Caractérisation, modélisation, simulation et capacité du canal de transmission MIMO
Characterization, modeling, simulation and capacity of MIMO transmission channel

Ghaïs El Zein*, Hanna Farhat*, Yves Lostanlen**, Rodolphe Vauzelle, Yannis Pousset******

** IETR UMR CNRS 6164 - INSA de Rennes, 20 av. des Buttes de Coësmes - CS 14315 - 35043 Rennes Cedex, France, {ghais.el-zein}{hanna.farhat}@insa-rennes.fr*

*** SIRADEL, 1920 Yonge Street, 2nd floor, Toronto, ON M4S 3E2, Canada yves.lostanlen@ieee.org*

**** SIC, Bât. SP2MI, Téléport 2, Bvd Marie et Pierre Curie, BP 30179, 86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex, France, {vauzelle}{pousset}@sic.sp2mi.univ-poitiers.fr*

Résumé

Ce papier invité traite de plusieurs aspects relatifs au canal de propagation dans un contexte multi-antennes MIMO. Différentes approches, basées sur des simulations et des mesures, utilisées pour modéliser le canal de propagation sont d'abord présentées. Le potentiel de ces modèles est ensuite évalué quant à leur extension au contexte MIMO. Ainsi, quelques problématiques liées à la simulation du canal MIMO sont évoquées notamment en lien avec une simulation réaliste dans des milieux complexes. Ensuite, les différentes techniques de mesure utilisées dans le but de caractériser le canal de propagation dans divers milieux sont décrites. Des campagnes de mesures effectuées dans différents environnements ont été analysées pour obtenir les paramètres statistiques du canal. Les résultats obtenus, en simulation comme en mesure, permettent une évaluation de la capacité du canal MIMO. Ces résultats permettent de discuter de l'intégration des techniques MIMO dans des systèmes de communication sans fil.

Mots clés : Canal de propagation, caractérisation, modélisation, capacité, MIMO

Abstract

This invited paper deals with several aspects relative to the MIMO propagation channel. Different approaches, based on simulations and measurements, used to model the propagation channel are first presented. The interest of these models is shown for the MIMO concept. Some specific points are also underlined in order to realize realistic MIMO channel simulation in complex environment. Then, the different measurement techniques used in order to characterize the propagation channel in various environments (outdoor, indoor, penetration) are described. Measurement campaigns made in different environments have been analyzed to obtain the relevant statistical parameters of the channel. Simulation of MIMO channel is then processed. Measurement and simulation results provide an evaluation of the capacity of MIMO channel. These results make it possible to discuss the integration of MIMO techniques in practical wireless communication systems.

Key words : Propagation channel, characterization, modeling, capacity, MIMO

Introduction

Au cours des dernières décennies, le monde des télécommunications a connu un développement important, grâce au succès des systèmes de communications mobiles 2G et au large déploiement de l'Internet. Le passage à la 3G permet d'intégrer de multiples services tels que le multimédia, la commutation par paquets et l'accès radio large bande. Dans ce contexte, la technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) est reconnue comme une bonne solution dans le développement des prochaines générations de réseaux sans fil à large bande. Cette technique est très attrayante pour les communications numériques, permettant l'augmentation des débits de données et/ou l'amélioration des performances du système [1].

Le but de ce papier est de mettre en évidence différents aspects qui concernent la caractérisation et la modélisation du canal de propagation, qui sont particulièrement critiques dans la conception de systèmes MIMO. Dans un premier temps, la section 1 présente un bref aperçu des systèmes de communication sans fil et introduit le principe des systèmes MIMO. Dans la section 2, les différentes approches utilisées pour modéliser la propagation des ondes radio sont synthétisées. La section 3 traite des techniques de mesure et de simulation utilisées pour caractériser le canal de propagation MIMO. La simulation permet d'aboutir à une évaluation de la capacité du canal MIMO. Dans la section 4, des résultats de mesures sont présentés et analysés en vue d'une intégration possible des techniques MIMO dans les futurs systèmes sans fil. La section 5 conclut ce papier.

1. Systèmes de communications sans fil MIMO

Aujourd'hui, les réseaux d'accès sans fil montrent des limites en termes de débit numérique, de qualité de service (QoS) et d'efficacité spectrale. De nombreuses applications sont concernées, telles que les réseaux locaux sans fil (WLAN), la boucle locale radio (WLL) et les futures générations de systèmes radiomobiles (3G+, 4G). Depuis plusieurs années, des efforts ont été conduits pour améliorer la conception des systèmes existants. En fait, la tendance à l'augmentation des débits va continuer très probablement pour atteindre quelques 100 Mbit/s pour une mobilité modérée, et jusqu'à 1 Gbit/s pour une mobilité réduite. Dans ce contexte, la technologie MIMO apparaît comme incontournable pour répondre à ces spécifications. Le principe MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) peut être défini simplement. Comme les traitements dans les domaines temporel et fréquentiel ont été poussés à leurs limites, le domaine spatial peut être exploité. L'idée principale est de transmettre de multiples flux de données sur plusieurs antennes. En réception, plusieurs antennes sont considérées en vue d'améliorer les performances du système (Fig. 1).

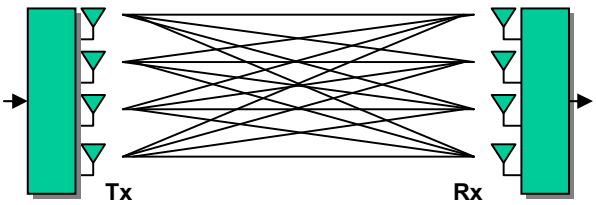


Fig. 1. Système de transmission sans fil MIMO

Dans un cas idéal, il peut être démontré que le débit maximal (capacité du canal) croît linéairement avec le nombre des antennes d'émission (Tx) et de réception (Rx) [1]. Ainsi, cette technique peut être considérée comme une généralisation de la diversité d'espace [2]. Elle suppose une propagation riche en trajets multiples en vue de l'exploitation indépendante des canaux entre les antennes Tx et Rx. Cette structure d'émission et de réception peut être modélisée en utilisant une représentation matricielle du canal.

Des considérations basées sur la théorie de l'information permettent de mettre en évidence que deux mécanismes fondamentaux sont en jeu dans le processus de transfert des données : la diversité (réception de multiples copies décorrélées de la même information transmise, pour lutter contre les évanouissements du canal), et le multiplexage (réception de symboles indépendants pour accroître la capacité de canal) [3]. La structure du canal de propagation impose un compromis entre les deux types

de gain. L'amélioration des performances et/ou des débits, prédite par la théorie de l'information, repose sur une connaissance fine des phénomènes de propagation. Cette connaissance permet de choisir, pour un environnement donné, les schémas de codage et de modulation les plus appropriés. Les antennes d'émission et de réception doivent être soigneusement conçues pour maximiser le rang du canal, c'est-à-dire le nombre de modes propres de communications disponibles. Dans ce cas, la corrélation et la dispersion des paramètres du canal jouent un rôle central.

2. Modélisation du canal MIMO

La propagation des ondes électromagnétiques entre un émetteur et un récepteur est caractérisée par la présence des trajets multiples causés par différents phénomènes tels que la réflexion, la réfraction, la diffusion et la diffraction. Les performances des systèmes MIMO sont largement tributaires du milieu de propagation et de la structure des réseaux d'antennes. Cette observation est plus importante dans le cas MIMO que dans une configuration SISO (Single-Input Single-Output). Dans ce contexte, la caractérisation et la modélisation de l'espace-temps de la chaîne semblent essentielles. Ainsi, l'objectif de notre étude vise à apporter une meilleure compréhension de la chaîne de propagation MIMO pour enfin proposer un modèle approprié. Plusieurs méthodes de classification des modèles sont proposées dans la littérature [2]-[8]. Dans ce papier, nous distinguons les modèles déterministes et stochastiques.

2.1. Modèles déterministes

Ces modèles sont basés sur une description minutieuse d'un environnement spécifique. Dans cette catégorie, deux approches peuvent être identifiées : les méthodes par tracé de rayons et des techniques basées sur le traitement et l'exploitation des données de mesure. Les modèles basés sur le tracé de rayons, fondés sur des approximations optiques, nécessitent de connaître les spécifications géométriques et électromagnétiques complètes de l'environnement simulé. Ils permettent d'estimer les caractéristiques du canal avec une bonne précision qui dépend intrinsèquement de la description de l'environnement modélisé. Cette méthode est généralement basée sur une description 3D de l'environnement. En outre, d'autres modèles peuvent être utilisés qui sont basés sur les équations de Maxwell, ils nécessitent toutefois des temps de calcul d'autant plus excessifs que l'environnement traité est grand. Une comparaison de prédictions par tracé de rayons avec des mesures montre que les simulations ont tendance à sous-estimer la capacité du canal MIMO [9]. Un autre type de modèles consiste à enregistrer les données de mesure pour pouvoir ensuite les rejouer. Ainsi, les campagnes de mesure de la propagation permettent d'extraire différents paramètres caractéristiques d'un environnement spécifique. Mais ces paramètres sont valables pour des conditions expérimentales données, et les simulations ont besoin de grandes ressources en mémoire.

2.2. Modèles stochastiques

Les modèles stochastiques ont pour but de décrire les paramètres du canal par des lois de variables aléatoires. Le COST 259 Directional Channel Model [10] est un exemple de modèles statistiques du canal MIMO. On peut également citer les modèles basés sur la géométrie et ceux basés sur la corrélation. Les modèles géométriques considèrent une distribution statistique des diffuseurs autour de la station de base et du mobile. En supposant la présence d'un rebond unique ou d'un double rebond, le modèle du canal peut être calculé. Ces modèles permettent également de faire varier le canal dans le temps en prenant en compte le déplacement relatif entre l'émetteur et le récepteur. Les modèles les plus couramment utilisés sont certainement les modèles stochastiques gaussiens fondés sur des propriétés de second ordre (corrélation) entre les éléments de la matrice du canal. Le modèle le plus complet consiste en la détermination de la matrice de corrélation entre tous les canaux, ce qui conduit à des calculs complexes qui sont difficiles à interpréter d'un point de vue physique. Pour cette raison et afin de faciliter l'extension des modèles SIMO et MISO existants, d'autres modèles séparant les corrélations à l'émission (Tx) et réception (Rx) sont utilisés en particulier dans les projets européens tels que les projets IST METRA et ASILUM. Dans ces modèles, une structure de séparation de covariance (dénommée ci-après le modèle de produit de Kronecker) peut être créée avec le produit de Kronecker des matrices de covariance des signaux sur les réseaux de transmission et de réception. Des travaux récents ont démontré des lacunes dans le principe de ces modèles [11]. En particulier, si pour les réseaux avec un faible nombre d'antennes

ce type de modèle semble correct, il devient de moins en moins approprié lorsque le nombre d'antennes augmente. Ainsi, Weichselberger [12] a élaboré un modèle qui peut envisager une certaine relation entre les propriétés du second ordre en Tx et Rx. Ce modèle, basé sur la définition des modes vectoriels structurés et la définition d'une matrice de couplage, permet une plus grande souplesse dans la mesure de la diversité et de multiplexage offert par le canal. Une autre approche basée sur la corrélation utilise les propriétés des matrices aléatoires. Récemment, d'autres études ont montré qu'un phénomène d'étranglement (keyhole) est théoriquement possible (par exemple, dans un couloir, un tunnel ou lorsque les ondes se propagent à travers le même conduit) [13]. Un modèle associé à cette situation est un modèle non gaussien. Il permet en particulier de représenter les canaux dont la diversité en Tx et Rx est riche, tandis que le degré de multiplexage est nul. Le principal inconvénient de ce modèle, qui sépare les propriétés du second ordre en Tx et Rx, réside dans la complexité de déterminer ses paramètres à partir de la mesure. En effet, il est nécessaire de déterminer trois matrices, la matrice de corrélation en Tx, en Rx, et une troisième pour relier les diffuseurs hypothétiques de Tx et Rx.

3. Caractérisation du canal MIMO

L'étude de la propagation des ondes apparaît comme une tâche importante lors du développement d'un système sans fil. L'analyse est généralement menée dans le domaine temporel, en mesurant la bande de cohérence, le temps de cohérence, la dispersion des retards et la dispersion Doppler. Aussi, la distance de cohérence et la dispersion angulaire des trajets sont utilisées pour mettre en évidence le lien entre la propagation et le système dans le domaine spatial. Pour les systèmes à large bande, l'analyse doit porter sur les pertes de puissance (estimation de la couverture radioélectrique et du rapport signal sur interférent) et sur la réponse impulsionnelle (estimation des caractéristiques du canal large bande). Par conséquent, une description précise de la dimension spatiale et temporelle des propriétés du canal est nécessaire pour la conception de systèmes à haut débit, et aussi pour le choix de la topologie du réseau. Pour répondre à cet objectif, une théorie a été proposée tout d'abord par Bello [14], dans le domaine temporel, puis étendue à une caractérisation spatio-temporelle par Eggers [15] et Durgin [16]. Cette théorie de caractérisation spatio-temporelle permet de définir les relations existant entre les différentes représentations possibles du canal de propagation. Dès lors, de toutes ces représentations, nous pouvons extraire des informations précises liées au degré de cohérence ou de dispersion spatio-temporel du canal. Toutefois, ces paramètres caractéristiques du canal sont très souvent définis dans le cadre d'une hypothèse de travail purement statistique. Il s'agit de l'hypothèse de stationnarité au sens large et à diffuseurs non corrélés WSSUS (Wide Sense Stationary Uncorellated Scatterers) qui suppose que la variation de la puissance moyenne du signal est quasi nulle sur une faible échelle de variations spatiale, temporelle ou fréquentielle. Ainsi, cette hypothèse implique que les moments statistiques d'ordre 1 et 2 du canal sont quasi indépendants des variations temporelles, spatiales ou fréquentielles.

3.1. Paramètres caractéristiques du canal MIMO

En considérant le canal de transmission MIMO, défini par les réseaux d'antennes Tx et RX avec le canal de propagation les séparant, plusieurs paramètres peuvent être exploités. Les paramètres les plus utilisés sont les valeurs propres de la matrice du canal, le conditionnement, la capacité et la corrélation.

3.1.1. Décomposition en canaux décorrélés : valeurs « propres »

La représentation classique du canal repose sur une description considérant N_rxN_e canaux SISO (Fig. 2) et est modélisée par la matrice de canal notée $\mathbf{H}$. La diagonalisation du système matriciel correspondant permet d'exprimer le canal comme la superposition de plusieurs sous-canaux (ou modes) « propres » décorrélés transportant chacun une fraction du signal transmis. Ainsi, la diagonalisation se matérialise par une décomposition en valeurs singulières de la matrice $\mathbf{H}$ tel que :

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\boldsymbol{\Sigma}\mathbf{V}^H$$

La matrice diagonale $\boldsymbol{\Sigma}$ de dimensions ($N_r \times N_e$) contient les N valeurs singulières réelles positives ou nulles σ_k de la matrice de canal $\mathbf{H}$, où les $\lambda_k = \sigma_k^2$ sont les valeurs propres de la matrice $\mathbf{H}.\mathbf{H}^H$. Les matrices $\mathbf{U}$ et $\mathbf{V}$ sont des matrices unitaires, vérifiant :

$$\mathrm{V.V}^H = \mathrm{I}_{N_e}$$
$$\mathrm{U.U}^H = \mathrm{I}_{N_r}$$

Ainsi, comme l'illustre la figure 2, cette décomposition du canal en valeurs singulières permet d'assimiler le canal de propagation, constitué de $N_r x N_e$ canaux plus ou moins corrélés, à N (N = min $\{N_r, N_e\}$) canaux totalement décorrélés de coefficients de transfert $\lambda_k^{1/2}$. La valeur de ces coefficients dépend du degré de corrélation entre les trajets. Ces valeurs singulières tendent vers zéro lorsque la corrélation augmente.

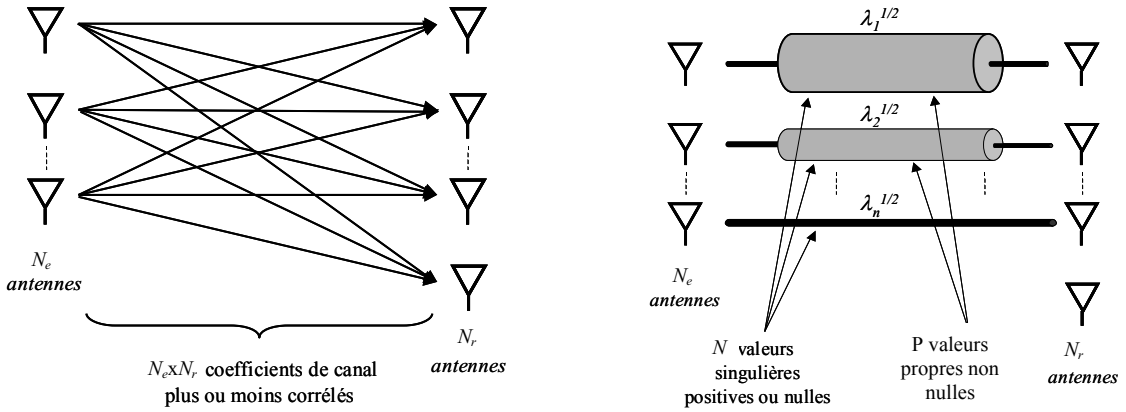


Fig. 2. Décomposition d'un canal MIMO en canaux indépendants par décomposition en valeurs singulières (à gauche : représentation classique en canaux corrélés, à droite : représentation en canaux découplés)

Dans la mesure où la décomposition fournit une représentation équivalente du canal $\mathbf{H}$, les coefficients de transfert du canal (λ_k ou $\widetilde{H}_{ij}$ selon la représentation choisie) conservent la même puissance totale :

$$\sum_{k=1}^{P} \lambda_k = \|\mathrm{H}\|^2 = \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_e} \left|\widetilde{H}_{ij}\right|^2$$

Cette décomposition montre qu'au plus, P antennes reçoivent un signal. Les autres antennes (P +1 à N) associées à des valeurs singulières nulles ne reçoivent que du bruit. Aussi, dans cette représentation équivalente, le nombre effectif d'antennes recevant un signal se limite à P, rang de la matrice $\mathbf{H}$.

3.1.2. Conditionnement du canal MIMO

Ce paramètre nous informe sur la qualité de la liaison. Il est défini par le rapport entre la valeur propre maximale et la valeur propre minimale du canal. Si ce rapport est proche de 1, alors toutes les voies d'émission peuvent transmettre la même quantité d'information, alors que dans le cas contraire, la liaison est déséquilibrée.

3.1.3. Capacité du canal MIMO

Shannon a démontré qu'il existe un débit d'information en dessous duquel il est possible de transmettre avec une probabilité d'erreur arbitrairement faible en utilisant un codage suffisamment élaboré. Au-dessus de ce débit, la probabilité d'erreur ne peut plus être annulée. Cette grandeur s'appelle la capacité du canal que nous notons C (en *bit/s/Hz*).

On définit, dans le cas où la puissance des antennes émettrices est identique, la capacité instantanée du canal par l'expression :

$$C = log_2\left[det\left(\mathrm{I}_{N_r} + \frac{\rho}{N_e} \mathrm{H.H}^H \right) \right] N_r \leq N_e$$

où ρ est le rapport signal sur bruit.

Nous pouvons simplifier l'expression précédente en l'écrivant à partir des valeurs propres λ_k de la matrice $\mathbf{H}$; elle devient alors :

$$C = \sum_{i=1}^{P} log_2\left(1 + \frac{\rho}{N_e}\lambda_i\right)$$

Dans le cas où le nombre d'antennes à la réception devient strictement supérieur au nombre d'antennes à l'émission, les expressions précédentes deviennent :

$$C = log_2\left[det\left(\mathrm{I}_{N_r} + \frac{\rho}{N_e}\mathrm{H}^H.\mathrm{H}\right)\right] N_r > N_e$$

ou :

$$C = \sum_{i=1}^{P} log_2\left(1 + \frac{\rho}{N_e}\lambda_i\right)$$

Les expressions précédentes permettent de calculer la capacité pour une réalisation particulière de la matrice de canal $\mathbf{H}$. Cette capacité instantanée fluctue au rythme du canal. Aussi, on préfère définir une capacité moyenne du canal.

Le canal fluctuant de façon « aléatoire », la capacité instantanée C peut également être considérée comme une variable aléatoire. Nous définissons la capacité moyenne, C_{moy}, comme l'espérance de C pour toutes les réalisations du canal :

$$C_{moy} = E[C] = E\left[log_2\left[det\left(\mathrm{I}_{N_r} + \frac{\rho}{N_e}\mathrm{H}.\mathrm{H}^H\right)\right]\right] N_r \leq N_e$$

ou :

$$C_{moy} = E[C] = E\left[log_2\left[det\left(\mathrm{I}_{N_r} + \frac{\rho}{N_e}\mathrm{H}^H.\mathrm{H}\right)\right]\right] N_r > N_e$$

3.1.4. Corrélation du canal MIMO

Un des éléments clés associé à la performance d'un canal MIMO est le bon positionnement des antennes. En effet, et en particulier pour les systèmes de faible encombrement, nous ne pouvons pas disposer les antennes de manière quelconque sans prendre le risque d'avoir des liaisons MIMO très fortement corrélées. Pour cela, nous disposons de la matrice de corrélation, notée $\mathbf{R_H}$, de dimension égale à $(N_r x N_e)^2$. Chaque élément de cette matrice est défini par :

$$\mathrm{X/Y} = \frac{cov(X,Y)}{\sqrt{var(X).var(Y)}}$$

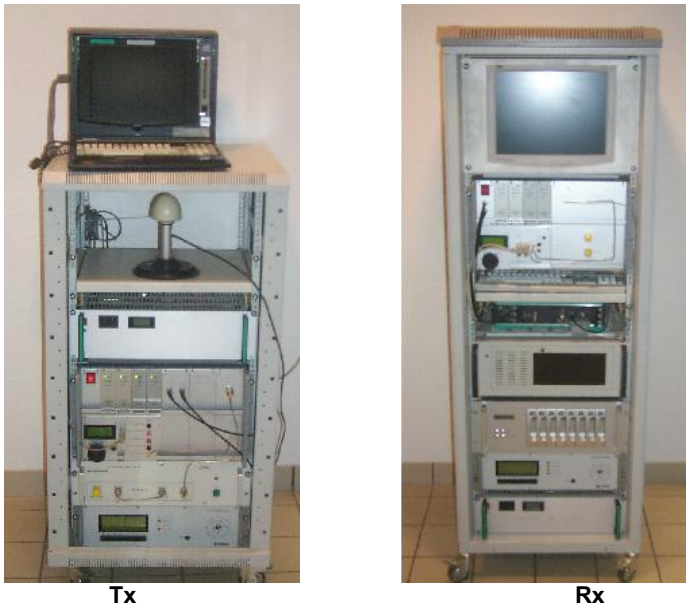
où X et Y sont les $\tilde{H}_{ij}$ de la matrice de canal $\mathbf{H}$, $var(.)$ et $cov(.,.)$ respectivement les opérateurs de variance et de covariance.

Ainsi, l'évolution de ces critères en fonction d'une variation de l'espacement entre antennes à l'émission et/ou à la réception permet de détecter les points de décorrélation maximale, et donc de répondre aux problèmes liés à l'architecture des antennes mise en œuvre.

3.2. Techniques et système de mesure

Dans la pratique, deux approches principales peuvent être utilisées afin de caractériser la propagation du canal [17]. La première approche mesure directement les coefficients de la matrice du canal MIMO simultanément dans les domaines temporel, fréquentiel et spatial. Cependant, cette méthode présente certaines limites liées au fait que les réseaux d'antennes utilisés lors de la mesure doivent être retenus pour les simulations. La deuxième approche, basée sur le traitement de la fonction de transfert et généralement dénommée mesure doublement directionnelle du canal [18], permet d'estimer les paramètres des trajets multiples (la direction de départ DoD, la direction d'arrivée DoA, le retard, le décalage Doppler, la polarisation et l'amplitude), en utilisant des techniques de sondage MIMO à haute

résolution multidimensionnelle. Avec la connaissance des paramètres de polarisation, cette approche permet de s'affranchir de l'influence des antennes et de l'électronique dans les résultats de mesure et, par conséquent, elle peut être généralisée facilement. Néanmoins, le choix de l'architecture de l'antenne réseau reste très important afin de bien séparer les trajets multiples en azimut, en élévation et en polarisation.
Pour nos mesures, un sondeur de canal large bande, développé dans le laboratoire IETR, a été utilisé (Fig. 3) pour caractériser le canal doublement directionnel [19]. Il fonctionne à 2,2 GHz et à 3,5 GHz. La fréquence 2,2 GHz concerne la bande UMTS tandis que la fréquence 3,5 GHz est intéressante pour des applications de type WiMAX. Il utilise un signal périodique de la transmission basée sur la technique de l'étalement de spectre par séquence directe. Ce sondeur offre une résolution temporelle de l'ordre de 11,9 ns avec une dynamique de 50 dB sur la réponse impulsionnelle, une plage de puissance de 90 dB avec un contrôle automatique de gain (CAG), et une bande passante de 100 MHz. Afin d'estimer les paramètres des trajets multiples du canal de propagation, différents algorithme de haute résolution sont utilisés.



Tx **Rx**

Fig. 3. Sondeur de canal MIMO

Pour les mesures en outdoor à 2,2 GHz, nous avons utilisé des réseaux linéaires uniformes ULA (Uniform Linear Array) avec 4 et 8 éléments actifs (Fig. 4), respectivement à l'émission (Tx) et à la réception (Rx).

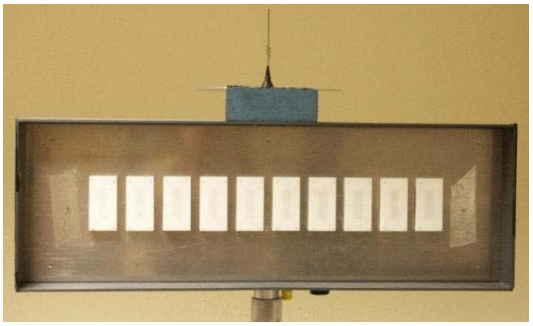


Fig. 4. Antenne ULA Rx (8 X 1)

Un réseau rectangulaire uniforme URA (Uniform rectangular Array) de 16 éléments actifs a également été développé (Fig. 5). Cette antenne permet la caractérisation spatiale en azimut et en élévation en vue d'être utilisée en indoor et pour la pénétration des environnements (outdoor/indoor).

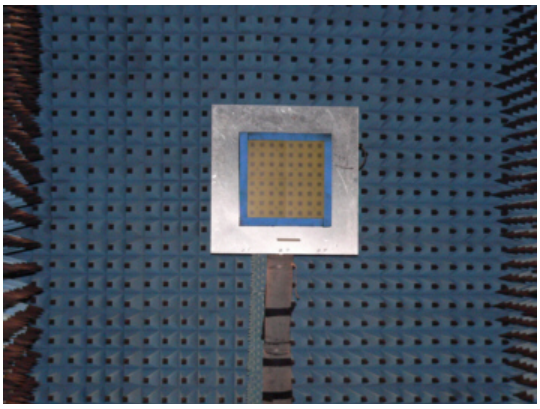


Fig. 5. Antenne URA Rx (4 X 4)

Pour les mesures à 3,5 GHz, plusieurs architectures de réseaux d'antennes ont été développées. En particulier, des réseaux circulaires uniformes UCA (Uniform Circular Array) ont été réalisés. La figure 6 présente le réseau circulaire d'émission de 4 éléments et de réception de 16 éléments à 3,5 GHz. Ces systèmes antennaires accélèrent grandement la collecte de mesure, puisqu'ils permettent de scruter en une manipulation toutes les directions dans le plan horizontal.

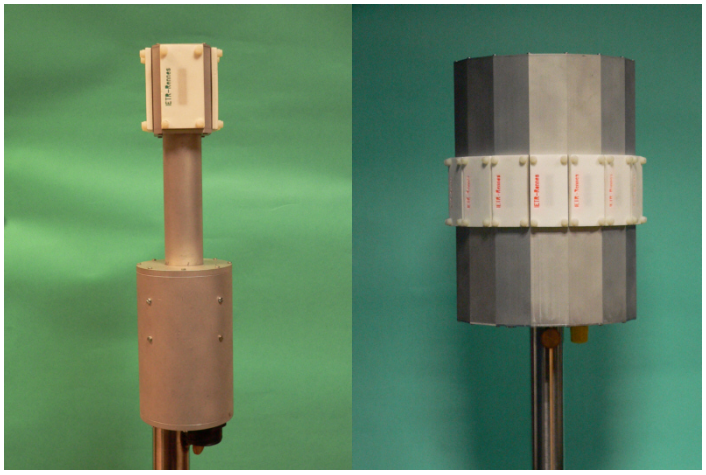


Fig. 6. Antennes UCA Tx (4) et Rx (16)

L'algorithme à haute résolution Unitary ESPRIT [20] (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) étant adapté à des architectures de type planaires, nous avons choisi de développer également l'algorithme SAGE [21] (Space-Alternating Generalized Expectation-Maximization). Cet algorithme offre les meilleures performances avec l'utilisation de réseaux circulaires [22].
Une campagne de mesure dans un environnement de type "Outdoor-Indoor" a été effectuée à 3,5 GHz. L'émetteur était placé sur le toit d'un bâtiment et le récepteur dans différentes positions à l'intérieur d'un deuxième bâtiment (Fig. 7). La figure 8 (à gauche) présente les différentes positions de mesure Rx pour une position de Tx. La figure 8 (à droite) présente les différentes positions mesurées et les résultats de DoA (Direction of Arrival) obtenus avec l'algorithme SAGE. Pour chaque point de mesure, une représentation polaire donne la puissance reçue (proportionnelle à la longueur d'un segment). D'après ces résultats, on peut déduire que la propagation dans ce type d'environnement, et dans le cas de non visibilité entre l'émetteur et le récepteur, empreinte des chemins privilégiés de propagation à travers les ouvertures radioélectriques (fenêtres et portes). De plus, ces mesures ont mis en évidence l'importance de la diffraction sur les cadres verticaux des fenêtres.

Fig. 7. Configuration de mesure en pénétration (Outdoor-Indoor)

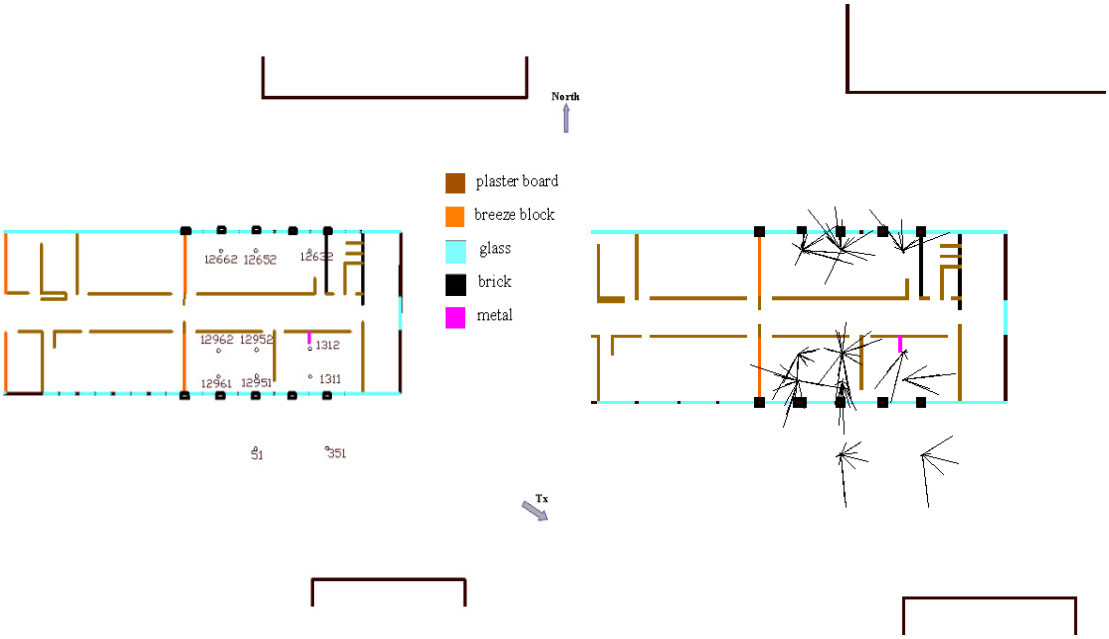


Fig. 8. Points de mesure en Outdoor-Indoor et résultats de DoA

3.3. La simulation

3.3.1. Logiciels développés

Nous avons développé au laboratoire SIC un simulateur de propagation d'ondes radioélectriques [23]–[25]. Pour une liaison émetteur-récepteur choisie, ce dernier peut déterminer et estimer l'ensemble des trajets existants. Nous avons dès lors accès aux informations relatives à chacun des trajets (atténuation, phase, polarisation et position des points d'interactions électromagnétiques subies par l'onde avec son environnement). De ce fait, nous pouvons obtenir une réponse fréquentielle complexe pour un point de réception choisi, ou encore l'évolution de celle-ci pour un parcours de simulation.
Cet outil permet de travailler dans des contextes aussi bien "indoor" que "outdoor". La figure 9 illustre le principe de ce simulateur. Plus précisément, ses entrées sont :

- les données géographiques, des environnements "outdoor" ou "indoor", issues respectivement de l'Institut Géographique National ou d'un modeleur d'environnement indoor [26] ;

- les paramètres électriques des matériaux (conductivité σ, permittivité relative ε_r) ;
- le choix de la position des émetteurs et récepteurs dans l'environnement 3D, ainsi que les caractéristiques des antennes (diagramme de rayonnement et polarisation) ;
- la fréquence utilisée pour la simulation de la propagation ;
- le nombre maximum et la nature des interactions électromagnétiques (réflexion, transmission, diffraction) subies par chaque trajet simulé.

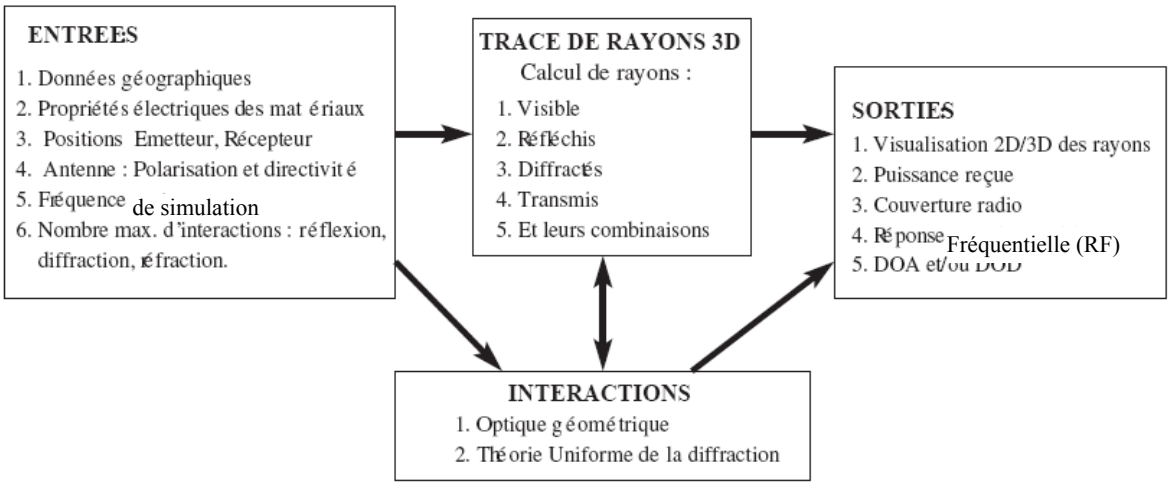


Fig. 9. Synoptique du simulateur de canal

Ses sorties délivrent :

- une visualisation 2D ou 3D des rayons dans l'environnement de propagation ;
- la puissance reçue en un point ;
- la zone de couverture de l'émetteur ;
- la réponse fréquentielle complexe pour chaque liaison radio ;
- les angles d'arrivée ou de départ pour chacun des trajets.

Cet outil est couplé à un autre dédié à la caractérisation du canal. L'association des deux simulateurs conduit au synoptique de la figure 10 où nous retrouvons en entrée du logiciel de propagation les informations précitées et présentées à la figure 9, et en sortie du logiciel de caractérisation les paramètres caractéristiques. Notons que seules deux informations provenant du simulateur de propagation sont utilisées : les réponses fréquentielles complexes et les angles d'arrivée ou de départ.

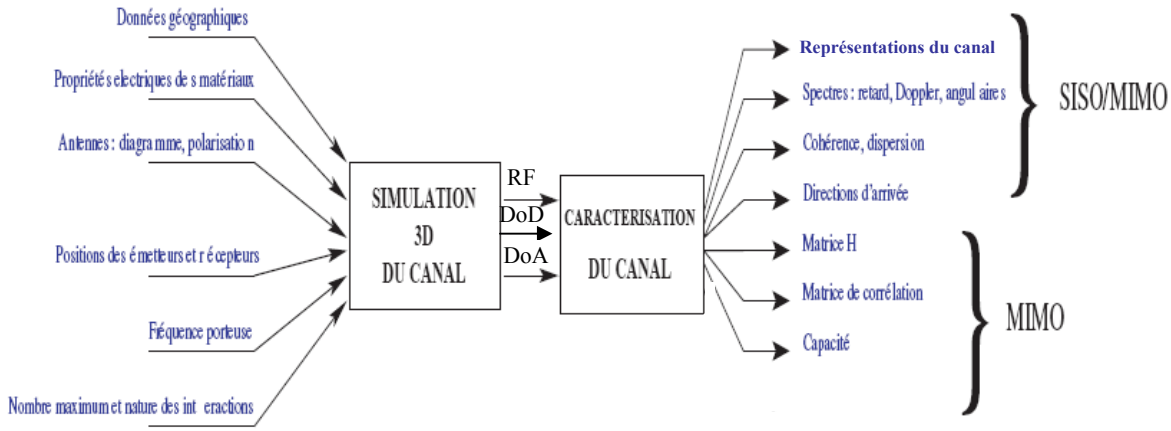
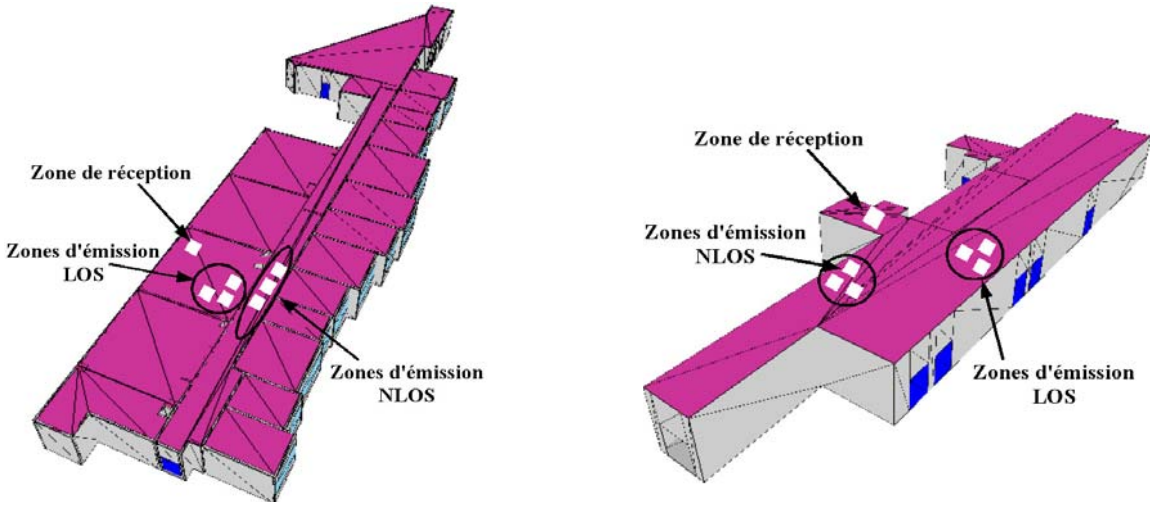


Fig. 10. Synoptique de l'association simulation de la propagation et caractérisation de canal

3.3.2. Application et problématique

Dans ce contexte de simulation du canal, l'intérêt d'une analyse portant sur l'adéquation entre la modélisation de l'environnement et la précision de simulation du canal radio est primordial. En effet, le spectre des applications liées à cette problématique est relativement étendu. Il va du déploiement des réseaux sans fil terrestres aux problèmes de localisation et de positionnement de nœuds des réseaux. Ces différentes applications ont toutes pour dénominateur commun les environnements complexes et hétérogènes, autrement dits, les milieux constitués d'un grand nombre d'éléments de forme complexe, eux-mêmes composés de différents matériaux. Toutefois, essayer de prendre en compte toute cette finesse de description lors de la prédiction du canal de propagation est presque impossible et extrêmement coûteuse en temps de calcul. Dès lors, l'objectif principal consiste à maîtriser la dégradation de la précision des simulations en fonction de celle de la description des environnements. Dans ce contexte, nous ne nous sommes exclusivement préoccupés que des environnements indoor (Fig. 11) car, au vu des fréquences d'utilisation et des débits sans cesse croissants, il peut s'avérer que les études réalisées dans de tels milieux soient un bon indicateur des méthodes à adopter pour les autres catégories d'environnements.



(a) Couloir (b) Hall

Fig. 11. Environnements d'études

Ainsi, deux approches complémentaires ont été envisagées. La première consiste à analyser l'impact des murs réalistes sur la caractérisation des canaux SISO et MIMO ; la deuxième, quant à elle, aborde cette problématique en étudiant l'influence d'une description plus globale de l'environnement sur le comportement du canal.

Dans la première approche, l'investigation a porté sur des murs de structures, géométriques et/ou électriques, périodiques. Il a été montré que considérer de telles structures ajoute des interférences constructives et destructives dans le signal reçu, ce qui peut sensiblement altérer la qualité des communications. Ainsi, pour un canal MIMO, l'étude statistique réalisée par Yun et Iskander [27,28], a permis d'analyser l'effet de ces murs hétérogènes sur la modélisation du canal à 900 MHz. Ils ont montré qu'il existe, comme en SISO, une différence notable entre une caractérisation issue de murs hétérogènes et celle provenant de murs homogènes et ceci, tant du point de vue de la répartition de la puissance reçue que de celui de la capacité du canal, et quel que soit le nombre d'antennes à l'émission et à la réception considéré.

Concernant la deuxième approche, nous avons montré que la simulation du canal MIMO reste quasi insensible aux propriétés électriques des matériaux. Notons tout de même que le modèle de propagation utilisé est asymptotique en fréquence et interagit donc localement avec l'environnement. Ainsi, cela signifie que le caractère hétérogène des différents éléments (murs, portes, fenêtres, radiateurs) constituants l'environnement ne peut être pris en compte, contrairement aux modèles exacts. Ainsi, une

modélisation hybridant ces deux approches pourrait être à envisager. Toutefois, il semble, à travers cette étude, que la caractérisation du canal MIMO soit peu sensible à une hétérogénéité plus globale liée aux différents matériaux constituants l'environnement. De plus, l'étude montre que les pièces qui sont éloignées de la transmission ont peu d'impact sur la caractérisation MIMO. Néanmoins, une description géométrique précise des pièces directement concernées par la transmission est cruciale pour la caractérisation. En effet, les paramètres caractéristiques divergent très sensiblement lorsqu'une description trop simpliste est envisagée. Ce point est d'ailleurs amplifié lorsque les antennes émettrices et réceptrices sont en non visibilité [29]. Un exemple de cette étude est illustré à la figure 12 montrant, pour différents niveaux de description, l'évolution du paramètre de gain en capacité [28] en fonction du nombre d'antennes (même nombre d'antennes à l'émission et à la réception).

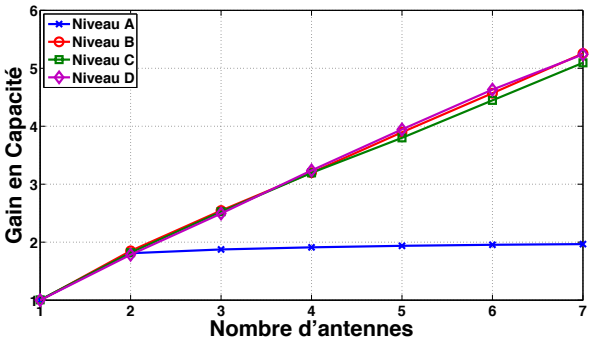


Fig. 12. Evolution du gain en capacité en fonction du nombre d'antennes

Ainsi, dans ce cas d'étude quatre niveaux de description sont analysés. Le niveau **A** est le plus simple et est constitué de 2 parallélépipèdes rectangles, comprenant les antennes émettrices et réceptrices, dont les murs sont en béton. Le niveau **B** ne considère que les volumes précédents du niveau **A** mais dont la description géométrique est conforme au plan architectural (prise en compte des portes, fenêtres, etc.). Toutefois, les propriétés électriques de ces différents éléments sont celles du béton. Le niveau **C** tient compte de toutes les pièces (voisines ou non des antennes). Celles-ci sont géométriquement bien décrites mais leurs propriétés électriques sont similaires à celles du béton. Enfin le niveau **D** correspond à la description la plus fine tant géométriquement qu'électriquement. Il en ressort qu'un trop faible niveau de description (**A**) introduit des erreurs significatives dans les simulations réalisées.
Dans cette étude, nous avons également analysé l'impact de la diversité de polarisation sur les performances du canal pour le niveau de description le plus complet (**D**). La figure 13 illustre l'évolution du conditionnement (en %) en fonction de l'espacement entre antennes (même espacement à l'émission et à la réception) avec et sans diversité de polarisation.

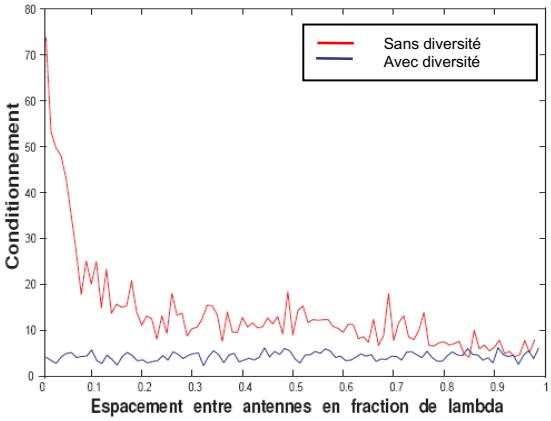


Fig. 13. Conditionnement de la matrice **H** avec et sans diversité de polarisation

Il en ressort que le conditionnement du canal sans diversité de polarisation est très fluctuant, ce qui implique qu'un sous canal du lien radio MIMO est prédominant. Il peut alors pénaliser les performances d'une transmission MIMO. En revanche, pour le canal avec diversité de polarisation, le conditionnement est stable et faible. Cela signifie que la puissance associée aux différents sous canaux est mieux répartie que dans le cas précédent. Cela doit donc favorablement influer sur les performances du système de communication.

4. Applications de la technologie MIMO

Un environnement urbain dense a été choisi pour ces campagnes de mesure réalisées à 2,2 GHz (bande UMTS). L'analyse statistique permet d'extraire les statistiques du second ordre du canal de propagation et de fournir des paramètres importants pour la conception de systèmes tels que la bande de cohérence, les distances de cohérence à l'émission et à la réception.

Le tableau 1 présente la moyenne (*m*) et la dispersion (*σ*) de la bande de cohérence (en MHz) et le tableau 2 présente les distances de cohérence (en longueur d'onde λ) obtenues à l'émission (Tx) et à la réception (Rx). Ces différents paramètres de cohérence ont une implication directe dans la conception de systèmes de communication MIMO. En fait, les deux principaux indicateurs de performance pertinents, liés à la limitation de la puissance et de la bande, à savoir la probabilité d'erreur et le débit de transmission, dépendent du comportement au deuxième ordre du canal.

À titre d'exemple, nous pouvons noter que l'espacement des antennes, dans les réseaux à l'émission et la réception, doit être supérieur à la distance de cohérence pour obtenir des signaux suffisamment décorrélés. De même, la bande passante de transmission doit être plus grande que la bande de cohérence du canal pour bénéficier de la diversité de fréquence.

Site	Bande de cohérence (MHz)			
	50%		90%	
	m	σ	*m*	σ
Victoire	37.7	28.3	13.3	18.4
Station	32.8	27	9	13.9
JMF	24.7	18.6	4.6	6.9

Tab. 1. Bande de cohérence

Site	Dist. Coh. Rx (λ)				Dist. Coh. Tx (λ)			
	50%		90%		50%		90%	
	m	σ	*m*	σ	*m*	σ	*m*	σ
Victoire	9.73	6.03	1.8	1.8	0.23	0.10	0.06	0.03
Station	5.7	4.3	0.7	0.9	0.22	0.12	0.05	0.03
JMF	6.34	5.21	1	1.6	0.29	0.12	0.07	0.03

Tab. 2. Distance de cohérence

Cette campagne de mesure montre que pour un système UMTS de 5 MHz de bande passante (Tab. 1), le canal offre peu de voies de diversité de fréquence (moins de 10% des cas) [30]. En outre, la diversité d'espace est obtenue à la station de base Rx en séparant les antennes par des distances de près de 11 λ (1,5 m à 2,2 GHz) (Tab. 2). Aussi, la diversité au niveau de la station mobile Tx est évaluée par l'espacement des antennes à une distance d'environ 0,36 λ (4,9 cm à 2,2 GHz).

5. Conclusion

Dans cet article, nous avons passé en revue différents aspects concernant la caractérisation et la modélisation du canal MIMO. Les deux familles de modèles de propagation déterministes et stochastiques ont été présentées. S'agissant de la mesure du canal de propagation MIMO, la méthode adoptée est basée sur le sondage doublement directionnel. Cette méthode permet de résoudre les paramètres du canal, et de s'affranchir des caractéristiques des antennes dans les résultats. En considérant différentes situations, les statistiques du second ordre des paramètres du canal à 2,2 GHz (UMTS) sont extraites et

sont utilisées pour mettre en évidence le lien entre la propagation et les paramètres système dans le domaine spatial. Une autre campagne de mesure réalisée à 3,5 GHz (WiMAX) dans un environnement particulier de l'extérieur vers l'intérieur (pénétration) a été présentée. D'autres campagnes de mesure sont prévues pour caractériser le canal bi-directionnel en polarisation notamment, en utilisant des antennes adaptées à cette problématique. Un grand nombre de mesures sera nécessaire pour obtenir des résultats statistiques conduisant à des modèles de canal MIMO. Concernant la simulation, il ressort, de l'utilisation de logiciels de propagation à tracé de rayons et de caractérisation du canal SISO/MIMO, que la description des environnements considérés est cruciale avec ou sans diversité de polarisation. Il reste néanmoins beaucoup à faire dans ce domaine pour des environnements de référence indoor et outdoor.

Remerciements

Ce travail a été réalisé en partie dans le cadre des projets Techim@ges et CPER PALMYRE II avec le soutien financier de la "Région Bretagne". Les auteurs tiennent à remercier Ronan Cosquer, Julien Guillet, Guy Grunfelder et Thierry Tenoux pour leur contribution à la réalisation du sondeur, aux campagnes de mesure et leur exploitation. Ils remercient également Yannick Chartois et Carlos Pereira pour les développements liés aux simulations.

Références bibliographiques

[1] G. J. Foschini, and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *IEEE Wireless Personal Communications*, vol. 6, no. 3, pp. 311-335, March 1998.
[2] D. Gesbert, M. Shafi, D. Shiu, P. J. Smith, and A. Naguib, "From theory to practice: An overview of MIMO space-time coded wireless systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, no. 3, pp. 281-301, April 2003.
[3] P. Guguen et G. El Zein*, Les techniques multi-antennes pour les réseaux sans fil*. Edition Hermes, Paris, 2004.
[4] K. Yu, and B. Ottersten, "Models for MIMO propagation channels, a review," *Special Issue on "Adaptive Antennas and MIMO Systems", Wiley Journal on Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2, no. 7, pp. 653-666, November 2002.
[5] M. A. Jensen, and J. W. Wallace, "A review of antennas and propagation for MIMO wireless communications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-52, n° 11, pp. 2810-2824, November 2004
[6] L. Schumacher, L. T. Berger, and J. Ramiro-Moreno, "Recent advances in propagation characterisation and multiple antenna processing in the 3GPP framework," in *Proceedings of XXVIth URSI General Assembly*, Maastricht, The Netherlands, August 02.
[7] J. Guillet, "Caractérisation et modélisation spatio-temporelles du canal de propagation radioélectrique dans le contexte MIMO," *Thèse de doctorat*, INSA Rennes, Juillet 2004.
[8] P. Pajusco, "Modèles de propagation pour les systèmes radio-mobiles", *Actes des Journées Scientifiques du CNFRS « Vers des Radiocommunications Reconfigurables et Cognitives »*, Paris, 28-29 Mars 2006.
[9] A. L. Swindlehurst, G. German, J. Wallace, and M. Jensen, "Experimental measurements of capacity for MIMO indoor wireless channels," in *Proc. IEEE 3rd Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC '01)*, pp. 30–33, March 2001.
[10] L. M. Correia, Ed., *Wireless Flexible Personalised Communications*, chapter 3, pp. 77-277, John Wiley & Sons, Inc., 2001.
[11] H. Özcelik, M. Herdin, W. Weichselberger, J. Wallace, and E. Bonek, "Deficiencies of the kronecker MIMO radio channel model," *Electron. Lett.*, vol. 39, pp. 1209-1210, August 2003.
[12] W. Weichselberger, "Spatial structure of multiple antenna radio channel - a signal processing viewpoint," *Ph.D. Thesis*, Technischen Universität Wien, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, December 2003.
[13] M. Liénard, P. Degauque, J. Baudet and D. Dégardin, "Investigation on MIMO channels in subway tunnels," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 21, n°3, pp 332 – 339, April 2003
[14] P. A. Bello, "Characterization of randomly time-variant linear channels," *IEEE Transactions on Communications*, pp. 360-393, December 1963.
[15] P. C. F. Eggers, "Angular-temporal domain analogies of the short-term mobile radio propagation channel at the base station". *IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Symposium*, pp. 742—746, October 1996.
[16] G. Durgin, "Theory of stochastic local area channel modeling for wireless communications," *Phd. Thesis in Electrical Engineering*, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, December 2000.
[17] S. Salous, "Multiple input multiple output systems: capacity and channel measurements," in *Proceedings of the Seventh World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI2003)*, Florida, USA, pp. 1-5, 27-30 July 2003.
[18] M. Steinbauer, A. F. Molisch, and E. Bonek, "The Double-Directional Radio Channel," *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, vol. 43, no. 4, pp. 51-63, 2001.

[19] R. Cosquer, "Conception d'un sondeur de canal MIMO. Caractérisation du canal de propagation d'un point de vue directionnel et doublement directionnel," *Thèse de doctorat*, INSA Rennes, Octobre 2004.
[20] M. Haardt, "Efficient one-, two and multidimensional high resolution array signal processing," *Ph.D. Thesis*, TU-Munchen, 1996.
[21] B. H. Fleury et al., "Channel parameter estimation in mobile radio environments using the SAGE algorithm," *IEEE JSAC*, vol. 17, no. 3, pp. 434-449, Mar. 1999.
[22] C. M. Tan et al., "On the application of circular arrays in direction finding, Part I: Investigation into the estimation algorithms," *Companion paper in 1st Annual COST 273 Workshop*, Espoo, Finland, May 2002.
[23] F. Escarieu, Y. Pousset, R. Vauzelle, L. Aveneau. "*Outdoor and indoor channel characterization by a 3D simulation software*". PIMRC '2001, *IEEE Personal Indoor and Mobile Radio Communications*, San diego, USA - Septembre 2001.
[24] Y. Pousset, R. Vauzelle, L. Aveneau, M. Mériau, "Characterization of the mobile channel by a 3D UTD propagation model," *PSIP'2001*, Marseille, France - Janvier 2001.
[25] F. Escarieu, Y. Pousset, R. Vauzelle. "Caractérisation large bande du canal radio mobile par un modèle de propagation TUD 3D," *JNM 2001*, Futuroscope, France - Mai 2001.
[26] D. Fradin, D. Meneveaux et P. Lienhardt, "Partition de l'espace et hiérarchie de cartes généralisées : application aux complexes architecturaux," *AFIG 2002*, Lyon, Décembre 2002.
[27] M.F. Iskander, Z. Yun, and Z. Zhang. "Outdoor/indoor propagation modeling for wireless communications systems," in *IEEE AP-S Int. Symp. Dig., USNC/URSI Nat. Radio Sci. Meeting*, vol. 2, July 8–13, 2001, pp. 150–153.
[28] Z. Yun, M.F. Iskander, and Z.Zhang, "Complex-Wall Effect on Propagation Characteristics and MIMO Capacities for an Indoor Wireless Communication Environment," *IEEE Trans. on Ant. and Propag*, vol. 52, n° 4, April 2004.
[29] C. Pereira, "Etude avancée des canaux de transmission radio en contexte MIMO : environnements complexes et couplage inter-antennes très large bande," *Thèse de doctorat*, Université de Poitiers, 18 décembre 2008.
[30] H. Farhat, R. Cosquer, J. Guillet, and G. El Zein, "Mobile radio channels characterization based on wideband SIMO 1 × 8 measurements at 2.2 GHz," in *Proceedings of the 5th International Conference on ITS Telecommunications (ITST '05)*, Brest, June 27- 29, 2005.