



Principe de fonctionnement des réseaux d'antennes MIMO – Source IEMN.

Introduction à la caractérisation spatio-temporelle des canaux MIMO, en tunnel routier et stratégie d'allocation d'antennes

Martine Liénard

Médaille Ampère 2021

Professeure à l'université de Lille

Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie (IEMN) – UMR 8520

Cet article s'inscrit dans le contexte du déploiement des communications entre véhicules et infrastructure routière, et plus précisément dans un environnement particulier qui est celui d'un tunnel. Après une présentation de la méthode de caractérisation du canal, l'auteure présente les résultats issus de mesures ou de simulations numériques, ayant trait notamment aux pertes de propagation en tunnel et aux aspects spatio-temporels. En s'appuyant sur quelques exemples, l'importance de la caractérisation du canal pour l'optimisation d'un système de communication MIMO est mise en évidence.

Introduction

Le dimensionnement des réseaux sans fil, qu'ils soient dédiés aux réseaux mobiles ou au Wifi, nécessite au préalable de caractériser l'environnement dans lequel les signaux vont se propager d'un émetteur (Tx) vers un ou des récepteurs (Rx), équipés désormais de réseaux d'antennes. Généralement, les phénomènes de propagation tels que les réflexions et diffractions sur les bâtiments ou autres obstacles, vont donner naissance à des trajets multiples qui interfèrent entre eux,

ainsi qu'avec le trajet direct si Rx est en visibilité directe de Tx.

Dans une première étape, il faut définir les règles d'ingénierie associées au déploiement de ces réseaux, et notamment le lieu d'implantation des antennes de la station de base (BS, *Base Station*) couvrant une zone géographique donnée. Une caractérisation du canal de propagation à l'échelle macroscopique permettra ainsi de déterminer les pertes de puissance en fonction de la position relative de l'émetteur et du récepteur, ces pertes

étant dues notamment à la présence de nombreux obstacles entraînant des effets de masque.

La deuxième étape a trait, entre autres, à l'optimisation des formes d'onde à transmettre et de la taille des réseaux d'antennes, ainsi qu'au choix des algorithmes du traitement du signal. L'objectif est évidemment de maximiser le débit de la transmission au regard de la bande passante disponible, tout en respectant les contraintes imposées en termes de qualité de service et de temps de latence. A cette fin, une ca-

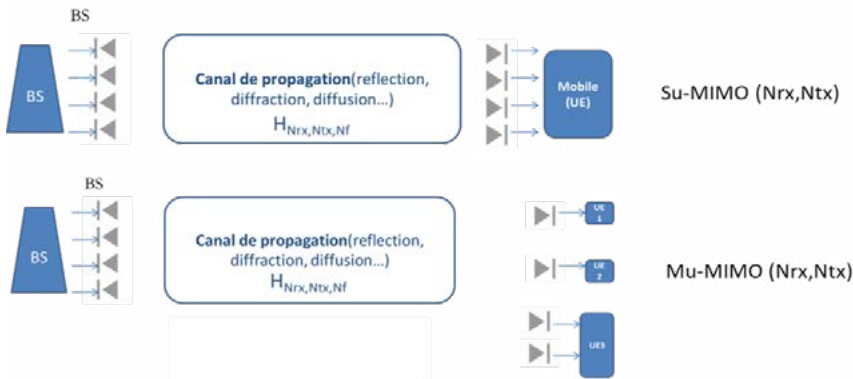


Figure 1 : Représentation schématique de l'ensemble station de base et canal, les antennes de réception étant affectées soit à un seul utilisateur (Su), soit à de multiples utilisateurs (Mu).

La caractérisation spatio-temporelle du canal est nécessaire et est basée sur des résultats issus soit de modèles de propagation, soit de campagnes de mesures menées sur le terrain. Cette caractérisation doit prendre en compte la structure des réseaux antennes des mobiles des utilisateurs, notés UEs (*User Equipment*), mais surtout de celle de la BS (*Base Station*) comportant généralement un grand nombre d'antennes. Pour simplifier la présentation, on s'intéressera aux liaisons «descendantes», de la BS vers les UEs, ce qui n'est pas une contrainte en soi, compte tenu de la réciprocité du canal. On aboutit ainsi à une liaison globale entre N_{tx} antennes d'émission et N_{rx} antennes de réception situées soit sur un seul UE dans le cas d'une liaison mono utilisateur (Su, *Single user*), soit réparties sur différents UEs (Mu, *Multiple users*). Le canal de propagation résultant est appelé MIMO (*multiple input - multiple output*), les «entrées multiples» et les «sorties multiples» étant celles du canal comme illustré sur la figure 1. On aboutit ainsi aux notations Su-MIMO et Mu-MIMO.

Si le nombre N_{tx} est important, de l'ordre de 64 ou plus, on utilise souvent la terminologie de «réseau massif».

L'objectif de cet article est de donner quelques exemples de caractérisation spatio-temporelle du canal et de montrer en quoi cette caractérisation procure une aide à la conception du système de transmission. Pour cela l'application qui a été choisie concerne les communications routières. En effet, de nombreux travaux sont entrepris actuellement pour rendre les véhicules routiers plus autonomes, ce qui implique une connexion fiable dans l'environnement et à faible temps de latence. Les véhicules doivent ainsi pouvoir communiquer, notamment avec l'infrastructure routière (V2I), et avec d'autres véhicules (V2V). La fréquence centrale normalisée est d'environ 5,9 GHz. La bande passante prioritaire dédiée en Europe pour cette application est de 60 MHz et les techniques de transmission possibles sont souvent identiques à celles de la 5G [1]. Les exemples ci-après traitent d'une

configuration particulière qui est celle de liaisons entre l'infrastructure et un ou des véhicules se déplaçant en tunnel.

Comment caractériser le canal de propagation ?

La modélisation numérique de la propagation est souvent basée sur la théorie des rayons. Si l'environnement a une géométrie très simple, on peut prévoir l'ensemble des rayons possibles qui, issus de Tx, peuvent atteindre Rx et donc en déduire le champ électrique complexe reçu, somme des champs associés aux rayons réfléchis et diffractés. Dans le cas contraire, on a recours à une méthode de lancer de rayons [2].

Le principe de cette approche peut être transposé expérimentalement grâce à un sondeur de canal. La fonction de transfert $H(i, j, f)$ est définie comme étant le rapport complexe de la tension aux bornes de l'antenne de réception i à la tension aux bornes de l'antenne d'émission j , pour une fréquence f d'émission donnée, ces antennes étant adaptées au circuit d'alimentation. Si la mesure est effectuée pour N_f fréquences et pour tous les liens possibles entre les N_{tx} et N_{rx} antennes, le canal sera caractérisé par une matrice de transfert $H(N_{rx}, N_{tx}, N_f)$. Il faut remarquer que, dans ce cas, les antennes sont incluses dans le canal de propagation. Les différentes photos de la figure 2 montrent ainsi le sondeur de canal «MaMIMOSA» [3] à 5,9 GHz utilisé lors des mesures décrites dans cet article. Toutes les antennes sont polarisées verticalement, la bande de fréquence utile est de 80 MHz, ●●●

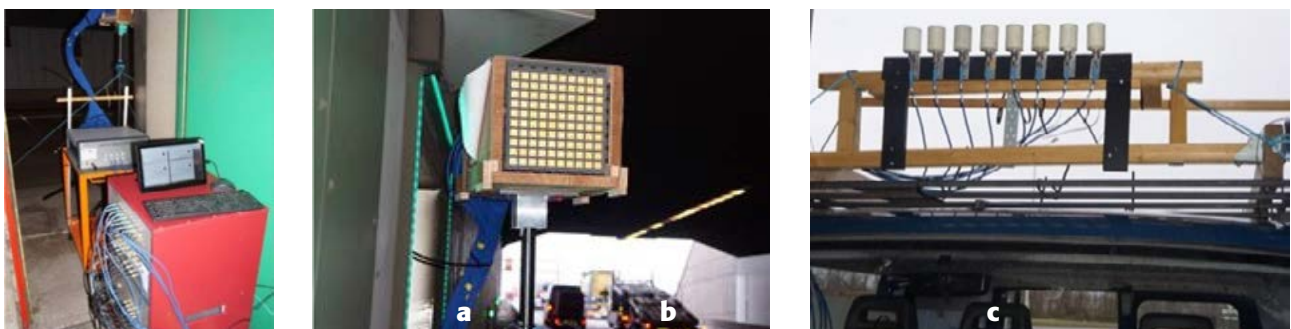


Figure 2 : Sondeur de canal : émetteur fixe (a) relié à un réseau de 64 antennes illuminant le tunnel (b), la réception se faisant dans cet exemple sur 8 antennes placées sur le toit d'un véhicule (c).

••• divisée en 818 sous-bandes, la technique de transmission étant l'«*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*» (OFDM), comme pour les liaisons 4G et 5G.

Les 64 antennes du réseau carré de Tx et les 8 antennes du réseau linéaire de Rx sont espacées de $\lambda/2$, λ étant la longueur d'onde. Cependant, dans les exemples qui seront présentés, on se limitera pour Rx, au réseau formé de 4 antennes séparées de λ . Comme on le remarque sur la figure 2b, le réseau fixe Tx, dont le plan est perpendiculaire à l'axe du tunnel, est positionné sur un chemin piéton étroit situé à proximité immédiate de la paroi verticale, le véhicule supportant le réseau Rx se déplaçant évidemment sur une voie du tunnel.

A quelles pertes de propagation peut-on s'attendre en tunnel ?

Le tunnel dans lequel les mesures ont été menées est rectiligne sur une distance de 900 m, de forme pratiquement rectangulaire, de 6 m de haut et de 10 m de large. Le sondeur permet de faire une mesure de la matrice H en 975 μ s et on peut donc estimer que, si le véhicule se déplace à 100 km/h, les caractéristiques du canal n'ont pas varié. Les matrices H(4,64,818) sont enregistrées avec une périodicité spatiale de 40 cm sur une distance totale de 900 m.

La configuration correspondant à un tunnel «vide», donc en absence de véhicules entre Tx et Rx, ne pouvant être réalisée lors des expérimentations, les résultats présentés pour ce cas sont issus d'une simulation numérique. Les calculs ont été menés en supposant une conductivité des parois de 10^{-2} S/m et une permittivité relative de 5.

Les courbes d'atténuation moyenne en fonction de la distance et pour différents environnements ont été tracées sur la figure 3. L'atténuation moyenne mesurée à une distance de 20 m avec le sondeur de canal a été choisie comme valeur de référence pour toutes les courbes, le moyennage s'effectuant sur l'ensemble des antennes Tx et Rx

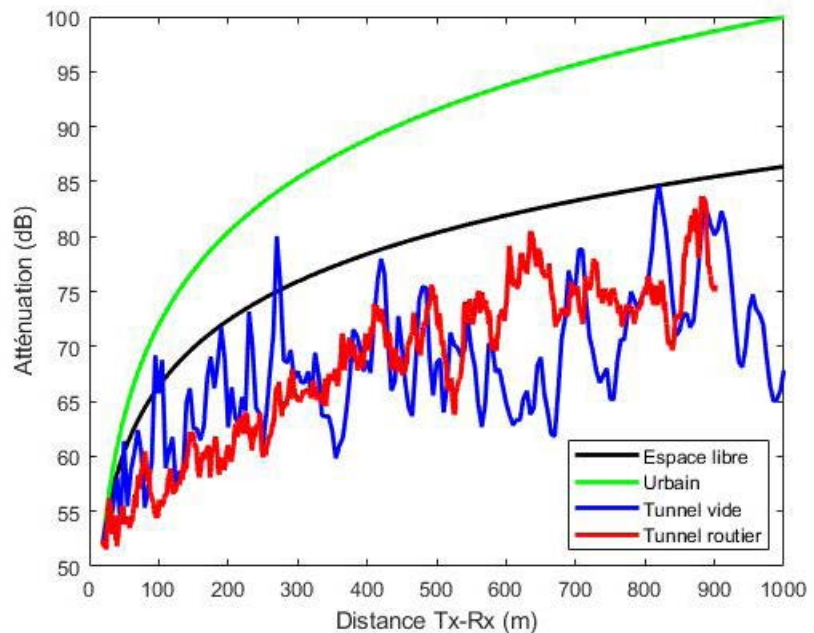


Figure 3 : Pertes (dB) en fonction de la distance Tx-Rx : a) prédites pour un tunnel vide, b) mesurées en tunnel routier, c) en espace libre et d) calculées à partir d'un modèle de propagation en site urbain. Le point de référence de toutes les courbes est l'atténuation mesurée à 20 m avec le sondeur.

et sur toutes les fréquences. Le faible écart entre la courbe du tunnel vide et celle du tunnel routier peut s'expliquer par un trafic constitué de voitures particulières et en absence de camions pouvant occasionner des effets de masque importants.

Une comparaison entre ces courbes et celle qui aurait été obtenue en espace libre, montre l'effet de guide du tunnel [4]. Pour un milieu urbain, des formules permettant de calculer l'atténuation moyenne ont été proposées par le 3GPP [5]. Si Tx et Rx sont en visibilité directe, la courbe d'atténuation résultante est également présentée sur la figure 3. Une formulation simple propose que l'atténuation de la puissance à une distance d de Tx, par rapport à une puissance de référence calculée ou mesurée à une distance d_0 se mette sous la forme : $10n \log(d/d_0)$. Le facteur n estimé en tunnel est de 1,35, il vaut 2 en espace libre et, en site urbain, il est compris entre 2,7 et 3.

En quoi consiste la caractérisation spatio-temporelle du canal ?

Comme mentionné précédemment, les réseaux déployés seront des réseaux

5G. En site urbain, la taille des réseaux en termes de nombre d'antennes peut atteindre 64 pour les bandes inférieures à 6 GHz. Si chaque antenne est connectée à une chaîne radio fréquence (RF), cette solution est très énergivore. Cependant, suivant les scénarios, cette configuration n'est pas forcément nécessaire car l'optimisation de la géométrie et de la taille du réseau dépend fortement des caractéristiques spatiales du canal, comme nous le verrons ultérieurement. Il est donc important de déterminer l'étalement des angles de départ des rayons AoD (*Angle of Departure*) à Tx et de leurs angles d'arrivée AoA (*Angle of Arrival*) à Rx, ces angles étant reliés aux trajets suivis par le signal. La corrélation entre les antennes du réseau, notamment celles de Tx, doit également être déterminée.

Distribution des angles de départ et d'arrivée des rayons

La figure 4 est une représentation schématique de l'étalement angulaire des rayons dans un tunnel routier et en site urbain. Dans le premier cas, le tunnel se comportant comme un guide d'ondes

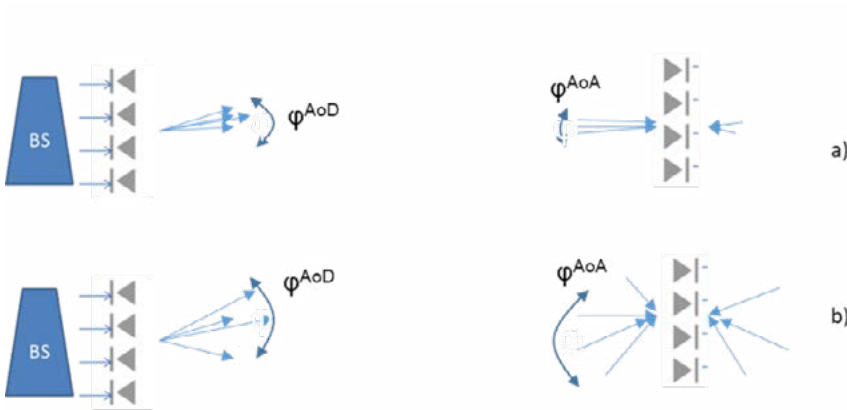


Figure 4 : Représentation schématique des angles d'azimut de départ à Tx et d'arrivée à Rx : a) en tunnel routier et b) en site urbain.

surdimensionné à pertes, les trajets les plus énergétiques sont ceux ayant subi un minimum de réflexion sur les parois. Lorsque la distance Tx-Rx est grande, on peut donc s'attendre à un faible étalement angulaire tant à Tx qu'à Rx. En site urbain, par contre, et notamment pour une couverture macro cellulaire, Tx sera souvent placé en espace dégagé. Il en résulte que l'étalement angulaire des rayons sera souvent plus important à Rx qu'à Tx.

La valeur médiane de l'étalement angulaire calculé pour le tunnel vide est d'environ 6° si la distance Tx-Rx est supérieure à quelques centaines de mètres. A courte distance, cet étalement augmente car les rayons arrivant sous un angle important d'incidence sur les parois ne subissent pas une atténuation prohibitive, compte tenu du peu de nombre de réflexions nécessaires pour relier Tx à Rx.

Dans un tunnel en présence de trafic, l'ensemble des rayons arrivant à Rx peut approximativement être divisé en deux paquets : les rayons se propageant dans le sens Tx vers Rx et ceux se propageant dans le sens contraire, provoqués par les réflexions arrières sur les véhicules. L'étalement angulaire de ces deux paquets reste faible, du même ordre de grandeur qu'en tunnel vide. A titre de comparaison, en milieu urbain, l'étalement des AoA et des AoD est compris respectivement entre 45° et 55° d'une part, et entre 14° et 21° d'autre part, suivant la configuration géométrique de l'environnement et de la position relative de Tx et Rx (en ligne de vue ou non).

Etalement des retards

Les divers trajets possibles entre Tx et Rx ayant des longueurs différentes, la réponse impulsionnelle du canal pour

une liaison donnée sera caractérisée par un profil de puissance qui traduit donc la variation de la puissance reçue en fonction du temps, la référence de temps choisie étant celle de l'arrivée du premier rayon à Rx. Un exemple est donné sur la figure 5 dans le cas du tunnel vide, du tunnel routier et d'un milieu urbain [5], le signal impulsionnel émis occupant une bande de 80 MHz.

Compte tenu de la bande d'analyse fréquentielle, une seule impulsion est visible pour le tunnel vide. Par contre, en tunnel routier, les retards de certaines impulsions atteignent $2 \mu\text{s}$. Comme nous l'avons déjà signalé, elles sont dues aux réflexions multiples sur les véhicules situés soit entre Tx et Rx, soit au-delà de Rx. On note également que, dans un milieu urbain, une succession d'impulsions apparaissent.

Afin de caractériser cette dispersion des retards par une seule valeur, on introduit la notion d'étalement des retards qui prend en compte l'ensemble de ces retards mais en pondérant chacun d'entre eux par la puissance qui lui est associée. En tunnel vide et en tunnel routier, cet étalement a été calculé pour chaque position de Rx. La valeur médiane et l'écart type qui en résultent, sont donnés dans le tableau 1, la valeur du dernier décile (probabilité à 90%) étant également mentionnée. L'étalement en milieu urbain, basé sur les formulations décrites dans [5] est aussi indiqué.

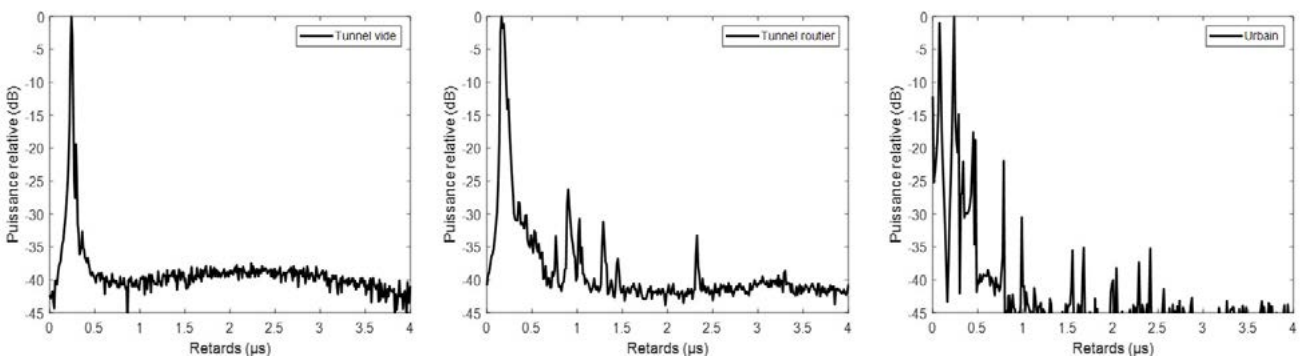


Figure 5 : Réponses impulsionnelles : a) en tunnel vide, b) en présence de trafic et c) en milieu urbain.

Étalement des retards	Tunnel vide	Tunnel en présence de trafic	Urbain
Médian	6 ns	100 ns 200 ns à 90%	363 ns à 1148 ns
Ecart-type	1 ns	95 ns	-

Tableau 1 : Étalement des retards pour divers environnements.

La connaissance de l'étalement des retards est importante d'un point de vue système de communication car, en 5G, la bande de fréquence disponible est divisée en sous-bandes, un UE pouvant transmettre simultanément dans plusieurs sous-bandes qui présentent un rapport signal sur bruit SNR (*Signal to Noise Ratio*) élevé ou, dans d'autres cas, plusieurs UEs peuvent utiliser la même sous-bande. Le choix des paramètres de la liaison va donc dépendre des caractéristiques temporelles et fréquentielles du canal. Dans le tunnel vide, par exemple, l'étalement des retards est très faible, de l'ordre de 6 ns et le canal n'est donc pas sélectif en fréquence. Il aura un comportement peu dépendant de la fréquence dans la bande disponible et, pour une distance Tx-Rx donnée, toutes les sous-bandes présenteront des atténuations voisines contrairement au cas du tunnel routier. La stratégie d'allocation fréquentielle des ressources vers les utilisateurs va dépendre de cette sélectivité fréquentielle.

Corrélation entre antennes

Une autre caractéristique importante d'une liaison entre un réseau d'antennes d'émission et un réseau de réception est la corrélation existant entre chaque antenne d'émission ou entre chaque antenne de réception. En effet, si on envisage par exemple une seule antenne de réception Rx et 2 antennes d'émission Tx1 et Tx2, les champs reçus pour les liens Rx-Tx1 et Rx-Tx2, et pour différentes valeurs de fréquence, seront fortement corrélés ou non suivant le degré de diversité du canal de propagation. La connaissance de la corrélation entre antennes

permet de choisir de façon optimale la technique de transmission à utiliser.

Envisageons tout d'abord le cas du tunnel vide simulé numériquement. La configuration choisie est la même que celle des expérimentations. Les deux premières courbes de la figure 6 montrent, en fonction de la distance Tx-Rx, la corrélation moyenne sur le réseau Tx entre 2 antennes d'émission séparées de $\lambda/2$ et situées sur une même ligne, soit horizontale, soit verticale.

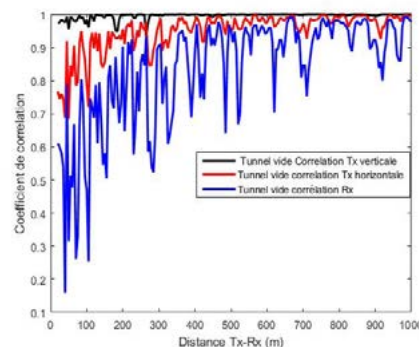


Figure 6 : Canal MIMO(4,64) : a) Corrélation entre 2 antennes de Tx séparées de $\lambda/2$ et alignées soit horizontalement, soit verticalement, b) Corrélation entre 2 antennes de Rx séparées de λ .

Lorsque les 2 antennes sont alignées verticalement, elles sont très fortement corrélées, quelle que soit la distance. En revanche, pour un alignement horizontal, le coefficient de corrélation est de l'ordre de 0,7 – 0,8 à une distance d de 50 m puis augmente de façon continue pour atteindre des valeurs proches de 0,9 pour $d \geq 500$ m. Cette différence de comportement entre alignement horizontal et vertical est due à la forme rectangulaire du tunnel et à la position du réseau Tx au voisinage de la paroi. La plus faible corrélation pour de courtes distances s'explique par le plus grand étalement angulaire des rayons, donc une diversité plus importante, comme signalé précédemment. La corrélation en Rx est plus faible qu'en Tx car d'une part l'espacement entre antennes est de λ et non de $\lambda/2$, et, d'autre part, ces antennes sont éloignées de la paroi.

Pour résumer l'ensemble des résultats, trois colonnes du tableau 2 donnent les valeurs moyennes du coefficient de corrélation entre 2 antennes successives sur toute la distance Tx – Rx et déduites, soit de la simulation pour le tunnel vide, soit des mesures pour le tunnel routier. Les valeurs pour le milieu urbain, calculées à partir des formules proposées dans [5], ont également été indiquées. D'un point de vue pratique, les corrélations ainsi calculées correspondent à une liaison Su-MIMO, les antennes de Rx étant co-localisées. La dernière colonne a trait à une configuration Mu-MIMO, les différents UEs étant associés à des véhi-

Corrélation	Tx réseau vertical	Tx réseau horizontal	Rx (Su-MIMO)	Corrélation entre 2 UEs (Mu-MIMO)
Tunnel vide	0,99	0,95	0,83	0,62
Tunnel routier	0,96	0,85	0,71	0,65
Urbain	0,94	0,65	0,42	0,26

Tableau 2 : Corrélation moyenne entre 2 antennes successives de Tx, et de Rx pour une liaison Su-MIMO, et entre 2 UEs pour une liaison Mu-MIMO.

cules situés à 15 m les uns des autres et chaque UE ne disposant que d'une seule antenne. Les valeurs données correspondent donc à la corrélation moyenne en réception entre 2 UEs successifs

Quelle structure de réseaux d'antennes faut-il choisir ?

Les performances en termes de débit maximum transmissible, et donc de capacité du canal, sont exprimées en bit/s/Hz. Si des signaux différents sont envoyés à chacune des N_{tx} antennes, le nombre de chaînes radio fréquences (RF) nécessaires, égal à N_{tx} , peut devenir, pour des réseaux de grande taille, prohibitif en termes de consommation énergétique et de coût. Pour parer à cette difficulté, une solution possible est de partitionner le réseau en M sous-réseaux de P éléments, soit $N_{tx} = M \cdot P$. Le nombre de chaînes RF devient dans ce cas égal au nombre M de sous-réseaux.

Dans la littérature, ces systèmes antennaires sont appelés «MIMO massifs hybrides». Cette solution accroît le gain dans la direction perpendiculaire au plan du réseau, voire dans d'autres directions à condition d'introduire des déphaseurs dans les circuits d'alimentation de chaque antenne des sous-réseaux. Il est important de noter que la taille optimum de ces sous-réseaux va dépendre de l'étalement angulaire des AoD en élévation et azimut et de la corrélation entre les éléments du réseau [6]. En tunnel, les rayons les plus énergétiques sont ceux qui se propagent dans des directions

voisines de celle de l'axe du tunnel. Si le réseau est placé perpendiculairement à cet axe, l'intégration de déphaseurs n'est donc pas utile. Un sous-réseau est équivalent, pour cette application, à une antenne directive présentant un gain en puissance égal à P . Nous considérerons, comme précédemment, un réseau carré Tx de 64 antennes, qui avait d'ailleurs été proposé initialement pour déployer la 5G en site urbain. Une décomposition de ce réseau en M sous-réseaux est illustrée en figure 7.

Une des questions qui se pose est de savoir quelle est la taille optimale des sous-réseaux permettant de transmettre un débit maximum. Cette taille dépend-elle, par exemple, de la stratégie d'allocation des ressources vers le ou les utilisateurs ? Pour illustrer la démarche qui pourrait être suivie pour répondre à ce type de question, on se limitera à l'utilisation de quelques algorithmes de traitement du signal. On envisagera successivement les cas d'une liaison Su-MIMO puis Mu-MIMO.

Performances obtenues en liaison mono-utilisateur (Su-MIMO)

Pour des applications Su-MIMO, deux techniques de transmission des informations sont comparées. Tout d'abord, une technique simple de formation de faisceaux (*beamforming*), et notée par la suite BFtx, consiste à considérer le réseau initial global comme une antenne directive procurant donc un gain de réseau de 64. Comme toutes les antennes sont alimentées en phase, le lobe principal de

rayonnement est dirigé suivant l'axe du tunnel. Dans ce cas une seule chaîne RF est nécessaire. Au récepteur, si $N_{rx} > 1$, on combine les signaux reçus par chaque antenne pour maximiser le SNR.

Une autre méthode basée sur la décomposition en valeurs singulières de la matrice H , dite SVD (*Singular Value Decomposition*), permet de rendre le canal équivalent à un certain nombre de sous canaux orthogonaux dans lesquels des informations différentes peuvent être envoyées simultanément [7]. Si le canal est riche en trajets multiples, il est ainsi possible d'atteindre le débit maximum théorique. Cependant la mise en œuvre de la technique SVD permettant donc un gain de multiplexage, se fait au prix d'une complexité accrue au regard de celle de BFtx.

A titre d'exemple, les courbes de la figure 8 présentent la variation de la capacité en fonction de la distance Tx-Rx obtenue avec les méthodes BFtx et SVD. Dans ce dernier cas, on envisage, soit 64 chaînes RF alimentant les 64 antennes de Tx, soit 8 chaînes RF connectées aux 8 sous-réseaux formés d'éléments verticaux (figure 7d). Le nombre Rx d'antennes de réception co-localisées sur l'UE est de 4, et la puissance d'émission a été normalisée de telle façon que le SNR moyen à 900 m soit de 10 dB.

On remarque tout d'abord sur la figure 8 que les résultats avec la technique SVD utilisant les 64 chaînes RF sont moins bons que ceux obtenus avec 8 sous-réseaux. En effet, la corrélation moyenne

●●●

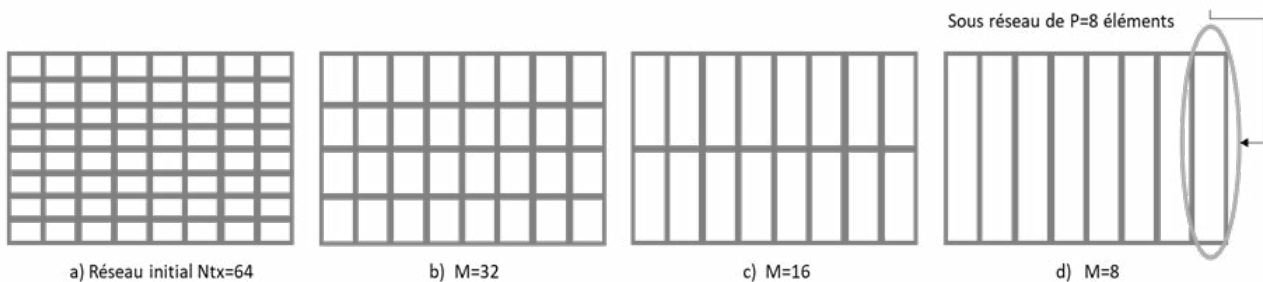


Figure 7 : Différentes structures de réseaux d'antennes : a) réseau initial de 64 antennes, b) ensemble de sous-réseaux de 32 antennes ($M=32$, $P=2$), c) de 16 antennes ($M=16$, $P=4$), et d) de 8 antennes ($M=8$, $P=8$).

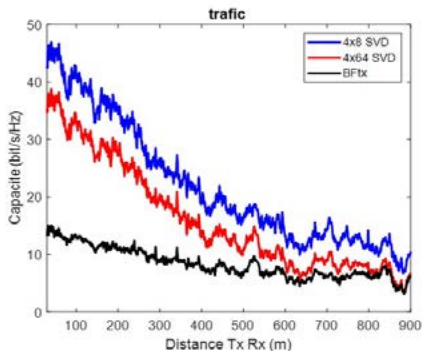


Figure 8 : Tunnel routier : capacité du canal basée sur l'utilisation soit du *beamforming* (BFTx), soit de la méthode SVD, Tx étant partitionné en 8 sous-réseaux (courbe notée 4x8 SVD) ou non (courbe 4x64 SVD).

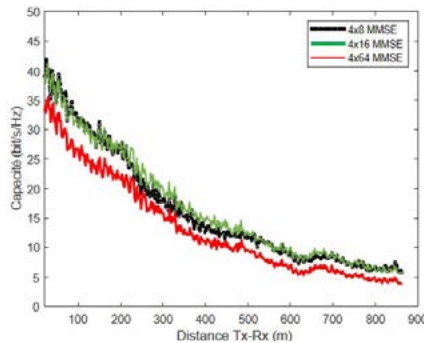


Figure 9 : Capacité totale des liaisons avec 4 UEs, obtenue avec la technique MMSE et en utilisant soit les 64 antennes de Tx (courbe 4x64), soit une décomposition du réseau Tx en 8 sous-réseaux (courbe 4x8) ou en 16 sous-réseaux (courbe 4x16).

entre les éléments d'une colonne du réseau est proche de 1, comme indiqué dans le tableau 2. Il en résulte que l'utilisation d'un réseau carré de 64 éléments pour le SVD n'apporte ni gain de multiplexage, ni gain en puissance. Par contre dans la configuration de la figure 7d, comme chaque sous-réseau comporte 8 éléments, un gain de 9 dB est obtenu.

On note de plus sur la figure 8 que la capacité décroît avec la distance car deux phénomènes entrent en jeu : la diminution de la puissance reçue et l'augmentation de la corrélation entre chacun des éléments du réseau ou entre chaque colonne des 8 sous-réseaux. En effet, comme nous l'avons déjà signalé, l'étalement angulaire des AoA devient de plus en plus faible quand la distance augmente, entraînant une diminution de la diversité du canal due aux trajets multiples. Dans ce cas, la technique SVD de décomposition du canal en modes orthogonaux montre qu'un seul mode contribue de façon significative à la liaison. Cela revient à créer mathématiquement une antenne directive de 64 antennes. On retrouve ainsi à grande distance, avec le SVD, un résultat très voisin de celui obtenu par la technique BFTx. A plus courte distance, par contre, la diversité est suffisamment importante pour que les performances SVD soient nettement meilleures que celles de BFTx.

Performances obtenues en liaison multiutilisateurs (Mu-MIMO)

Dans les exemples qui seront présentés, on suppose que Tx veut établir une liaison simultanée vers 4 ou 8 UEs en utilisant pour chaque lien la même bande de fréquence, donc le même canal. On suppose de plus que chaque UE ne dispose que d'une seule antenne et que la distance séparant 2 UEs successifs est de 15 m. Pour que chaque UE puisse extraire de l'ensemble des signaux transmis ceux qui lui sont destinés, une stratégie de précodage doit être choisie pour pouvoir séparer les flux de données en réception. Les techniques les plus usuelles sont : le «Zero Forcing» (ZF), le «Maximum Ratio Transmission» (MRT) et le «Minimum Mean-Squared Error» ou Minimisation de l'Erreur Quadratique Moyenne (MMSE), chacune d'elles répondant à un objectif déterminé. Celui du ZF est de minimiser les interférences entre UEs mais en ne prenant pas en compte l'effet du bruit. ZF est donc adapté à des canaux à fort SNR. Le MRT maximise le SNR au niveau de chaque UE mais, comme il ne prend pas en compte la corrélation entre UEs, celle-ci doit être faible pour obtenir des performances intéressantes. Enfin le précodage MMSE assure un compromis entre la maximisation de la puissance du signal reçu par chaque UE et la minimisation des interférences. C'est ce dernier qui a été choisi dans les prochains exemples. Pour 4 UEs, les courbes de la figure 9 donnent la capa-

L'auteure

Martine Liénard a obtenu un doctorat en télécommunications à l'Université de Lille en 1993.



Depuis 1990, elle fait partie

du groupe Télécommunications, Interférences et Compatibilité Electromagnétique (TELICE) de l'Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN) de l'Université de Lille, UMR CNRS 8520, où elle est actuellement professeur.

Ses présentes recherches portent sur les techniques d'apprentissage du canal de propagation pour optimiser l'allocation de ressources, la prédiction théorique et expérimentale des caractéristiques de propagation en environnement complexe, les défis MIMO et MIMO massif, principalement dédiés aux systèmes de communication des transports ferroviaires, routiers et à l'industrie 4.0. Depuis 1993, elle participe à diverses actions de recherche concertée européenne COST, dont les travaux contribuent au développement et déploiement des réseaux mobiles et internet des objets. Martine Liénard s'est vu également attribuer la médaille Ampère de la SEE en 2021.

“ [...] La caractérisation multidimensionnelle du canal de propagation est un outil indispensable pour optimiser notamment les systèmes de communication 5G utilisant, à la station de base, des réseaux antennaires de grande taille.”

capacité totale transmise dans le canal, somme des capacités individuelles obtenues pour chaque liaison Tx-UE. La distance indiquée en abscisse est celle entre Tx et l'UE qui lui est le plus proche. On envisage trois configurations du réseau Tx : 1) le réseau total de 64 antennes, non partitionné, (figure 7a) ; 2) seize sous-réseaux ayant chacun 4 éléments (figure 7c) ; 3) huit sous-réseaux de 8 éléments (figure 7d). On suppose, comme précédemment, que le SNR moyen à l'extrémité du tunnel est de 10 dB.

La comparaison des figures 8 et 9 montre que, pour les configurations choisies, la capacité totale du canal est du même ordre de grandeur pour une liaison Su-MIMO et Mu-MIMO. On note de plus sur la figure 9 que l'utilisation de 64 chaînes RF pour le réseau Tx non partitionné, n'est pas optimal, 8 ou 16 sous-réseaux donnant de meilleurs résultats en termes de capacité. La décroissance de la capacité en fonction de la distance est due, comme mentionné plus haut, à la diminution du SNR moyen et à la corrélation plus importante entre les antennes de Tx.

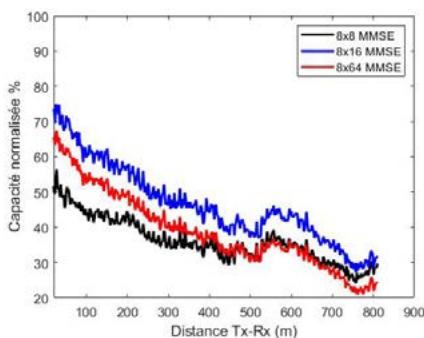


Figure 10 : Capacité totale en tunnel, normalisée par rapport à celle obtenue en canal de Rayleigh. Cas de 8 UEs.

Pour mettre clairement en évidence le rôle de cette corrélation, envisageons le cas de 8 UEs, distants de 15 m l'un de l'autre, le réseau Tx étant ou non décomposé en sous-réseaux. La capacité totale du canal a été normalisée par rapport à celle qui aurait été obtenue dans un environnement riche en trajets multiples, chacun d'eux ayant une amplitude et une phase aléatoire, et qui sert souvent de canal de référence (canal de Rayleigh). Pour que cette normalisation puisse avoir un sens, le SNR en canal de Rayleigh a été choisi égal au SNR de chaque UE lors de ses positions successives en tunnel. Les courbes de la figure 10 ne mettent donc en évidence que l'influence de la corrélation entre les antennes ou les sous-réseaux de Tx, la corrélation entre les UEs distants de 15 m étant très faible.

La configuration la plus favorable est celle pour laquelle Tx a été partitionné en 16 sous-réseaux, la capacité en début de tunnel atteignant 75 % de la valeur qui aurait pu être obtenue en canal de Rayleigh car le canal est riche en trajets multiples dans cette zone. Lorsque la distance augmente, la corrélation devient de plus en plus importante, les caractéristiques du canal s'écartent de celles de Rayleigh et la capacité normalisée n'est plus que de 20 % à l'extrémité du tunnel.

Conclusion

Grâce à quelques exemples, nous avons montré que la caractérisation multidimensionnelle du canal de propagation est un outil indispensable pour optimiser

notamment les systèmes de communication 5G utilisant, à la station de base, des réseaux antennaires de grande taille. Nous avons vu en particulier que de tels réseaux sont très bien adaptés au milieu urbain compte tenu de la richesse du canal en trajets multiples. On peut ainsi tirer parti de la diversité spatiale pour assurer des débits de transmission importants vers un ou de nombreux terminaux mobiles. En tunnel par contre, les ondes étant guidées par le tunnel, la corrélation entre les antennes d'émission est importante. Dans ce cas, une stratégie d'allocation d'antennes groupées en sous-réseaux verticaux permet d'assurer le meilleur compromis entre gain de réseau et gain de diversité. ■

Références

- [1] 5G automotive Association, "Position paper on European Deployment band configuration for C-V2X at 5.9 GHz in Europe," https://5gaa.org/wp-content/uploads/2021/06/5GAA_S-210019_Position-paper-on-European-deployment-band-configuration-for-C-V2X_final.pdf, June 2021
- [2] E. Egea-Lopez, J. M. Molina-Garcia-Pardo, M. Lienard, and P. Degauque, «Opal: An open source ray-tracing propagation simulator for electromagnetic characterization», *PLoS ONE* vol. 16, no.1: e0260060, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260060>, Nov. 2021
- [3] P. Laly, G. Delbarre, F. Challita, E. Tanghe, E. P. Simon, D. P. Gaillot, W. Joseph, and M. Liénard, "Massive Radio Channel Sounder Architecture for 5G Mobility Scenarios : MaMIMOSA," 14th European Conf.on Antennas and Propag., EuCAP 2020, Copenhagen, Denmark, Mar. 15-20, 2020.
- [4] M. Lienard, C. Sanchis-Borras, J. M. Molina-Garcia-Pardo, D.P. Gaillot, P. Laly, and P. Degauque, «Performance analysis of antenna arrays in tunnel environment», *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 13, pp. 122-125, Jan. 2014.
- [5] 3GPP TR 38.901: «5G; Study on Channel model for frequency 0.5 to 100 GHz», July 2018.
- [6] F. Challita, M.T. Martinez-Ingles, M. Liénard, J.M. Molina-Garcia-Pardo, and D.P. Gaillot, "Evaluation of an antenna selection strategy for reduced massive MIMO complexity," *Radio Science*, vol. 56, no. 5, pp. 1-18, Mar. 2021.
- [7] T. L. Marzetta, E. G. Larsson, H. Yang, and H. Q. Ngo, «Fundamentals of Massive MIMO», Ed. Cambridge Univ. Press, 2016.