Emulation de canaux MIMO grâce à des chambres réverbérantes couplées

Coupled reverberating chambers for emulating MIMO channels

***O. Delangre*[*,**], Ph. De Doncker*[*], M. Lienard*[**] and P. Degauque*[**]**

* Université Libre de Bruxelles, Dept. OPERA, {odelangr, pdedonck}@ @ulb.ac.be
** Université de Lille, IEMN/TELICE {Martine.Lienard, Pierre.Degauque}@univ-lille1.fr

Résumé
Cette contribution décrit un nouveau moyen d'émuler expérimentalement des canaux MIMO grâce à deux chambres réverbérantes à brassage de modes, couplées entre elles par un guide d'onde. Ce guide permet de contrôler le degré de diversité du canal, les chambres générant des environnements de Rayleigh. Chaque position du brasseur, aussi bien dans une chambre que dans l'autre, correspond à une réalisation du canal. Ce dispositif devrait permettre de tester expérimentalement les systèmes de communication MIMO dans des environnements parfaitement définis et donc reproductibles. Après avoir rappelé rapidement les potentialités et les limitations inhérentes à l'utilisation d'une chambre unique, nous décrirons l'approche théorique et les résultats expérimentaux qui ont été obtenus lors de l'analyse de deux chambres couplées

Summary
This paper describes a new experimental set up for emulating MIMO channels, based on two reverberating chambers, coupled together with a waveguide. This guide allows controlling the order of the channel diversity, the chambers generating a Rayleigh environment. Each position of the stirrer, in a chamber as well as in the other, corresponds to one channel realization. This set up could thus be used to perform tests of MIMO communication systems in perfectly defined environments and thus under reproducible conditions. After a brief recall of the advantages and drawbacks of using a single reverberating chamber, we describe the theoretical approach and the experimental results for the analysis of two coupled chambers.

Mots clés : chambre réverbérante, canal MIMO, émulation de canaux, CRBM

Key words: reverberating chamber, MIMO channel, channel emulation, MSRC

Introduction
Pour effectuer des tests de systèmes de communication basés sur des liaisons utilisant une seule antenne en émission et en réception, la chambre réverbérante à brassage de mode (CRBM) s'avère être un moyen intéressant. En effet, chaque position successive de la pale correspond à une réalisation du canal. Si la chambre est suffisamment surdimensionnée en termes de longueur d'onde, donc dans sa zone de fonctionnement normal, l'amplitude de la fonction de transfert entre deux antennes pour différentes positions du brasseur est distribuée selon une loi de Rayleigh à condition que les positions successives du brasseur correspondent à des réalisations indépendantes [1].
Il faut noter également qu'un canal de Rice peut être émulé en optimisant le diagramme de rayonnement et l'orientation relative des antennes d'émission et de réception [2].
Il existe cependant des restrictions dans l'utilisation d'une CRBM pour émuler différents types de canaux de propagation. Tout d'abord le coefficient de réflexion important sur les parois entraîne un grand étalement de la réponse impulsionnelle. Cette difficulté peut être palliée, comme nous le verrons sur quelques exemples, par l'introduction de panneaux ou de structures absorbantes dans la chambre, provoquant une diminution du coefficient de qualité et donc de l'étalement des retards. Une autre contrainte provient du fait qu'en n'importe quel point de réception au sein de la CRBM, le

spectre angulaire correspondant aux directions d'arrivée des rayons est en moyenne isotrope, ce qui ne correspond pas forcément au cas réel. Diverses solutions ont été proposées mais s'avèrent lourdes de mise en œuvre. En l'état actuel, la CRBM se prête donc bien à la simulation d'un canal de Rayleigh avec des directions des rayons uniformément distribuées ou à un canal de Rice.
Si on souhaite utiliser une CRBM pour simuler un canal MIMO (Multiple Input Multiple Output) donc associé à un réseau d'antennes d'émission et de réception, une limitation supplémentaire apparaît. Pour simplifier la présentation, on peut considérer que, dans la pratique, le canal est issu de la combinaison de 3 zones de propagation, les 2 premières étant liées respectivement à l'environnement au voisinage des antennes, soit d'émission, soit de réception, la troisième zone, que l'on appellera « intermédiaire », traduisant les phénomènes de propagation entre les 2 zones précédentes. Dans certaines configurations, la zone intermédiaire peut provoquer une diminution du degré de diversité du canal global menant, dans des cas extrêmes, à une dégénérescence de la matrice de transfert ***H*** du canal. Cette dégénérescence provoquera une diminution notable de la capacité, exprimée en bit/s/Hz, ce phénomène étant souvent appelé « keyhole » [3], [4]. Si les 2 réseaux d'émission et de réception sont placés dans une même CRBM, cette zone intermédiaire n'existe pas et il sera donc impossible de modifier les caractéristiques de la matrice ***H***.
Nous avons donc proposé d'utiliser deux CRBM couplées entre elles par un guide d'ondes. En fonction de la taille du guide, pour une fréquence donnée, on modifie le nombre de modes non évanescents et on peut ainsi contrôler le degré de diversité du canal.
Nous résumerons donc tout d'abord, dans le paragraphe 1, les principales caractéristiques d'une CRBM en vue de son utilisation comme moyen de tests de performances de systèmes de communication en environnement de Rayleigh. Nous mettrons ensuite l'accent, dans le paragraphe 2, sur la modélisation théorique de la propagation entre 2 CRBM couplées, en calculant notamment le bilan de liaison, en fonction de la fréquence, entre 2 antennes placées chacune dans une chambre. Dans un 3ème paragraphe, nous décrirons les résultats de quelques expérimentations mettant clairement en évidence tout l'intérêt de ces CRBM couplées pour émuler des canaux MIMO à divers degrés de liberté. Enfin le dernier paragraphe sera consacré à un modélisation du canal MIMO associé à cet environnement, les résultats théoriques étant confrontés à ceux issus de la mesure.

1. Rappel des potentialités d'une chambre pour émuler un canal de Rayleigh

Les chambres réverbérantes sont utilisées depuis de nombreuses années dans le domaine de la Compatibilité Electromagnétique (CEM) afin de pouvoir tester la susceptibilité de systèmes électroniques soumis à un spectre d'ondes planes quasiment isotropes. C'est cette propriété qui a suscité beaucoup plus récemment un intérêt certain de la communauté scientifique travaillant dans le domaine des télécommunications. En effet, les environnements à l'intérieur des bâtiments ou en milieu urbain présentent des caractéristiques statistiques de propagation qui sont voisines de celles d'un environnement de Rayleigh ou de Rice. Les premières applications des CRBM ont concernée l'étude des caractéristiques des téléphones portables puis des systèmes multi-antennes [5].
Si on souhaite utiliser des CRBM pour tester les performances d'un système, la première étape est de relier leurs caractéristiques habituellement définies dans le cadre de la CEM, à savoir le facteur de qualité Q, le coefficient τ_{RC} de décroissance de l'énergie dans la chambre lorsque la source est arrêtée et la largeur de bande modale B_m aux paramètres définissant habituellement un canal de propagation que sont la bande de cohérence B_c et l'étalement des retards S_τ.
Nous avons montré analytiquement [6], que si le coefficient de qualité de la chambre est important, S_τ a la même expression analytique que τ_{RC} et est donc relié à la fréquence porteuse f_c par la relation :

$$S_\tau = \frac{Q}{2\pi f_c} \qquad (1)$$

De même, la bande de cohérence B_c, calculée pour une valeur absolue du coefficient de corrélation complexe du canal de propagation $H(f)$ de 0.7, est donnée par :

$$B_c = \frac{f_c}{Q} \qquad (2)$$

Pour une chambre usuelle, Q prend une valeur très élevée, de l'ordre de 10 000 à 50 000, ce qui mène à des étalements de retards de l'ordre de la microseconde, donc bien supérieurs à ce qui est

observé à l'intérieur des bâtiments. Pour diminuer cette valeur, un moyen simple consiste à placer des panneaux absorbants dans la chambre.

Afin de valider cette approche ainsi que le domaine de validité des expressions (1) et (2), des mesures ont été faites successivement dans 3 chambres ayant des volumes de 65 , 16 et 9 m^3 et que nous appellerons respectivement « grande », « moyenne » et « petite » chambre. Dans chacune de ces CRBM, des absorbants ont été introduits afin de modifier la valeur de *Q.*

Les résultats représentés sur la Fig. 1 montrent, pour les différentes chambres et pour un nombre variable d'absorbants, ayant chacun une surface de 1.4 m^2, la variation de l'étalement des retards S_τ en fonction de *Q*. Lors de ces expérimentations, la fonction de transfert entre 2 antennes placées dans la chambre fut mesurée à l'aide d'un analyseur de réseau, dans une bande de 200 MHz autour d'une fréquence centrale de 5 GHz. A partir de cette analyse fréquentielle, la réponse impulsionnelle du canal a été reconstituée, ce qui a permis un calcul de l'étalement des retards qui correspond au moment d'ordre 2 du profil de puissance. Le coefficient de qualité Q a été déterminé à l'aide de la relation classique reliant la puissance moyenne P_r reçue à la puissance P_t transmise :

$$Q = \frac{16\pi^2 V}{\lambda^2} \frac{< P_r >}{P_t} \qquad (3)$$

V et λ désignant respectivement le volume de la chambre et la longueur d'onde.

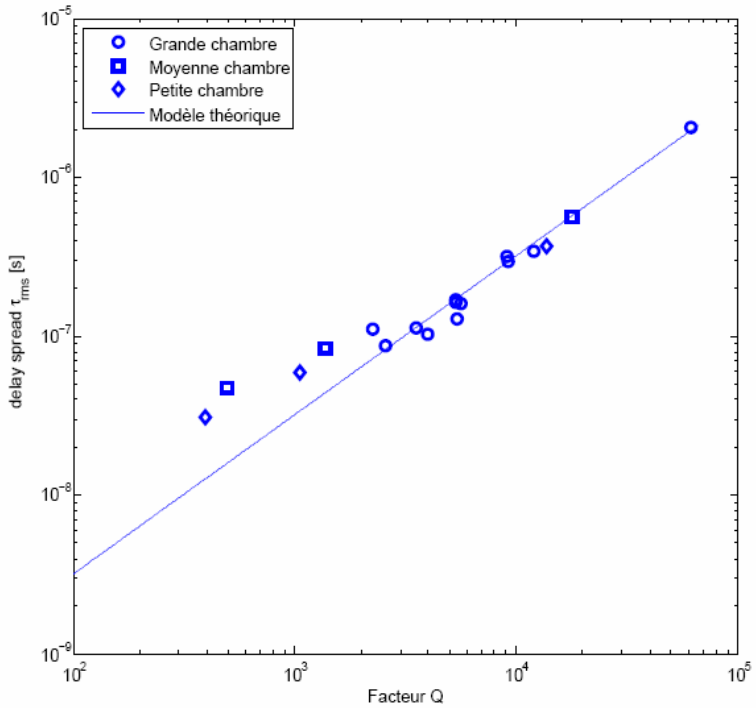

Figure 1 : Etalement des retards et coefficient de qualité de diverses chambres pour un nombre divers de panneaux absorbants

A titre indicatif, l'introduction dans la grande chambre de 4 panneaux absorbants permet de diminuer la valeur de *Q* à 2 500, correspondant à un étalement des retards de 80 ns environ.

La droite de la Fig. 1 correspond au calcul théorique de S_τ en fonction de *Q*, obtenu à partir de (1). On remarque que cette formule très simple permet de prédire de façon satisfaisante l'étalement des retards à condition que *Q* reste suffisamment important, soit 2 500 dans cet exemple.

Au vu de ces résultats, on peut donc conclure que la CRBM permet d'émuler des canaux de Rayleigh dont l'étalement des retards peut varier entre 80 ns et 1µs, cette plage de variation permettant de simuler des environnements correspondant aussi bien à l'intérieur des bâtiments qu'au milieu urbain. Il faut cependant souligner que, même en présence d'absorbants, la CRBM n'offre pas la possibilité de faire varier, de façon simple, le nombre de directions principales d'arrivée des rayons, associés aux « clusters » dans un environnement réel [7].

Si on souhaite utiliser une CRBM pour tester les performances d'une communication basée sur l'utilisation d'antennes multiples avec des techniques MIMO (Multiple Input Multiple Output), le rang de la matrice de transfert sera égal à la valeur minimum du nombre d'antennes d'émission ou de réception (Pour simplifier la présentation, on supposera par la suite que les réseaux d'antennes ont le même nombre *N* d'éléments). Cependant il est important de pouvoir émuler expérimentalement des canaux dont la matrice de transfert ***H*** est dégénérée, donc dont son rang est inférieur à *N*. En effet, dans certaines configurations réelles, les conditions de propagation entre les zones d'émission et de réception sont telles que le degré de diversité du canal se dégrade, pouvant mener dans des cas extrêmes à une dégénérescence complète connue sous l'appellation anglo-saxonne de « Key Hole » [3], [4].
Pour pouvoir émuler expérimentalement de tels canaux nous proposons d'utiliser 2 CRBM couplées entre elles par un guide d'onde.

2. Emulation de canaux MIMO à l'aide de chambres couplées : Analyse théorique

2.1. Principe de base

Pour pouvoir contrôler l'ordre de diversité du canal de propagation, donc l'ordre de la matrice ***H***, la configuration retenue est celle illustrée sur la Fig. 2.

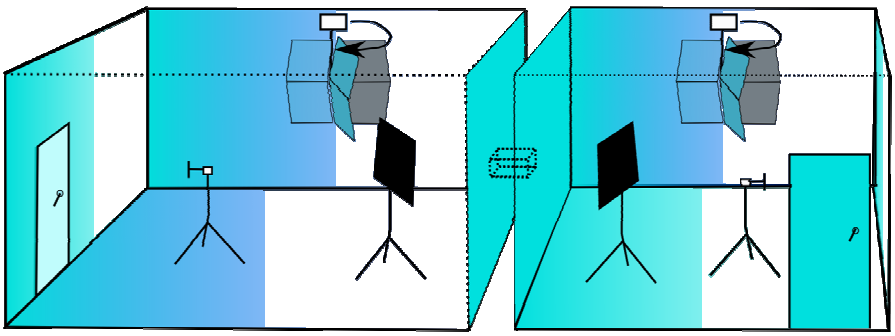

Figure 2 : Chambres couplées par un guide d'onde

Chaque réseau d'émission et de réception est placé dans une CRBM différente, un guide d'ondes reliant les deux chambres. Ce guide peut avoir des dimensions transversales quelconques, ce qui permet, pour une fréquence d'émission donnée, de contrôler le nombre de modes non évanescents et donc l'ordre de diversité du canal.
La première étape, décrite dans le paragraphe suivant, est de déterminer la puissance reçue dans la seconde chambre en mettant en évidence la contribution de chaque mode non évanescent dans le guide, cette contribution étant directement reliée à l'amplitude des valeurs singulières de la matrice ***H***.

2.2. Calcul de la puissance transmise

Le calcul est basé sur les propriétés statistiques d'une CRBM. Si on envisage tout d'abord l'émission et la réception dans la même chambre, le champ électrique en un point $\vec{r}$ à un instant *t* donné, donc pour une position de la pale du brasseur, s'exprime comme la somme d'ondes planes pondérées par leur spectre d'incidence $\vec{F}(t,\Omega)$ et peut donc se mettre sous la forme :

$$\vec{E}\left(t,\vec{r}\right)=\int_{\Omega}\vec{F}\left(t,\Omega\right)e^{-j\vec{k}.\vec{r}}d\Omega \qquad (4)$$

où $\vec{k}$ est le vecteur d'onde. Cette représentation du champ électrique n'est rigoureusement valable que loin des parois. Cependant, en première approximation, on supposera que le spectre incident sur l'entrée du guide d'ondes, de surface transversale *S*, reste isotrope dans une demi sphère.
En effectuant le produit scalaire entre les fonctions de base $\vec{e}_{nm}$ du guide associées à chaque mode (*n, m*) et l'expression du champ électrique incident, on peut en déduire l'amplitude de chaque mode A_{nm} :

$$A_{nm}=\int_{S}\int_{\Omega}\vec{e}_{nm}\left(r\right)\vec{F}\left(t,\Omega\right)e^{-j\vec{k}.\vec{r}}dS\,d\Omega \qquad (5)$$

Cette équation ne peut cependant être résolue car l'expression du spectre incident instantané est inconnue. On va donc s'intéresser uniquement à la valeur moyenne du carré de ce coefficient, ce qui nous permettra d'en déduire la puissance moyenne reçue lors d'une révolution du brasseur de modes. En se basant sur l'hypothèse d'ondes planes non corrélées, on peut montrer que le carré de l'amplitude de chaque mode excité est donnée par [8] :

$$<\left|A_{nm}\right|^2> = \frac{E_0^2}{8\pi}\int_{\Omega}\left|C_{nm}\left(\Omega\right)\right|^2 d\Omega \qquad (6)$$

Dans cette formule, E_0^2 est la valeur moyenne du carré du champ électrique régnant dans la CRBM :

$$<\left|E\right|^2> = E_0^2 \qquad (7)$$

Dans l'expression (6) $\left|C_{nm}\left(\Omega\right)\right|^2$ est obtenu à partir de l'intégrale suivante :

$$\left|C_{nm}\left(\Omega\right)\right|^2 = \left|\int_S \vec{e}_{Tnm}\left(\Omega,\vec{r}\right)e^{-j\vec{k}.\vec{r}}dS\right|^2 \qquad (8)$$

$\vec{e}_{Tnm}$ est le vecteur modal transverse.

Or on peut exprimer facilement la puissance moyenne P_{Tnm} transmise par un mode TE_{nm} en fonction de l'amplitude de ce mode, du vecteur modal transverse et de l'impédance transverse η_{TEnm}. En tenant compte du facteur d'atténuation exponentielle α_{TEnm} dans le guide si ce mode est évanescent, on aboutit à l'expression de la puissance transmise dans la deuxième CRBM [8] :

$$P_{Tnm} = \frac{1}{2\eta_{TE_{nm}}} <\left|A_{nm}\right|^2> e^{-2\alpha_{TEmn}d}\int_S \left|\vec{e}_{nm}\left(\vec{r}\right)\right|^2 dS \qquad (9)$$

2.3. Exemple de calcul de puissance transmise

Des simulations ont été effectuées en considérant, par exemple, un guide dont les dimensions transversales sont de 7.1x2.2 cm, la fréquence de coupure du deuxième mode étant de 4.225 GHz. Diverses courbes correspondant à cette configuration sont présentées sur la Fig. 3.

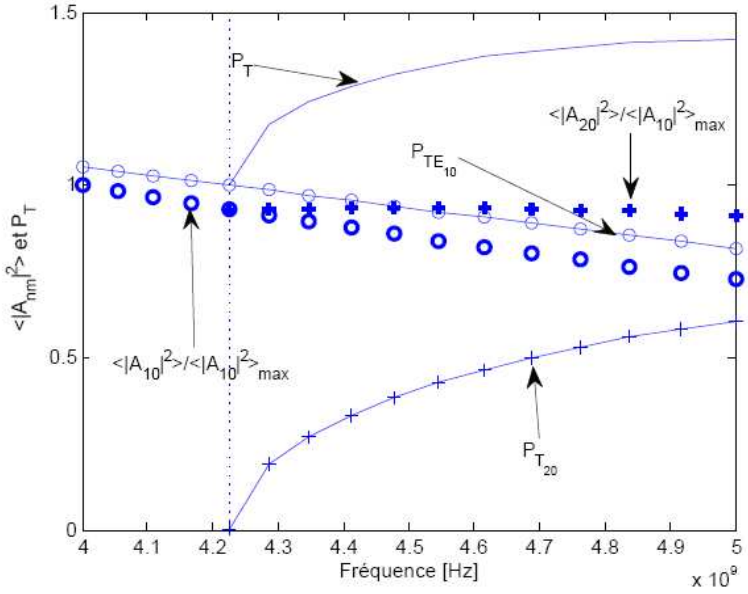

Figure 3 : Puissance totale injectée dans la deuxième chambre en fonction de la fréquence et contribution des deux premiers modes supportés par le guide d'onde

On remarque que l'amplitude du 2ème mode A_{20}, apparaissant au-delà de la fréquence de coupure du guide, varie peu en fonction de la fréquence, l'amplitude du premier mode A_{10} diminuant d'environ 20% entre 4 GHz et 5 GHz. Si on s'intéresse à la puissance de sortie du guide, les courbes P_{TE10} et P_{T20} correspondent respectivement à la puissance transmise à travers le guide par les modes TE_{10} et TE_{20}.
On remarque sur la Fig. 3 que la puissance du 2ème mode augmente progressivement après la fréquence de coupure.
Si on envisage un système MIMO 4x4, les réseaux d'émission et de réception comportant donc chacun 4 éléments, on peut s'attendre à ce que la matrice ***H*** soit totalement dégénérée pour des fréquences inférieures à la fréquence de coupure f_{c2} du 2ème mode, puis à un rang d'ordre 2 pour cette matrice si f> f_{c2}, mais reste inférieure à la fréquence de coupure du 3ème mode. En effet, comme nous l'avons déjà signalé, l'amplitude des valeurs singulières de ***H*** dépend directement du poids des modes se propageant dans le guide.

3. Emulation de canaux MIMO à l'aide de chambres couplées : Approche expérimentale

Nous allons tout d'abord envisager le cas d'une liaison entre les CRBM avec le guide d'ondes ayant les caractéristiques données dans le précédent paragraphe. La matrice de transfert a été mesurée à l'aide d'un analyseur de réseau, les antennes étant placées dans chacune des chambres, la fréquence d'émission variant entre 3.8 et 4.5 GHz. Le réseau MIMO est virtuel, une antenne d'émission et une antenne de réception étant déplacées pas à pas le long d'un rail de support, l'ensemble étant piloté par fibre optique relié à un calculateur. La simulation d'un système MIMO 4x4 mène aux valeurs singulières de ***H*** indiquées sur la Fig. 4.

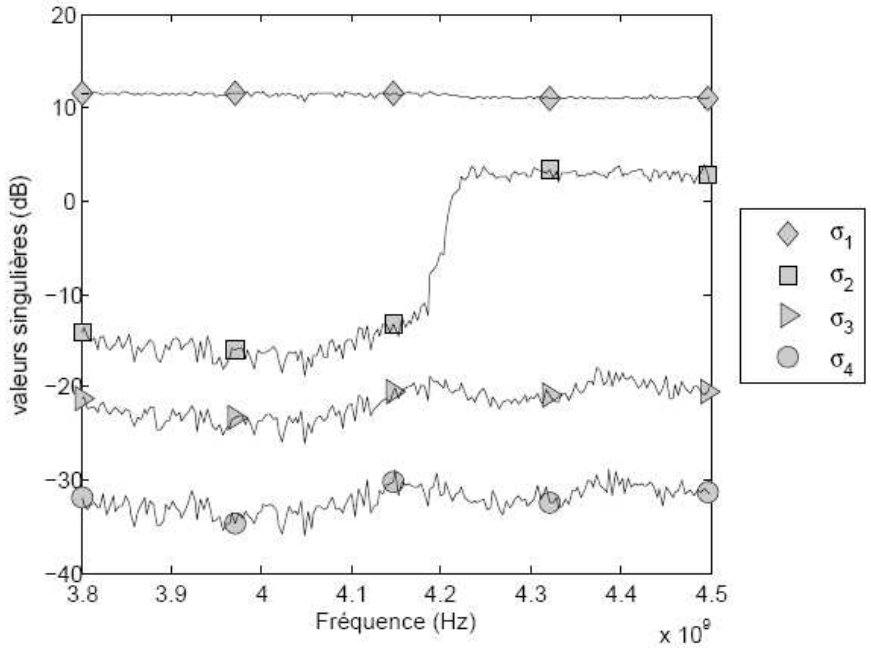

Figure 4 : Valeurs singulières en fonction de la fréquence. Cas d'une liaison MIMO 4x4.

On remarque qu'il n'existe qu'une seule valeur singulière d'amplitude non négligeable si f<4.2 GHz, puis on note l'apparition de la deuxième valeur singulière au-delà de cette fréquence, correspondant à la fréquence de coupure du guide. Cela se traduit, comme le montre la Fig. 5, par une augmentation rapide de la capacité du canal, tracée en supposant un rapport signal sur bruit (SNR) de 10 dB. Cette capacité a été calculée à partir de la formule générale classique [9], [10] :

$$C = \log_2\left[\det\left(I_N + \frac{SNR}{M} HH^+\right)\right] \qquad (10)$$

I est la matrice identité, N et M sont respectivement le nombre d'antennes de réception et d'émission et $^+$ correspond à l'opération transposée conjuguée.

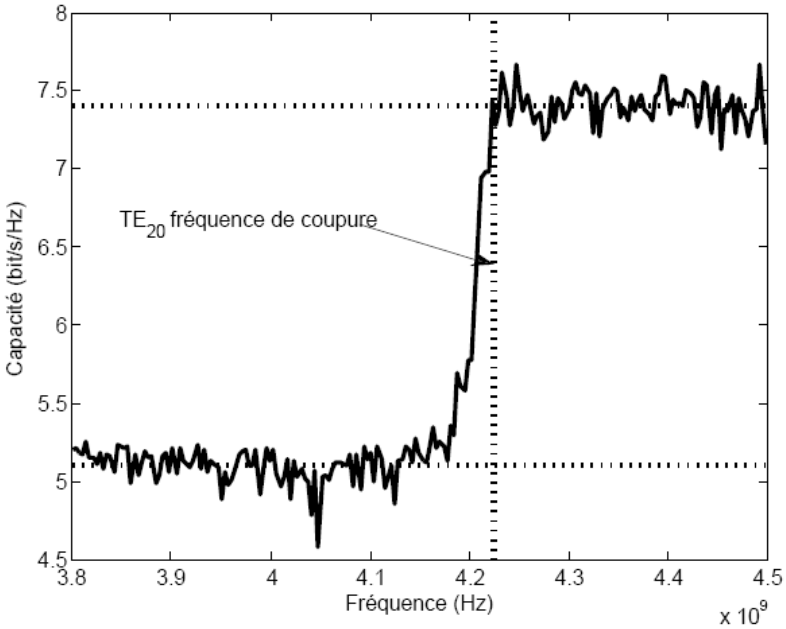

Figure 5 : Variation de la capacité du canal MIMO (4x4) en fonction de la fréquence

D'autres mesures ont été effectuées avec des guides de différentes dimensions transversales. Pour une fréquence d'émission de 3 GHz, la distribution des 4 valeurs singulières moyennes (pour un grand nombre de réalisation du canal, donc de position du brasseur) est représentée sur la Fig. 6. Ces valeurs sont issues des matrices de transfert mesurées en utilisant des guides qui, à la fréquence envisagée, sont passants pour le seul mode TE01 (« TE01 guide »), ou pour les modes TE01 et TE02 (« TE02 guide ») ou sont très largement surdimensionnés (« large guide »). A titre de comparaison, les valeurs singulières théoriques en supposant un canal de Rayleigh i.i.d (independent and identically distributed) sont également indiquées. Ces dernières valeurs sont évidemment en parfait accord avec celles obtenues avec le guide surdimensionné, la matrice $\boldsymbol{H}$ du canal ainsi émulé étant de rang plein. Lorsque le guide ne supporte que 2 ou 1 modes non évanescents, on obtient respectivement 2 ou 1 valeurs singulières non négligeables.

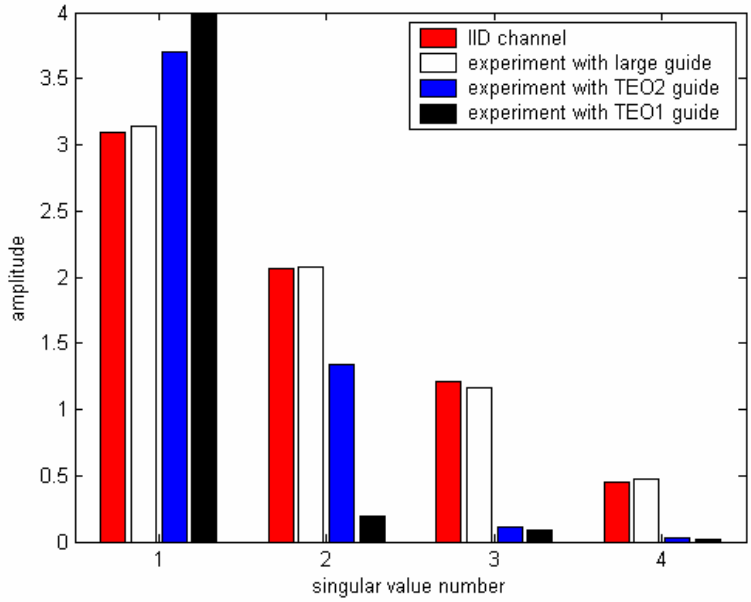

Figure 6 : Distribution des valeurs singulières pour différents types de guide

4. Modélisation du canal MIMO pour les chambres couplées

Nous avons choisi un modèle de type Kronecker [11], [12] pour le modèle de canal MIMO. Dans ce cas, on peut étendre les approches décrites dans la littérature à la configuration des chambres couplées. On peut ainsi mettre la matrice de transfert ***H*** sous la forme suivante [8] :

$$H = R_{RX}^{1/2} G_1 R_{Rw}^{1/2} T R_{Rw}^{1/2} G_2 \left(R_{TX}^{1/2} \right)^T \qquad (11)$$

Dans cette formule, R_{RX} et R_{TX} sont respectivement les matrices de corrélation entre antennes au récepteur et à l'émetteur qui peuvent être déduites des fonctions de corrélation en CRBM. G_1 et G_2 sont des matrices de type Rayleigh modélisant le canal dans chacune des chambres. La matrice R_w est la matrice de corrélation entre les excitations des modes et enfin la matrice T est la matrice de transfert au niveau du guide d'ondes.

A titre d'exemple, considérons une fréquence de 4.5 GHz. Le guide d'ondes étant celui mentionné précédemment, il supporte 2 modes non évanescents. L'espacement entre les éléments des réseaux virtuels est de 1.18 λ et des antennes dipôles ont été utilisées. Les courbes de la Fig. 7 représentent la densité de probabilité cumulée de la capacité du canal pour un SNR de 10 dB. La courbe théorique (« Modèle ») a été obtenue à partir de 1000 matrices générées grâce à (11). La courbe expérimentale (« Mesure ») est issue de l'ensemble des matrices ***H*** mesurées pour des positions successives du brasseur de modes, donc pour un ensemble de réalisations du canal.

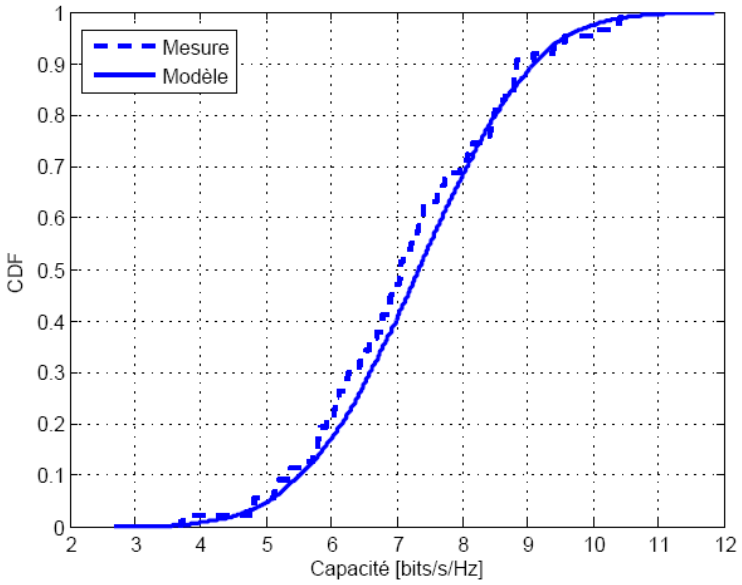

Figure 7 : Densité de probabilité cumulée pour la capacité du canal entre les chambres. Comparaison entre les prévisions issues des mesures de ***H*** et celles du modèle de Kronecker

On remarque sur cette Figure le bon accord entre les résultats expérimentaux et ceux issus du modèle de type Kronecker. Ces travaux ont été ensuite généralisés en large bande pour déterminer la réponse impulsionnelle du canal formé par les CRBM couplées et en déduire le profil de puissance-retard (PDP Power Delay Profile) [13].

5. Conclusion

Nous avons montré que l'utilisation de chambres réverbérantes couplées entre elles permet d'émuler des canaux de propagation MIMO tout en contrôlant leur degré de diversité. Pour cela, les dimensions transversales du guide d'ondes connectant les chambres sont choisies de telle manière que le nombre de modes non évanescents supportés par ce guide à la fréquence porteuse envisagée, corresponde au degré de diversité souhaité. L'utilisation d'un guide de grandes dimensions transversales, en terme de longueur d'onde, permet de retrouver une diversité totale, correspondant à une matrice de transfert

non dégénérée. Cette approche offre également la possibilité de modifier séparément les caractéristiques de chacune des chambres, et notamment leur coefficient de qualité, et donc les caractéristiques de propagation au voisinage de l'émetteur et du récepteur. Ce moyen de test devrait donc permettre de tester expérimentalement les systèmes de communication MIMO dans des environnements parfaitement définis et donc reproductibles.

Références bibliographiques

1- O. Delangre, Ph. De Doncker, M. Lienard and P. Degauque, "Analytical angular correlation function in a mode-stirred reverberation chamber", *Electronics Letters*, vol. 45, n° 2, pp. 90-91, Jan. 2009

2- C. L. Holloway, D. A. Hill, J. M. Ladbury, P. F. Wilson, G. Koepke, and J. Coder, "On the use of reverberation chambers to simulate a rician radio environment for the testing of wireless devices," *IEEE Trans. Antenas Propag.*, vol. 54, no. 11, pp. 3167–3177, Nov. 2006.

3- D. Chizhik, G. J. Foschini and R. A. Valenzuela, "Capacities of Multi-Element Transmit and Receive Antennas: Correlations and Keyholes", *Electronics Letters*, vol. 36, no. 13, pp. 1099-1100, June 2000.

4- P. Almers, F. Tufvesson and A. Molish, "Keyhole effect in MIMO wireless channels: Measurements and theory", *IEEE Trans. wireless Comm.*, vol. 5, n°2, pp. 3596-3604, Dec. 2006

5- K. Rosengren and P. Kildal, "Radiation efficiency, correlation, diversity gain and capacity of a six-monople antenna array for a MIMO system: Theory, simulation and easurement in a reverberation chamber", *IET Proc. Microwaves, Antennas and Propag.*, vol. 152, pp. 7-16, Feb. 2005

6- O. Delangre, P. De Doncker, M. Lienard and P. Degauque, "Delay spread and coherence bandwidth in reverberation chamber", *Electronics Letters,* vol. 44, n°5, pp. 328-329, 2008

7- P. Pajusco, "Modèle de propagation pour les systèmes radio-mobiles", *Journées Sci. CNFRS : Vers des radiocommunications reconfigurables et cognitives ",* Paris, 28-29 mars 2006

8- O. Delangre, "Caractérisation et modélisation du canal radio en chambre réverbérante", *Thèse Doctorat Univ. Lille et Univ. Libre de Bruxelles*, 2008

9- G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas", *Wireless Personal Comm.,* vol. 6, n°3, pp. 311-335, 1998

10- I. E. Telatar, "Capacity on multi-antenna Gaussian channel", *European Trans. on Telecom*, vol. 10, pp. 585-595, 1995

11- D. Chizhik, F. Rashid-Farrokhi, J. Ling and A. Lozano, "Effect of antenna separation on the capacity of BLAST in correlated channels", *IEEE Comm. Letters*, vol. 4, n°11, pp 337-339, Nov. 2000

12- D. Gesbert, H. Bolcskei, D. Gore and A. Paulraj, "MIMO wireless channels: capacity and performance prediction", *IEEE Proc. Globecom 2000,* vol. II, pp. 1083 – 1088, 2000

13- O. Delangre, Ph. De Doncker, M. Lienard and P. Degauque, "Wideband analysis of coupled reverberation chambers for testing MIMO systems", *IEEE PIMRC conf.,* Sept. 2006