été décrits. Ces trois niveaux sont croissant en complexité. Le premier (niveau A), plus simple, correspond à un environnement modélisé par deux parallélépipèdes dont les faces ont pour propriétés électriques celles du béton. Le deuxième niveau (niveau B) est plus élaboré : les deux éléments du niveau A de l'environnement ont encore les mêmes propriétés électriques, celles du béton, mais leur géométrie est décrite plus précisément. Enfin, le dernier niveau (niveau C) a une description géométrique et électrique complète et tient compte de tous les éléments de l'environnement.

Les niveaux A et B permettent de mesurer l'impact de la

description géométrique de l'environnement sur la caractérisation MIMO. La comparaison des deux derniers niveaux met en évidence l'influence des propriétés électriques des matériaux sur les caractéristiques du canal MIMO.

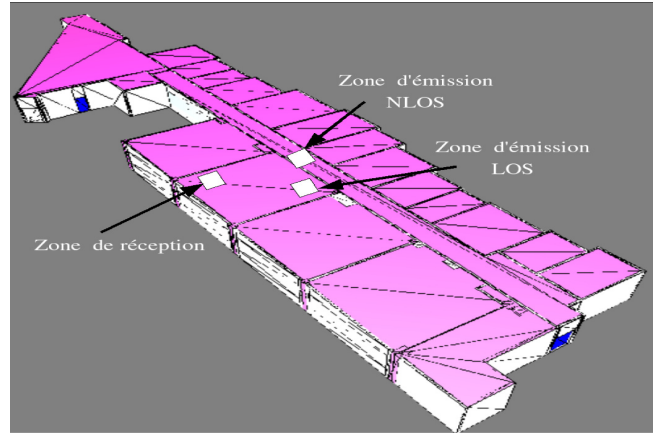


FIG. 3. Environnement couloir.

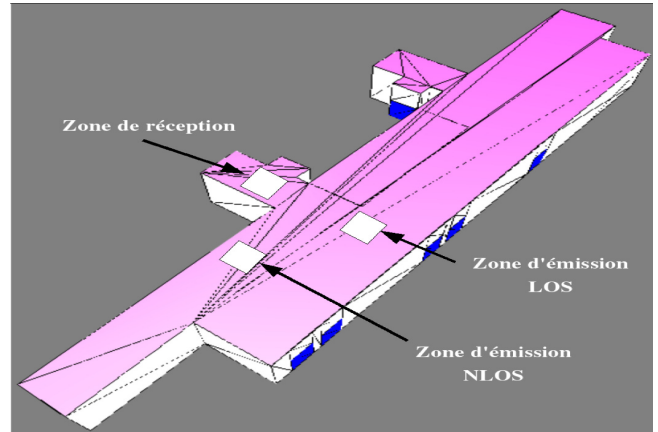


FIG. 4. Environnement hall.

IV. Contexte de propagation

Les simulations ont été réalisées à une fréquence porteuse de 5,18 GHz (système Hyperlan 2), soit une longueur d'onde λ de 6 cm, pour des antennes dipolaires. Les antennes sont placées à une hauteur fixée à 1,5 m.

Pour les simulations un nombre maximum d'interactions égal à une réflexion, une diffraction et cinq transmissions a été considéré. Ce paramétrage résulte d'une confrontation simulation/mesure réalisée dans ce même contexte d'étude pour des canaux SISO [11]. Le couplage entre les antennes émettrices et réceptrices n'est pas pris en compte.

Dans tout les cas de figures, plus de 1400 antennes émettrices et réceptrices ont été positionnées aléatoirement selon une loi uniforme dans des zones de $1 m^2$. Les distances séparant les zones réceptrices sont respectivement égales à 8 m pour l'environnement hall et 4 m pour le couloir.

Ces zones ont été placées dans des configurations de visibilité directe (LOS) ou non (NLOS) comme le montre les figures 3 et 4. Pour ces deux configurations, deux schémas de polarisation des antennes sont étudiés. D'une part, toutes les antennes sont polarisées verticalement (VV-VV). D'autre part, une diversité des polarisations est considérée à l'émission (verticale pour une antenne et horizontale pour l'autre) et à la réception (horizontale pour le premier récepteur et verticale pour le second), d'où la notation (VH-HV).

Pour les différentes configurations, deux cas d'étude ont été envisagés :

- Analyse de l'évolution, pour un canal MIMO 2*2, des paramètres caractéristiques en fonction de l'écartement pour un pas d'évolution de $\frac{\lambda}{20}$ et un écartement maximum de λ ;
- Évolution de ces mêmes paramètres en fonction d'un nombre d'antennes allant de 2 (MIMO 2*2) à 7 (MIMO 7*7) ; les antennes étant espacées de $0,4\lambda$.

Enfin, dans la suite de l'article, nous ne considérerons que le gain en capacité. Celui ci résulte de la normalisation de la capacité MIMO par la moyenne des capacités SISO de chaque liaison du niveau de description le plus précis (niveau C). Ce gain permet de s'affranchir des problèmes de normalisation des réponses impulsionnelles, de leur amplification et de la valeur du RSB. Il s'exprime par :

$$G_c = \frac{C_{MIMO}}{E\{C_{SISO}\}} \quad (6)$$

V. Résultats

A. Évolution des caractéristiques en fonction de l'écartement entre antenne

Les résultats présentés dans cette section confrontent, pour le cas du couloir et du hall et pour les trois niveaux de description, les gains en capacité et les critères de corrélations en fonction de l'espacement entre antennes (exprimé en fraction de lambda) pour un canal MIMO considérant deux antennes à l'émission et à la réception.

A.1. Configuration LOS en polarisation VV-VV

Tous les résultats obtenus ici résultent de simulations réalisées en configuration LOS avec une polarisation verticale des antennes émettrices et réceptrices. Ils considèrent donc la présence du trajet direct qui est le trajet le plus énergétique.

Nos premiers résultats, considèrent aux figures 5 et 6 le comportement des gains en capacité pour le couloir et le hall, respectivement.

Quels que soient les environnements étudiés, le gain en capacité croît et sature quasiment au voisinage de $0,4\lambda$. Ce premier constat corrobore plusieurs études [12] affirmant qu'un espacement minimum de $0,4\lambda$ suffit pour maximiser la capacité.

Pour l'environnement de type couloir, on retrouve une forte similitude de comportement des gains associés aux ni-

veaux A,B et C. En revanche, dans le cas du hall (figure 6), une nette différence apparaît entre le niveau A et les niveaux supérieurs. Ainsi, pour cet environnement, la description géométrique influe de manière importante.

Pour ces deux cas, un premier constat peut être fait. La caractérisation de canal MIMO semble insensible à la description électrique des matériaux.

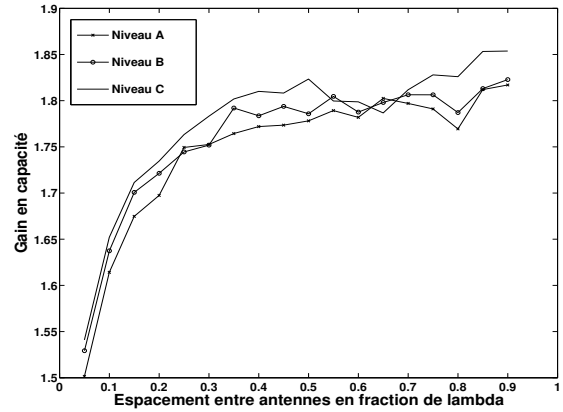


FIG. 5. Évolution du gain en capacité en fonction de l'espacement entre antenne, pour l'environnement couloir, en configuration LOS et sans diversité de polarisation.

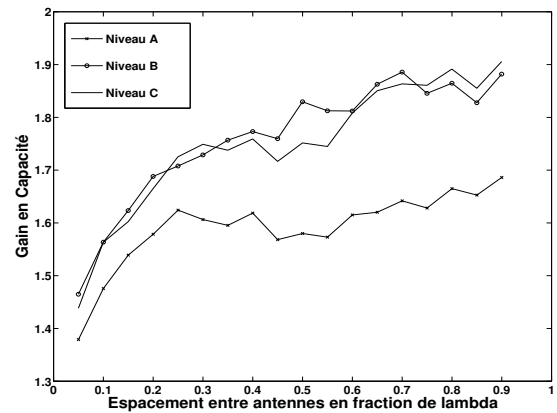


FIG. 6. Évolution du gain en capacité en fonction de l'espacement entre antenne, pour l'environnement hall, en configuration LOS et sans diversité de polarisation.

Pour cette même configuration, les figures 7 et 8 représentent l'évolution des critères de corrélation des différentes liaisons radio. Rappelons que la matrice de corrélation obtenue est de dimension (4*4). De part la disposition traditionnelle des éléments de cette dernière, la diagonale présente toutes les auto-corrélations (égal à 1). Toujours de part cette disposition, les représentations de corrélation placées de part et d'autres de cette diagonale sont symétriques.

L'évolution de ces corrélations prend la forme d'une fonc-

tion de Bessel avec des minima à $0,4\lambda$ et $0,8\lambda$ conformément à la théorie [12].

Malgré une évolution similaire, une distinction peut être faite entre les différentes corrélations :

- les corrélations entre les couples h_{11}/h_{12} et h_{21}/h_{22} représentent les corrélations entre réponses impulsionnelles provenant d'un même émetteur ;
- Les corrélations entre les couples h_{11}/h_{21} et h_{12}/h_{22} expriment le lien entre les réponses impulsionnelles arrivant sur un même récepteur ;
- Les corrélations entre les couples h_{12}/h_{21} et h_{11}/h_{22} expriment les corrélations entre des réponses impulsionnelles issus des deux émetteurs et arrivant sur les deux récepteurs.

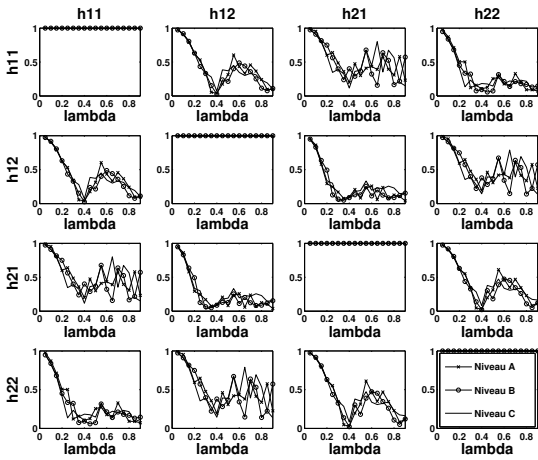


FIG. 7. Évolution du critère de corrélation en fonction de l'espacement entre antenne, pour l'environnement couloir, en configuration LOS et sans diversité de polarisation.

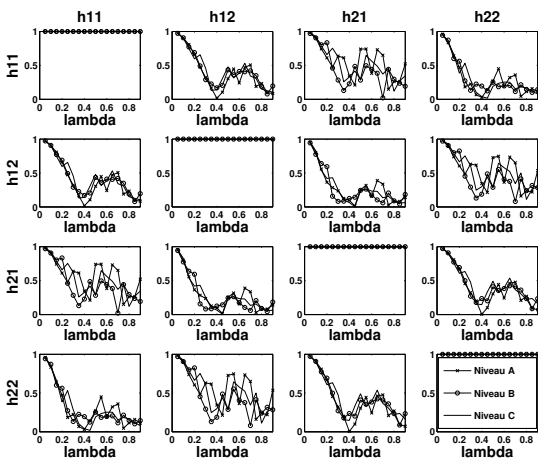


FIG. 8. Évolution du critère de corrélation en fonction de l'espacement entre antenne, pour l'environnement hall, en configuration LOS et sans diversité de polarisation.

Les figures 7 et 8 confirment le raisonnement précédemment obtenue pour le gain en capacité, elles montrent une différence significative entre le niveau A et les niveaux supérieurs, pour l'environnement hall. Cette différence s'exprime tout particulièrement pour les corrélations entre les couples h_{11}/h_{21} et h_{12}/h_{22} .

A.2. Configuration LOS en polarisation VH-HV

En ce qui concerne la diversité de polarisation, les figures 9 et 10 montrent une faible différence du comportement du gain par rapport aux figures 5 et 6. Ainsi, quelle que soit la polarisation utilisée, nous observons, en configuration LOS, qu'un niveau de description géométrique trop simpliste altère la pertinence d'une caractérisation du canal MIMO. Néanmoins, cette dernière semble insensible aux propriétés électriques des matériaux.

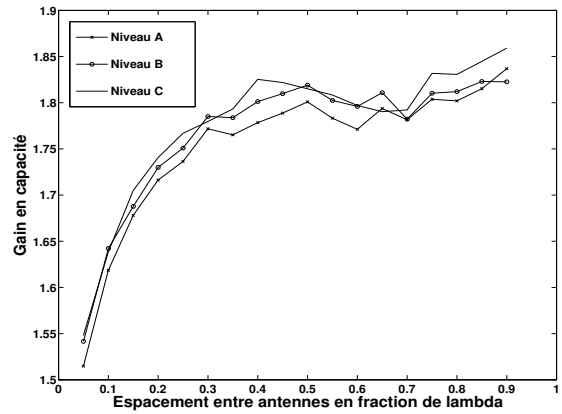


FIG. 9. Évolution du gain en capacité en fonction de l'espacement entre antenne, pour l'environnement couloir, en configuration LOS, avec diversité de polarisation.

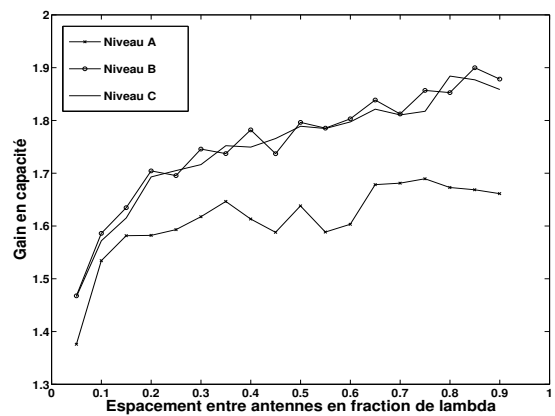


FIG. 10. Évolution du gain en capacité en fonction de l'espacement entre antenne, pour l'environnement hall, en configuration LOS, avec diversité de polarisation.

A.3. Configuration NLOS VV-VV

Les figures 11 et 12 représentent l'évolution des gains en capacité dans une configuration NLOS et pour une polarisation VV-VV. Par comparaison avec le cas LOS, les comportements observés restent similaires. On notera simplement que les différences entre le niveau A et les niveaux supérieurs sont plus marquées.

De plus, l'absence d'un trajet prépondérant induit au niveau du canal des performances trop optimistes pour des environnements simples.

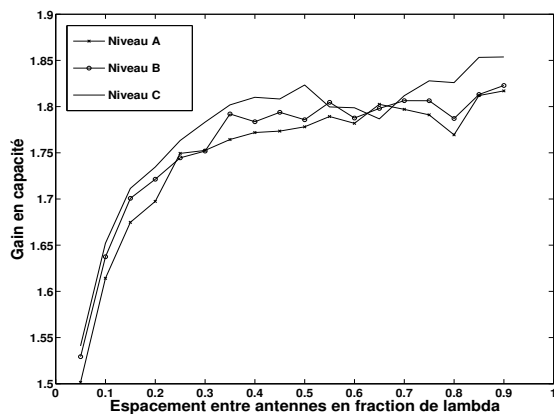


FIG. 11. Évolution du gain en capacité en fonction de l'espacement entre antenne, dans l'environnement couloir, en configuration NLOS et sans diversité de polarisation.

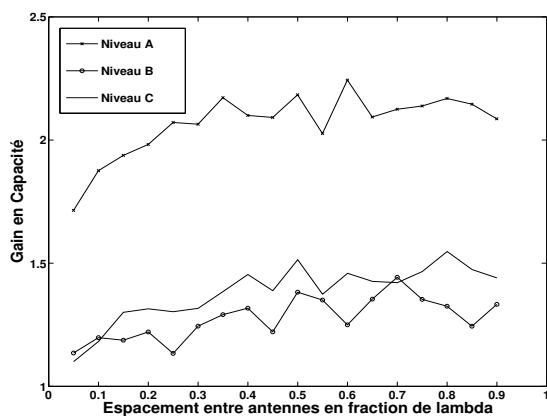


FIG. 12. Évolution du gain en capacité en fonction de l'espacement entre antenne, dans l'environnement hall, en configuration NLOS et sans diversité de polarisation.

Les mêmes comportements ont été observés pour la diversité de polarisation.

A.4. Bilan

Pour cette première section, une brève synthèse peut être faite. La prédiction des paramètres caractéristiques du canal

MIMO dans un environnement de propagation indoor semble insensible aux propriétés électriques des matériaux, et ce, que les antennes soient en configuration VV-VV ou VH-HV. En outre, les paramètres caractéristiques du canal MIMO peuvent être évalués de manière pertinente pour une description d'environnement équivalente au niveau B. Ce qui induit une réduction du temps de simulation d'un facteur 2.

B. Évolution des caractéristiques en fonction du nombre d'antenne

Les résultats qui suivent présentent l'évolution du gain en capacité en fonction du nombre d'antenne à l'émission comme à la réception.

Ainsi, les figures 13 et 14 montrent clairement qu'un certain niveau de description est nécessaire pour un nombre d'antenne croissant. En effet, au delà de deux antennes à l'émission comme à la réception, le niveau de description le plus faible (niveau A) ne suffit plus à une bonne évaluation des paramètres caractéristiques du canal MIMO. Ainsi, il apparaît clairement que le niveau de description géométrique a une importance capitale pour l'évaluation de ces paramètres. La description électrique des matériaux, quant à elle, possède une influence relativement faible par rapport à la description géométrique. Ceci confirme les résultats précédents.

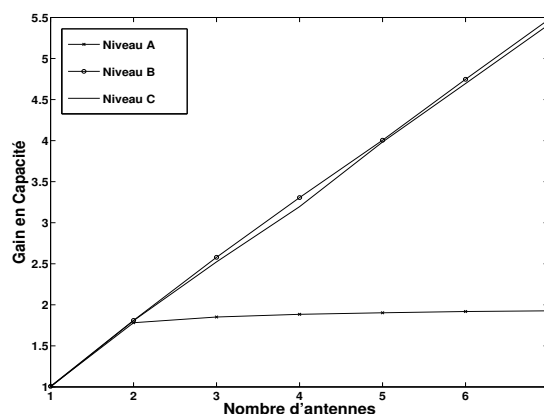


FIG. 13. Évolution du gain en capacité en fonction du nombre d'antennes, pour l'environnement couloir, en configuration LOS et sans diversité de polarisation.

Il semble donc que le nombre d'antennes ou plus particulièrement le nombre de trajets induits par ces antennes soit un facteur déterminant pour le calcul des paramètres caractéristiques des canaux MIMO. Ainsi, le point le plus important à considérer pour la caractérisation MIMO semble ne pas être une géométrie précise de l'environnement (fenêtre, portes, radiateurs, ...) ou les propriétés électriques des matériaux. Cependant, il faut tout de même une description minimum de l'environnement préservant la propagation des trajets prédominants.

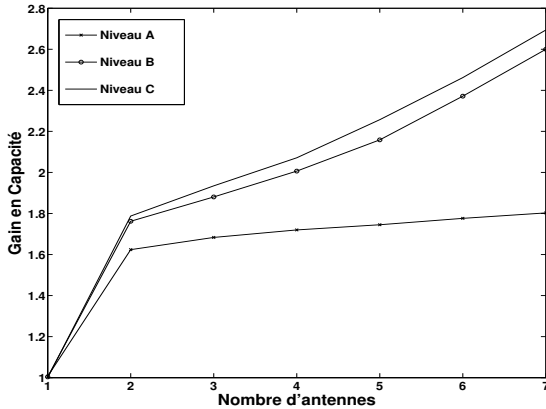


FIG. 14. Évolution du gain en capacité en fonction du nombre d'antennes, pour l'environnement hall, en configuration LOS et sans diversité de polarisation.

VI. Conclusion

Les travaux présentés ont pu révéler l'impact du niveau de description tant au point de vue électrique qu'au point de vue géométrique. Il en ressort que la description géométrique a une importance notable par rapport à la description électrique des matériaux.

Ainsi, sous plusieurs conditions de propagation, il a été montré qu'il était possible de trouver des résultats précis avec un niveau de description d'environnement minimum concordant avec la réalité dans le domaine géométrique sans pour autant avoir une description fine des caractéristiques électriques des matériaux composant cet environnement. Dès lors, une description de niveau B suffit à une évaluation précise du canal MIMO ; Ce qui peut présenter une réduction du temps de simulation proche de 2.

De toutes les conditions de transmissions qui ont été testées, il apparaît clairement que l'absence de trajet direct (le plus énergétique) amplifie l'impact de la description géométrique et électrique.

La comparaison entre l'environnement couloir et l'environnement hall montre que la distance entre émetteurs et récepteurs joue également un rôle dans le sens où l'effet du niveau de description est plus important pour les communications longue distance.

Tous ces résultats sont liés au nombre de trajets et à leurs interactions avec l'environnement de propagation. En effet, plus il y a de trajets plus la description géométrique est importante comme le démontrent les figures 13 et 14.

Les prochains travaux pourraient mettre en jeu l'impact de cette étude sur des réseaux sans fil de type ad hoc.

Références

[1] J. Kivinen, X. Zhao, and P. Vainikainen. Empirical characterization of wideband indoor radio channel at 5.3 GHz. *IEEE*

Transactions on Antennas and Propagation, 49(8) :1192–1205, August 2001.

- [2] A. Abdi and M. Kaveh. A space-time correlation model for multielement antenna systems in mobile fading channels. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20(3) :550–560, 2002.
- [3] R. Vauzelle, Y. Pousset, and F. Escarieu. A sensitivity study for an indoor channel. *Annales des Telecommunications/Annals of Telecommunications*, 59(5-6) :713–730, 2004.
- [4] Z. Yun, M. F. Iskander, and Z. Zhang. Complex-wall effect on propagation characteristics and mimo capacities for an indoor wireless communication environment. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 52(4) :914–922, 2004.
- [5] F. Mora and L. Aveneau. Optimised scanning of a visibility graph data structure for efficient ray-tracing. In *ECWT2005*, Paris, Octobre 2005.
- [6] F. Escarieu, Y. Pousset, L. Aveneau, and R. Vauzelle. Outdoor and indoor channel characterization by a 3D simulation software. *PIMRC '2001*, Septembre 2001.
- [7] Y. Chartois, Y. Pousset, and R. Vauzelle. A SISO and MIMO radio channel characterization with a 3D ray tracing propagation model in urban environment. *ECPS*, Mars 2005.
- [8] The free encyclopedia Wikipedia. *Covariance matrix*. http://en.wikipedia.org/wiki/Covariance_matrix.
- [9] C. E. Shannon. A mathematical theory of communication. technical journal. *AT & T Bell Labs*, Oct 1948.
- [10] D. Gesbert and J. Akhtar. Breaking the barriers of shannon's capacity : An overview of MIMO wireless system. *Teletronikk Telenor Journal*, January 2002.
- [11] F. Escarieu. *Etude de la propagation dans les milieux indoor (intérieur des bâtiments) autour de 2 GHz*. PhD thesis, Université de Poitiers, Décembre 2002.
- [12] D. Shiu, G.J. Foschini, M. J. Gans, and J. M. Kahn. Fading correlation and its effect on the capacity of multielement antenna systems. *IEEE Transactions on Communications*, 48(3) :502–513, March 2000.