

ÉVALUATION DE LA PORTÉE DES LIAISONS SANS FIL GRÂCE À LA TECHNOLOGIE MIMO

par

Guillaume COUILLARD

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE CONCENTRATION RÉSEAUX DE
TÉLÉCOMMUNICATIONS

M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 6 JUIN 2019

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Guillaume Couillard, 2019



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. François Gagnon, Directeur de Mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Georges Kaddoum, Président du Jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Ammar Kouki, Membre du Jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 14 MAI 2019

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

J'aimerais prendre le temps de remercier mon directeur de maîtrise, Professeur François Gagnon ainsi que monsieur Ghassan Dahman pour le temps, l'encadrement et les nombreux conseils qu'ils m'ont tous deux donnés durant la totalité de mon projet de maîtrise. Ce sont ces nombreux conseils qui m'ont poussé à étendre mes connaissances et me guider dans la progression de ma recherche.

Je désire aussi adresser mes remerciements à la compagnie Ultra Electronics TCS ainsi qu'à mon directeur de maîtrise François Gagnon pour la « Chaire de recherche industrielle CRSNG Ultra Electronics TCS en communication sans fil tactiques d'urgence de haute performance » pour avoir subventionné ma recherche dans ce domaine. Ce partenariat m'a aussi poussé à faire une recherche dans un domaine fascinant, ce qui a rendu cette maîtrise non seulement accessible, mais palpitante.

Finalement, j'aimerais remercier les membres de ma famille, mes amis ainsi que ma petite amie qui m'ont supporté moralement de par leurs conseils et leurs encouragements tout au long de ma recherche.

Portée des liaisons sans fil grâce à la technologie MIMO

Guillaume COUILLARD

RÉSUMÉ

De par l'augmentation grandissante des communications sans fil dans de nombreux domaines, nous observons une augmentation de la demande dans les capacités des systèmes de transmission. Dans le monde des communications cellulaires par exemple, on cherche entre autre à augmenter la quantité de données qu'on peut envoyer dans un certain laps de temps. Pour augmenter cette capacité de donnée, une des techniques utilisées consiste à augmenter la quantité d'antennes à la transmission ainsi qu'à la réception, soit la technologie MIMO.

Dans le cadre du partenariat industriel avec la compagnie Ultra Electronics TCS, ce mémoire s'intéresse à un scénario où une tour de transmission fixe cherche à maintenir une communication sans fil avec une unité éloignée. Plus particulièrement, on veut analyser certains avantages que la technologie MIMO pourrait apporter aux radios. On ne cherche pas à déterminer le gain en capacité de donnée, mais plutôt en distance de communication. On parle ici d'accroissement de la portée du lien radio.

Les résultats obtenus montrent non seulement que la technologie MIMO permet d'accroître la portée des transmissions, mais que plus les exigences ou les conditions sur le système sont élevées, plus l'avantage d'un système MIMO est prononcé.

Mots-clés: MIMO, diversité spatiale, WINNER II, portée d'un lien radio, capacité

Wireless Range Extension given by MIMO

Guillaume COUILLARD

ABSTRACT

With the ever-growing popularity of wireless communications, we are seeing an important increase in demand for higher system capabilities and performances. When taking the world of cellular communications as an example, the main focus among other things is to increase the amount of data that can be sent in a given lapse of time. A part of the solution to that problem is to increase the amount of transmitting and receiving antenna, namely the Multiple-Input, Multiple-Output (MIMO) technology.

Within the framework of an industrial partnership with Ultra Electronics TCS, this research is interested about a particular scenario where a fixed transmission tower seeks to keep a wireless communication with a remote unit. In more details, we want to analyze some aspects and benefits that MIMO technology could bring to the radios. Here, the goal is not about the gain in data capacity, but rather in the link's communication distance. In other words, we refer to this as the range extension given to the system.

The obtained results not only show that MIMO technology increases the range of transmission, but that the higher the requirements on the system, or the worst the propagation conditions, the greater the benefit of MIMO.

Keywords: MIMO, spatial diversity, WINNER II, range of radio link, capacity

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 CONTEXTE, REVUE DE LITTÉRATURE ET OUTILS UTILISÉS	3
1.1 Contexte militaire	3
1.2 Système d'antenne multiple	4
1.3 La performance	9
1.4 Le canal de propagation	11
1.5 Description de WINNER II	12
1.6 Avantage de WINNER II	16
CHAPITRE 2 DESCRIPTION DU SCÉNARIO	19
2.1 Description du lien et positionnement d'antenne	19
2.2 Scénario employé	21
2.3 Ligne de vue	21
2.4 Autres paramètres du modèle	21
2.5 Méthodologie pour générer les données	22
2.6 Le bruit	25
CHAPITRE 3 RÉSULTAT ET ANALYSE DES SIMULATIONS	27
3.1 Précisions	27
3.2 Puissance perçue	27
3.2.1 Puissance sans ligne de vue	27
3.2.2 Puissance avec ligne de vue	29
3.3 Interruption du signal	30
3.3.1 Interruption du signal sans ligne de vue	30
3.3.2 Interruption du signal avec ligne de vue	33
3.4 Capacité	35
3.4.1 La capacité sans ligne de vue	35
3.4.2 La capacité avec ligne de vue	38
3.4.3 La capacité avec puissance normalisée pour MIMO	41
3.4.4 La capacité avec effet de masquage	43
3.5 La position des antennes MIMO	46
3.5.1 L'espacement entre les antennes	46
3.5.2 L'effet de fréquence	48
3.6 Discussion générale des résultats	49
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	51
BIBLIOGRAPHIE	53

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Illustration d'un exemple de communication entre une tour et un véhicule	3
Figure 1.2	Puissance dans l'espace à la réception lorsqu'il y a une antenne à la transmission	6
Figure 1.3	Puissance dans l'espace à la réception lorsqu'il y a deux antennes à la transmission	7
Figure 1.4	Illustration d'une modélisation de canal géométrique stochastique	13
Figure 1.5	Exemple de trajets effectués par les différents rayons de propagation du transmetteur au récepteur	14
Figure 1.6	Exemple d'angle de départ de trajets effectués par les différents rayons de propagation	15
Figure 1.7	Exemple d'angles d'arrivées de trajets effectués par les différents rayons de propagation	15
Figure 1.8	Exemple de délais d'arrivées de trajets effectués par les différents rayons de propagation	16
Figure 2.1	Différentes dispositions des antennes vue de haut	20
Figure 2.2	Représentation de la structure de donnée de simulation formée de 18 cellules	22
Figure 3.1	Puissance moyenne en fonction de la distance avec espacement de 2 mètres, sans ligne de vue et une fréquence centrale de 2,5 GHz	28
Figure 3.2	Puissance moyenne en fonction de la distance avec espacement de 2 mètres, avec ligne de vue et une fréquence centrale de 2,5 GHz	29
Figure 3.3	Interruption du signal en fonction de la distance avec espacement de 2 mètres, sans ligne de vue et une fréquence centrale de 2,5 GHz avec un seuil de 30 dB au-dessus du bruit	31
Figure 3.4	Interruption du signal en fonction de la distance avec espacement de 2 mètres, sans ligne de vue et une fréquence centrale de 2,5 GHz avec un seuil de 25 dB au-dessus du bruit	32

Figure 3.5	Interruption du signal en fonction de la distance avec espacement de 2 mètres, sans ligne de vue et une fréquence centrale de 2,5 GHz avec un seuil de 20 dB au-dessus du bruit	33
Figure 3.6	Interruption du signal en fonction de la distance avec espacement de 2 mètres, avec ligne de vue et une fréquence centrale de 2,5 GHz avec un seuil de 30 dB au-dessus du bruit	34
Figure 3.7	Capacité moyenne en fonction de la distance avec espacement de 2 mètres, sans ligne de vue et une fréquence centrale de 2,5 GHz	36
Figure 3.8	Capacité du 50 ^e centile en fonction de la distance avec espacement de 2 mètres, sans ligne de vue et une fréquence centrale de 2,5 GHz	37
Figure 3.9	Capacité du 2 ^e centile en fonction de la distance avec espacement de 2 mètres, sans ligne de vue et une fréquence centrale de 2,5 GHz	38
Figure 3.10	Capacité moyenne en fonction de la distance avec espacement de 2 mètres, avec ligne de vue et une fréquence centrale de 2,5 GHz	39
Figure 3.11	Capacité du 50 ^e centile en fonction de la distance avec espacement de 2 mètres, avec ligne de vue et une fréquence centrale de 2,5 GHz	40
Figure 3.12	Capacité du 2 ^e centile en fonction de la distance avec espacement de 2 mètres, avec ligne de vue et une fréquence centrale de 2,5 GHz	41
Figure 3.13	Capacité du 2 ^e centile en fonction de la distance avec espacement de 2 mètres, sans ligne de vue, une fréquence centrale de 2,5 GHz et une puissance MIMO normalisée	42
Figure 3.14	Capacité du 2 ^e centile en fonction de la distance avec espacement de 2 mètres, avec ligne de vue, une fréquence centrale de 2,5 GHz et une puissance MIMO normalisée	43
Figure 3.15	Capacité du 2 ^e centile en fonction de la distance avec espacement de 2 mètres, sans ligne de vue, une fréquence centrale de 2,5 GHz et effet de masquage	44
Figure 3.16	Capacité du 2 ^e centile en fonction de la distance avec espacement de 2 mètres, avec ligne de vue, une fréquence centrale de 2,5 GHz et effet de masquage	45
Figure 3.17	Capacité du 2 ^e centile en fonction de la distance avec espacement de 1,2 et 3 mètres, sans ligne de vue, une fréquence centrale de 2,5 GHz et effet de masquage	47

Figure 3.18 Capacité du 2^e centile en fonction de la distance avec espacement de 1,2 et 3 mètres, sans ligne de vue avec effet de masquage pour les fréquences centrales de 1,4 GHz, 2,5 GHz et 4,5 GHz..... 48

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

SISO	Single-Input Single-Output
SIMO	Single-Input Multiple-Output
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
DC	Diversity Combining
SC	Selection Combining
MRC	Maximal Ratio Combining
PL	Path Loss
LOS	Line-of-sight
NLOS	Non-Line-of-sight
WINNER II	Wireless World Initiative New Radio
FP6	Framework Program 6
GBSM	Geometry-Based-Stochastic-Channel-Models
SNR	Signal to noise ratio

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

C	Capacité
dB	Décibel
dBm	Décibel milliwatt
dBW	Décibel Watt
dBi	Décibel Isotrope
B	Largeur de bande
Mbps	Méga bit par seconde
T	Température
λ	Longueur d'onde

INTRODUCTION

De nombreuses circonstances peuvent exiger d'une communication sans fil d'avoir la plus grande portée possible tout en gardant une certaine qualité de communication. Évidemment, il existe plus d'une méthode pour accroître la portée d'un lien. On peut par exemple avoir recours à des relais, augmenter le gain des antennes ou même accroître la puissance de transmission. Ce mémoire a comme but d'évaluer les capacités d'une autre technique, soit l'utilisation de la technologie MIMO, qui peut d'ailleurs être combinée avec celles mentionnées précédemment.

Cette technologie a pour but d'obtenir une meilleure diversité du signal à travers le canal de propagation. De manière générale, un système MIMO permet de mieux exploiter l'environnement spatial en émettant à partir de plusieurs antennes. On augmente ainsi la quantité de rayonnement voyageant dans le canal de propagation. Cette transmission se traduit en une hausse de la probabilité que le signal émis atteigne le récepteur. Également, les signaux captés par les différentes antennes à la réception peuvent être cumulés, augmentant par le fait même la puissance perçue au récepteur. En théorie, il y a donc moins de chance de perdre le signal à une même distance en passant d'un système SISO à un système MIMO. On peut alors se demander quelle est l'ampleur de ce gain en distance et quels paramètres de l'environnement ou du système peuvent l'affecter.

Il existe de nombreux facteurs qui peuvent influencer la performance d'un système MIMO. Le canal de propagation lui-même change selon le type d'environnement. Pour proprement évaluer les capacités d'un système MIMO, il faut donc considérer un type de terrain réaliste en prenant en compte les fréquences utilisées, le positionnement des antennes ainsi que l'espacement entre ces dernières. Aussi, il est important de définir s'il y a, ou pas, une ligne de vue entre le transmetteur et le récepteur du lien radio. Il faut alors analyser les comportements et avantages d'un lien sans fil MIMO sous ces différents facteurs et comparer les performances avec un système SISO. Il est important de noter que plusieurs autres facteurs sont en jeu au niveau de

la qualité d'un lien, bien que le but de ce mémoire ne soit pas de couvrir tous ces facteurs. Par exemple, la technique utilisée par le système de communication pour maximiser la puissance perçue au récepteur peut jouer sur la portée du lien. Pour mieux évaluer le phénomène, deux versions d'un système SIMO seront aussi évaluées. On parle ici d'un système ne possédant qu'une seule antenne à la transmission et plus d'une antenne à la réception. Ces différents systèmes seront expliqués plus tard.

Pour répondre à ces différentes questions, ce mémoire est organisé comme suit.

Le chapitre 1 se divise en trois parties principales. La première cherche à amener le contexte de cette recherche. La seconde partie est une revue de littérature qui présente et explique les différents concepts de la transmission sans fil qui seront nécessaires à la compréhension de ce document. La dernière partie décrit et justifie l'utilisation de l'outil de simulation WINNER II qui sera utilisé pour générer les résultats à travers MATLAB.

Le chapitre 2 a comme objectif de décrire le scénario et les paramètres utilisés pour les simulations. Aussi, on y présente la méthodologie employée pour générer des données valables et calculer les résultats recherchés.

Le chapitre 3 a pour but de présenter les résultats de simulation des différents tests effectués. Chacun de ces tests sera suivi d'une analyse des données recueillies. Finalement, la dernière section de ce chapitre présentera une discussion générale de l'ensemble des résultats et de leurs significations pour les objectifs de la recherche.

CHAPITRE 1

CONTEXTE, REVUE DE LITTÉRATURE ET OUTILS UTILISÉS

1.1 Contexte militaire

Ce mémoire a été effectué à l'aide de la chaire de recherche du CRSNG avec Ultra Electronics TCS. Ultra Electronics TCS est une compagnie qui fabrique des équipements de communication sans fil à haute capacité pour des opérations militaires. Dans le but d'améliorer les performances de transmission d'une de leurs radios, on désire évaluer si l'utilisation de la technologie MIMO permettrait d'augmenter la portée de transmission des radios. Le système radio en question est utilisé pour garder une communication entre une tour fixe et un véhicule comme on peut le voir à la figure 1.1.

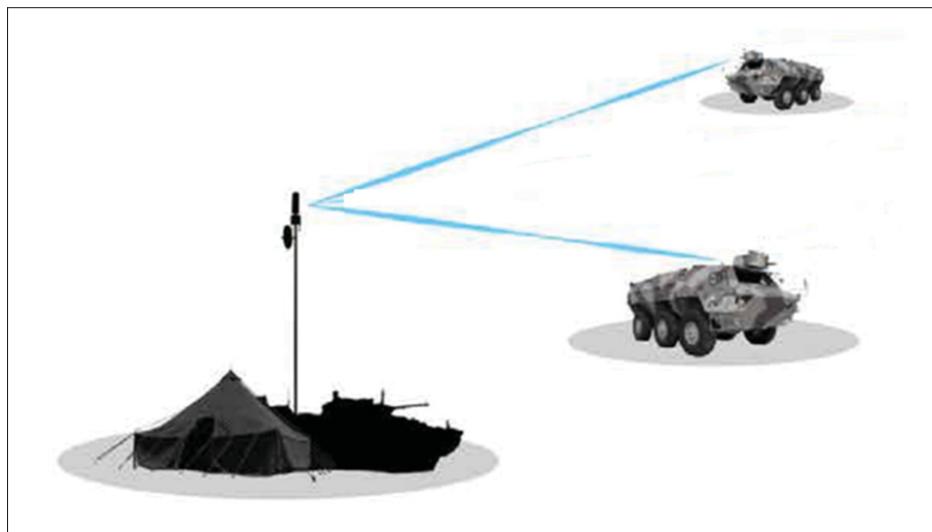


Figure 1.1 Illustration d'un exemple de communication entre une tour et un véhicule

Dans le domaine militaire, les communications sont très importantes. Elles apportent un support aux membres sur le terrain et permettent de transmettre des informations importantes en tout temps. L'utilisation de systèmes sans fil comporte toutefois certain ennuis pour les militaires. En premier lieu, on veut éviter d'utiliser l'infrastructure locale du théâtre opérationnel

pour s'assurer de la fiabilité du système et prévenir des failles potentielles dans le réseau. L'équipement employé doit donc être suffisamment performant pour assurer une bonne flexibilité des opérations. On veut entre autre s'assurer de ne pas être restreint par la portée des radios. Un relais semblerait une bonne option, mais aurait besoin d'entretien, de logistique et de protection, ce qui cause des complications. On pourrait aussi augmenter la puissance à la transmission, mais les antennes utilisées ont une limite de puissance à laquelle elles peuvent transmettre. De plus, augmenter la puissance à la transmission n'est pas très satisfaisant considérant qu'il faut quadrupler la puissance de transmission pour doubler la portée en raison de la perte en espace libre.

Ultra Electronics TCS a donc envisagé d'explorer la possibilité d'utiliser un système MIMO pour augmenter la portée de transmission du système. On cherche donc à quantifier le gain en portée d'un système MIMO par rapport à un système SISO considérant différents paramètres.

1.2 Système d'antenne multiple

Au fil du temps, de nombreuses technologies ont été développées dans le but de transmettre des quantités d'information de plus en plus larges à travers un lien de transmission sans fil. On peut par exemple penser à l'utilisation de la composante temporelle du canal où on sépare le temps en différents moments de transmission. La dimension fréquentielle a elle aussi été exploitée, permettant l'utilisation de plusieurs fréquences du spectre électromagnétique pour transmettre et recevoir une plus grande quantité d'information. En bref, ces techniques divisent le spectre utilisé en de multiples bandes de fréquence permettant par le fait même de mieux servir un plus grand nombre de clients en maximisant l'exploitation du canal. Lorsqu'on ajoute des antennes à la transmission ainsi qu'à la réception c'est en fait la composante spatiale du canal qu'on cherche à exploiter.

L'ajout d'une ou plusieurs antennes au transmetteur est en fait une façon de donner une chance plus élevée de détecter le signal à la réception. Comme le signal subit plusieurs transformations telles que des réflexions, délais, atténuations ou des diffractions dans son parcours du transmet-

teur au récepteur, on observe dans la région du récepteur un patron d'interférence composée à la fois d'interférence constructive et destructive. En augmentant la quantité d'antennes à la transmission, on cherche en fait à diminuer la taille des points dans l'espace où le signal reçu est minimal. En d'autres mots, on parle de la taille des zones où l'interférence destructive cause la puissance du signal à être difficilement détectable.

Pour mieux illustrer ce phénomène, prenons deux différents cas de liaison radio. Dans le premier, une seule antenne est utilisée à la transmission alors que dans le second, on utilise deux antennes à la transmission. Dans chacun de ces deux cas, nous voulons observer comment le signal est réparti dans l'espace dans le but de comparer les deux résultats. Prenons une vue aérienne de l'emplacement où l'on aimerait capter le signal. Il est à noter qu'on ne fait qu'observer un cas hypothétique dans le but de mieux comprendre comment la puissance du signal est répartie dans l'environnement où on voudrait placer un récepteur. Le premier et le deuxième cas sont représentés respectivement aux figures 1.2 et 1.3. Les puissances ici sont arbitraires et peu importantes. L'important est la différence de répartition de la puissance entre les deux figures. On peut considérer que la figure 1.3 représente l'addition de deux figures semblables à la figure 1.2 en considérant les interférences constructives et destructives.

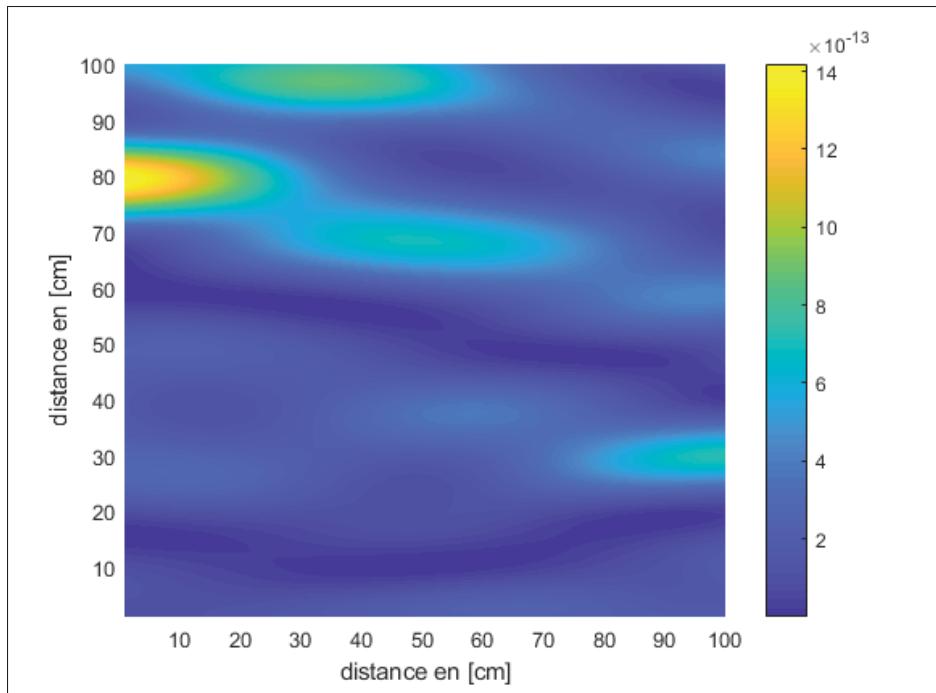


Figure 1.2 Puissance dans l'espace à la réception lorsqu'il y a une antenne à la transmission

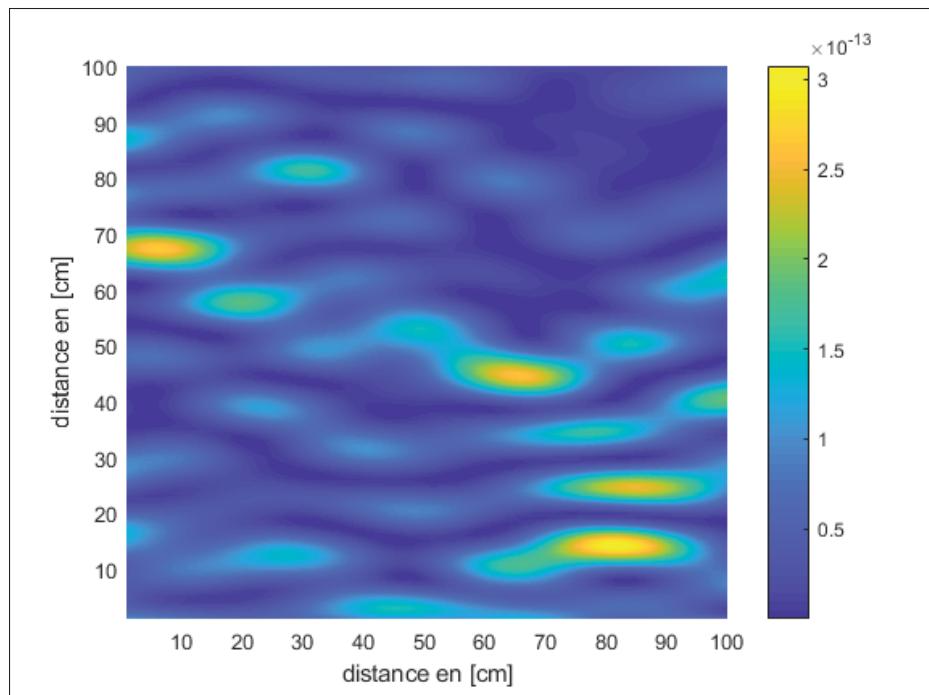


Figure 1.3 Puissance dans l'espace à la réception lorsqu'il y a deux antennes à la transmission

Ici, la force du signal est représentée par une gradation de couleur indiquée par la légende. Bien sûr, il ne s'agit ici que d'une coupe en deux dimensions d'un phénomène tridimensionnel. Il faut aussi noter que ces images changent dans le temps en raison des évanouissements à petite et grande échelle qui seront discutés et expliqués plus tard. On veut observer ici l'effet que les antennes à la transmission ont à la réception. Maintenant, on peut aussi comprendre que la géométrie et les dimensions des antennes à la réception agissent en quelque sorte comme des filets qui désirent capter le signal. Si les zones sans signal sont trop vastes, l'antenne n'arrive pas à percevoir le signal durant une certaine période de temps.

À la réception, la présence d'une quantité plus élevée d'antennes permet de mieux exploiter la diversité du signal. Le positionnement des antennes est important, car il permet à chacune d'entre elles de capter le signal transmis au travers du canal de propagation. Il n'est pas toujours possible de capter le signal. L'ajout d'antenne a comme objectif de diminuer la probabilité de cette malchance, car pour ce faire, il faudrait que toutes les antennes de réception perdent le signal en même temps.

Nous pouvons aussi considérer qu'il existe plusieurs façons de gérer les puissances recueillies par les différentes antennes à la réception, ce qu'on appelle les technologies de combinaison de diversité (DC). Deux versions seront utilisées dans ce mémoire soit la combinaison par sélection (SC) et la combinaison par ratio maximal (MRC). Avec le SC, on sélectionne la puissance détectée la plus élevée des différentes antennes. Pour le MRC, on combine les puissances perçues aux différentes antennes de manière cohérente. Cette recherche examine un cas de SIMO SC, un cas de SIMO MRC ainsi qu'un cas de MIMO MRC. Évidemment, un système SISO sera aussi utilisé pour évaluer et comparer les performances des différents systèmes.

Considérons la représentation des différents parcours à travers le canal de propagation. On décrit un système ayant $N_{TX} \times M_{RX}$ antennes où N_{TX} représente le nombre d'antennes à la transmission et M_{RX} le nombre d'antennes à la réception. On peut former une matrice nommée H représentant ce que chaque antenne de réception perçoit de chaque antenne de transmission. Chaque terme d'une matrice H est simplement un nombre complexe représentant, à la récep-

tion, une transformation en amplitude et en phase de l'énergie du signal du transmetteur ayant passé au travers du canal de propagation.

1.3 La performance

En raison de la grande utilisation de la technologie MIMO dans le réseau cellulaire et Wi-Fi, on observe généralement une évaluation de la performance du système basée sur la quantité de données pouvant être transmise dans un certain laps de temps et dans une certaine largeur de bande. On parle souvent de capacité du système qui peut être calculée grâce à la formule de Shannon montrée à l'équation 1.1.

$$C = B \times \log_2(1 + SNR |h|^2) \quad (1.1)$$

Ici, h représente le gain complexe normalisé du canal de propagation sans fil. B représente la bande passante utilisée et SNR représente le ratio de puissance entre le signal et le bruit à une antenne de réception. Le signal perçu et le bruit seront plus longuement discutés dans la section 1.4. En fait, cette formule indique la quantité maximale de données pouvant théoriquement être transmises considérant ces paramètres. Cette formule sera utilisée différemment pour des systèmes à multiples antennes qui seront expliqués au chapitre 2. La puissance perçue au récepteur sera discutée en plus de détail pour les systèmes SIMO et MIMO. Pour le système SIMO, on peut simplement combiner de manière cohérente les puissances perçues aux différentes antennes à la réception tel que montré à l'équation 1.2 (Friedlander, 2005; Molisch, 2012; Gesbert & Akhtar, 2002; Gesbert *et al.*, 2003). Cette formule décrit la capacité qu'on peut atteindre en utilisant pleinement les antennes à la réception (SIMO MRC).

$$C = B \times \log_2 \left(1 + SNR \sum_{i=1}^M |h_i|^2 \right) \quad (1.2)$$

La capacité d'un système MIMO avec puissance égale pour N sources sans corrélation peut être observé à l'équation 1.3. Le canal de propagation est connu. (Friedlander, 2005; Molisch, 2012; Gesbert & Akhtar, 2002; Gesbert *et al.*, 2003).

$$C = B \times \log_2 \left[\det \left(I + \frac{SNR}{N} HH^* \right) \right] \quad (1.3)$$

Ici, H^* représente la matrice transposée conjuguée complexe de la matrice H . La puissance perçue au récepteur sera discutée dans les calculs du chapitre 2.

On comprend que le canal de transmission change dans le temps modifiant alors la capacité au récepteur à chaque instant. Pour choisir une modulation appropriée et soutenable dans le temps, on veut déterminer une probabilité acceptable d'interruption de la capacité dans le temps relié à cette modulation. On identifie une interruption de la capacité lorsque la capacité perçue au récepteur tombe sous un certain seuil. Cela est en fait causé par un SNR trop faible à un certain moment. Les différents instants peuvent être représentés par différentes matrices H qui vont changer en raison des évanouissements et de l'environnement. Avec suffisamment d'instants, on peut calculer la probabilité d'interruption en utilisant l'équation 1.4 (Friedlander, 2005).

$$P_{out} = 100 \times \frac{\sum_{m=1}^{N_{sim}} N_{out}(m)}{N_{sim}} \quad (1.4)$$

Ici, P_{out} représente la probabilité d'interruption en pourcentage, N_{sim} représente la quantité totale de simulation effectuée, et $N_{out}(m)$ est une variable booléenne définie par l'équation 1.5.

$$N_{out}(m) = \begin{cases} 1, & \text{si } C_m < C_{out} \\ 0, & \text{autrement} \end{cases} \quad (1.5)$$

Ici, C_m représente la capacité de la simulation m alors que C_{out} représente le seuil défini par le système.

Aussi, il est important de mentionner que dans ce mémoire, on définit l'accroissement en portée du système MIMO comme étant la distance maximale à laquelle un système MIMO peut communiquer par rapport à un système SISO dans les mêmes conditions et performances. Ces performances seront évaluées sous forme de probabilité d'interruption du signal et de capacité des communications.

1.4 Le canal de propagation

Pour évaluer le SNR à la réception, il faut d'abord considérer le signal reçu et calculé avec la formule du bilan de liaison à l'équation 1.6 (Molisch, 2012).

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{FS} - L_C \quad (1.6)$$

Ici, P_{RX} est la puissance reçue en dBm, P_{TX} est la puissance transmise en dBm, G_{TX} est le gain de l'antenne de transmission en dBi, G_{RX} est le gain de l'antenne de réception en dBi, L_{FS} est la perte de propagation en espace libre reliée à la distance (path loss) définie à l'équation 1.7 en dB. Finalement, L_C représentant les autres pertes dues au canal en dB sera discuté dans le prochain paragraphe.

$$L_{FS}(dB) = 20 \times \log_{10} \left(\frac{4 \times \pi \times D}{\lambda} \right) \quad (1.7)$$

Ici, λ représente la longueur d'onde en mètres et D la distance de transmission en mètres.

Le L_C représente des pertes liées à différents aspects de la transmission. On peut d'abord considérer les nombreuses pertes dues à la figure de bruit, la polarisation, le filage et la connexion jusqu'aux pertes reliées à la géométrie des antennes elles-mêmes. On considère aussi les différentes pertes reliées au canal de propagation. Ici, la géométrie des obstacles peut déterminer s'il y aura une ligne de vue (LOS) ou pas (NLOS) dans la transmission. Les réflexions et diffractions sur des groupements (clusters) d'objets ou édifices ont également des effets importants

en termes d'absorption d'énergie et de distance parcourue par le rayonnement, ce qui affecte les délais de certains trajets du signal. La vitesse des objets peut aussi induire un effet doppler sur la fréquence de transmission. Les effets résultants sont perçus comme des variations de la puissance du signal reçu qu'on nomme évanouissement à grande échelle (large scale fading) et à petite échelle (small scale fading) (Molisch, 2012). Les évanouissements à grande échelle comportent les pertes d'affaiblissement de propagation (path loss) ainsi que l'effet de masquage (shadowing). L'évanouissement à petite échelle comporte les effets de dispersions temporelles et fréquentielles. La matrice H résultante est affectée par tous ces facteurs.

1.5 Description de WINNER II

Avec la quantité de paramètres définis dans la précédente section, on comprend qu'il est difficile de représenter fidèlement la réalité sous la forme de simples calculs ou simulations. Pourtant, il faut pouvoir générer beaucoup de données réalistes pour prévoir avec plus de certitude le comportement que des systèmes SISO et MIMO pourraient avoir sur des antennes réelles. Pour remédier à ce problème, l'outil de simulation utilisé dans ce mémoire, WINNER II, offre plusieurs solutions.

WINNER II (Wireless World Initiative New Radio) est un projet de recherche international sous FP6 (framework program 6) de la commission européenne ayant comme but de développer l'interface radio de systèmes au-delà du 3G. (Mohr, 2007; Bultitude & Rautiainen, 2007). Winner II est en fait un modèle de canal MIMO à large bande qui considère les fréquences jusqu'à 6 GHz et permet d'ajuster beaucoup de paramètres de l'environnement. Le programme permet aussi de choisir parmi de multiples scénarios de propagation. Ces derniers simulent des cas de propagation à l'intérieur de plusieurs types et taille de bâtiment, des canaux de propagation extérieure allant de zones urbaines à rurales ainsi qu'un mélange de tous ces milieux comme une transmission de l'extérieur à l'intérieur. Ces différents scénarios ont d'ailleurs été testés et analysés par de nombreuses équipes ayant différents équipements (Narandžić *et al.*, 2013; Darbari *et al.*, 2010).

WINNER II est un système qui utilise une modélisation de canal basée sur la géométrie stochastique (Geometry-Based-Stochastic-Channel-Models, GBSM) (Molisch, 2012). Cette technique a de nombreux avantages dont celui de donner des résultats se rapprochant adéquatement de la réalité (Zeng *et al.*, 2017; Narandžić *et al.*, 2007). Les nombreux scénarios utilisés ont l'avantage d'avoir été développés à la fois par la littérature et de nombreuses campagnes de prise de mesures effectuées dans différentes locations par sept partenaires en utilisant des équipements différents (Bultitude & Rautiainen, 2007; Mohr, 2007).

L'idée derrière le concept est que WINNER II peut générer des groupements d'objets (clusters) dans le programme et utiliser les paramètres voulus pour simuler ce à quoi une transmission sans fil ressemblerait dans l'environnement typique décrit par le scénario choisi. Plusieurs trajectoires de rayonnements principaux (paths), comportant chacune plusieurs rayons (sub-paths), seront alors émises du transmetteur avec un angle de propagation particulier pour ensuite effectuer une réflexion sur un objet et se diriger vers le récepteur comme on peut voir à la figure 1.4 (Narandžić *et al.*, 2008; Bultitude & Rautiainen, 2007; Mohr, 2007; Darbari *et al.*, 2010).

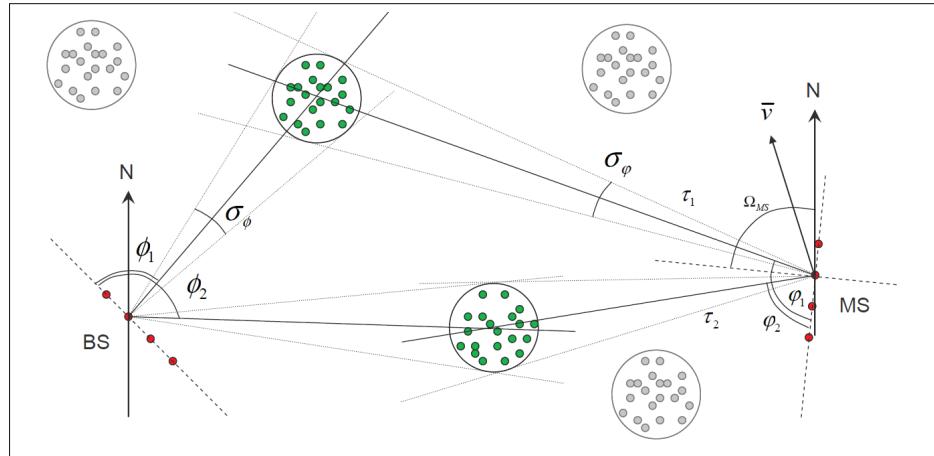


Figure 1.4 Illustration d'une modélisation de canal géométrique stochastique

Il est important de comprendre que la disposition de ces objets est changeante et choisie de manière aléatoire, mais tout en donnant un résultat qui serait typique du type d'environnement

défini par le scénario. On peut par exemple voir dans la figure 1.5 un exemple du trajet effectué par une propagation dans un environnement rural sans ligne de vue. L'image est en fait une vue aérienne du lien radio où le transmetteur est à la position (0,0) et le récepteur à (2000,0). Ici, les distances sont en mètres et les différentes couleurs représentent des trajectoires distinctes qui comportent chacune plusieurs rayons.

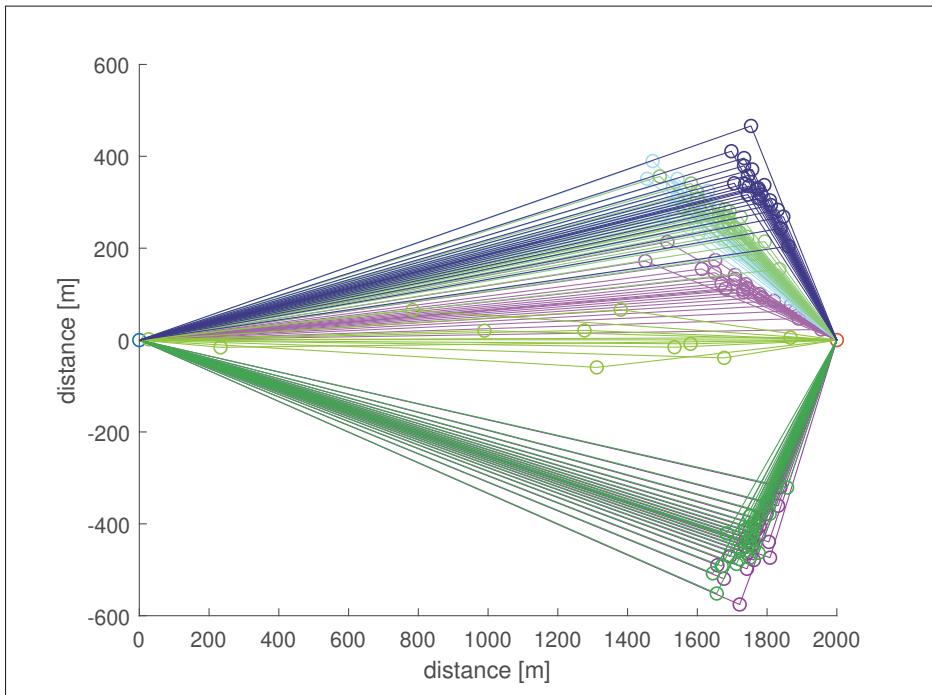


Figure 1.5 Exemple de trajets effectués par les différents rayons de propagation du transmetteur au récepteur

Le programme offre aussi la capacité d'obtenir la puissance contenue dans chacun des différents trajets utilisés qu'on peut voir dans les figures 1.6 et 1.7. Ces figures représentant respectivement les angles de transmission et de réception des signaux.

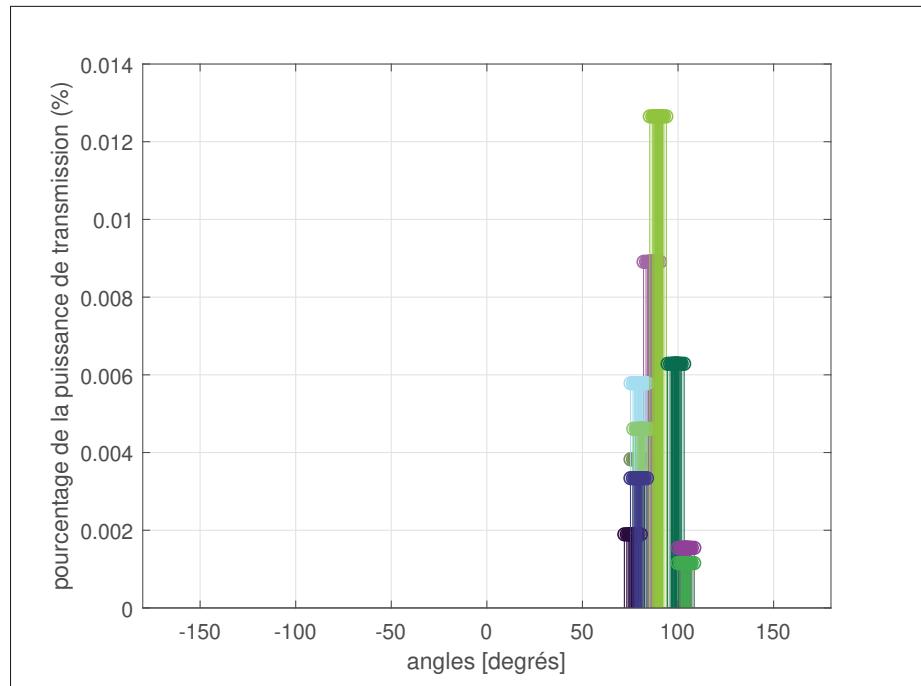


Figure 1.6 Exemple d'angle de départ de trajets effectués par les différents rayons de propagation

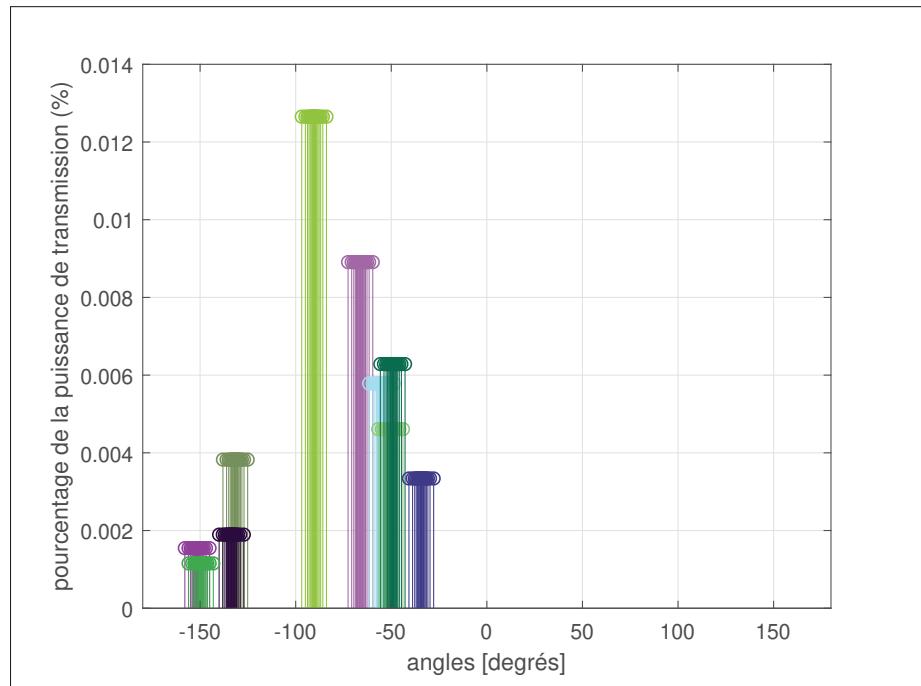


Figure 1.7 Exemple d'angles d'arrivées de trajets effectués par les différents rayons de propagation

Finalement, on a aussi accès aux délais de ces différents trajets de rayonnement entrepris dans la transmission comme on peut voir dans la figure 1.8. Il est toutefois important de noter ici que les délais donnés par le système sont produits de manière stochastique et non pas calculés à partir de la géométrie de l'environnement. On pourra donc voir des différences entre la distance parcourue par le rayonnement et le délai observé au récepteur. On peut alors considérer les délais associés aux groupements d'objets.

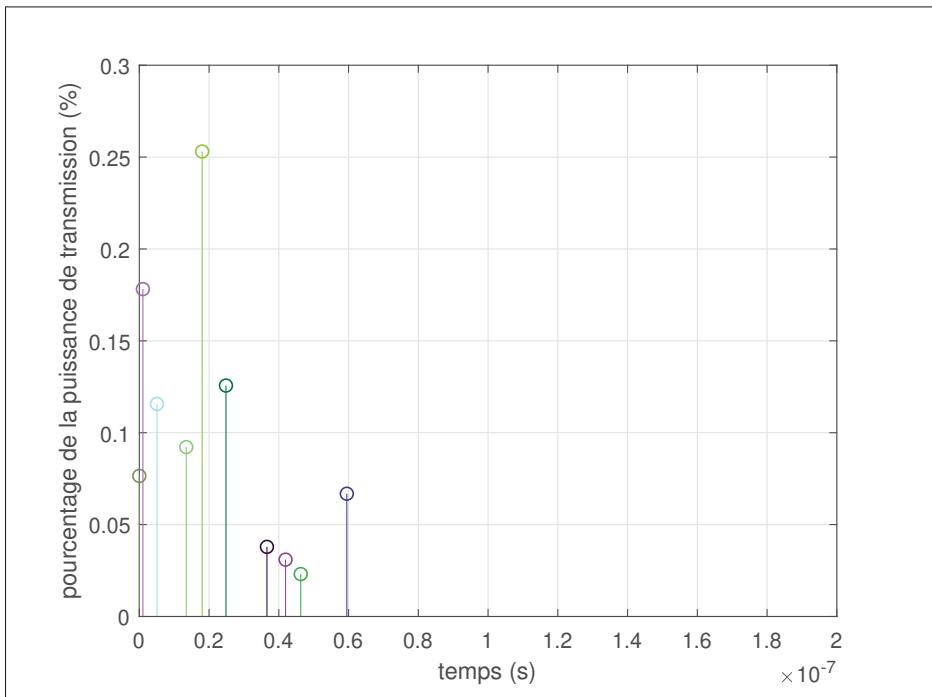


Figure 1.8 Exemple de délais d'arrivées de trajets effectués par les différents rayons de propagation

Grâce à ces différents paramètres ainsi qu'à de nombreux autres tout autant nécessaires à la description du canal de propagation, on peut calculer une matrice H qui offre un résultat de simulation se rapprochant de la réalité.

1.6 Avantage de WINNER II

De par cette méthode, WINNER II est en mesure d'utiliser une modélisation beaucoup plus fidèle à la réalité que d'autres études sur le sujet qui par exemple utilise simplement le modèle

d'Okumura-Hata pour définir les pertes associées à la distance et à l'environnement (Friedlander, 2005). WINNER II offre aussi l'option d'utiliser beaucoup de paramètres pour bien définir le modèle de propagation. Finalement, on est en mesure de générer des matrices H qui correspondent beaucoup mieux à la réalité que l'on tente de modéliser.

CHAPITRE 2

DESCRIPTION DU SCÉNARIO

2.1 Description du lien et positionnement d'antenne

Le but de ce mémoire est d'évaluer l'accroissement en distance de la portée de la transmission par l'utilisation du MIMO, mais il est important que ces évaluations soient basées sur un scénario réaliste. On ne cherche pas à obtenir un résultat pour un environnement fictif, mais plutôt un environnement qui permettrait d'avoir des résultats pouvant servir à une application réelle.

On veut évaluer les performances en fonction de nombreux paramètres. Les différentes simulations effectuées seront par exemple testées avec différentes fréquences pour voir si la performance d'un système MIMO par rapport à un système SISO est affectée par la fréquence centrale de transmission du signal. La disposition et l'espacement entre les antennes au transmetteur comme au récepteur sont un autre aspect qui pourrait affecter la performance d'un système MIMO. C'est sur cette dernière question que se concentre la présente section.

Cette recherche s'intéresse à des cas de systèmes MIMO 2×2 qui auraient deux antennes à la transmission et deux antennes à la réception. Les systèmes SIMO étudiés possèdent eux aussi deux antennes au récepteur, mais une seule antenne à la transmission. WINNER II permet de décrire la position et la quantité d'antennes dans chacun des cas. Les antennes du modèle sont de simples antennes isotropes, pour lesquelles on peut ajouter un gain particulier. Dans le cas du scénario d'intérêt de cette recherche, les antennes à la transmission ont un gain de 30 dBi, mais ceux à la réception sont de 0 dBi.

Pour mieux comprendre les tests effectués concernant les positions d'antenne, on peut se référer à la figure 2.1. Comme on veut évaluer la transmission d'un système 2×2 MIMO, on veut premièrement considérer différentes dispositions possibles à la transmission. En prenant pour référence la figure 2.1, on teste les paires d'antennes 1-5, 2-6, 3-7 et 4-8. Chacune de ces quatre différentes dispositions à la transmission sera testée avec quatre dispositions de paire

d'antennes à la réception. Par exemple, un certain nombre de simulations seront effectuées pour la position 1-5 à la transmission et 1-5 à la réception. Ici, l'utilisation de la notation 15-15 sera employée. Toutefois, comme le récepteur joue le rôle d'une unité mobile et tactique, sa disposition à la réception est changeante. Les simulations 15-15, 15-26, 15-37 et 15-48 seront cumulées sous la disposition 15 à la transmission. Il en va de même pour les dispositions 26, 37 et 48 à la transmission pour le résultat final. Ensemble, ces quatre différentes dispositions à la transmission représentent l'ensemble des tests sur la disposition des antennes.

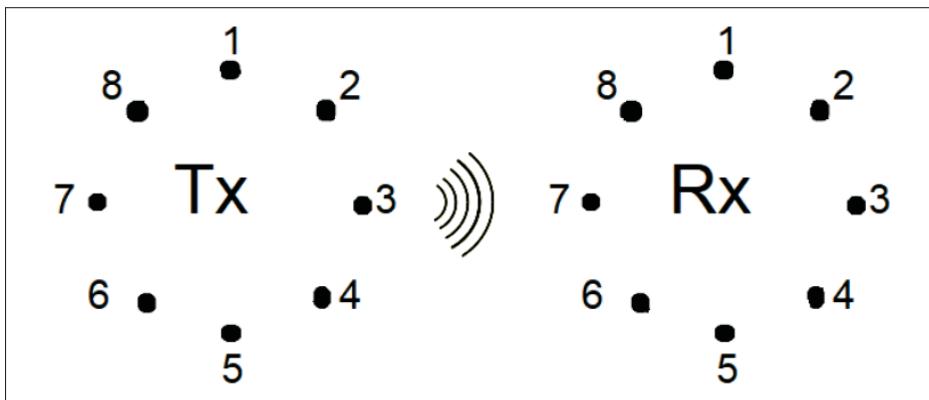


Figure 2.1 Différentes dispositions des antennes vue de haut

Par la suite, on veut évaluer si la distance entre les antennes a un effet notable sur la transmission. Trois différentes distances seront testées, soit un, deux et trois mètres. On parle ici de la distance entre deux antennes à la transmission et à la réception. Par exemple, la distance entre les antennes 1 et 5 sur la figure 2.1 serait de 1 mètre.

Le but de ces différents tests sur la position des antennes est de savoir si ce genre de modification a un impact notable sur la diversité et donc la performance entre différents types de système MIMO. Ici on ne compare pas à un système SISO, mais on veut voir si la performance de SIMO et MIMO peut être améliorée par le positionnement des antennes.

2.2 Scénario employé

WINNER II offre la possibilité d'utiliser de nombreux scénario, mais le scénario d'intérêt dans cette recherche est un scénario de propagation rurale D1 (D1 - rural macro-cell). Le scénario présente un environnement testé jusqu'à 10 kilomètres et possédant une faible densité de bâtiment (Bultitude & Rautiainen, 2007). Ce scénario permet aussi de fixer la hauteur des antennes qui seront de 15 mètres à la transmission et de 3 mètres à la réception représentant respectivement une tour et un véhicule muni d'antennes. Aussi, le scénario permet de reproduire des résultats lorsque le récepteur se déplace avec une vitesse allant jusqu'à 200 km/h. Les simulations effectuées pour ce mémoire se concentrent plutôt sur un cas ayant une vitesse très basse, soit de 1 m/s perpendiculairement à la direction de transmission. Cette vitesse a été choisie pour la simple raison que le modèle n'accepte pas de vitesse nulle. En bref, le scénario D1 répond aux besoins recherchés dans ce mémoire.

2.3 Ligne de vue

WINNER II permet d'indiquer dans les paramètres du système s'il y a ligne de vue ou non. La puissance perçue au récepteur par une connexion avec ligne de vue sera théoriquement plus élevée en moyenne qu'une connexion sans ligne de vue, car certains rayons parcourront la distance plus directement et en perdant moins d'énergie en traversant le canal de propagation. Les simulations effectuées dans ce mémoire ont été faites à la fois par une transmission avec ligne de vue et par une transmission sans ligne de vue. Il est important d'étudier l'effet de la ligne de vue sur la performance du système MIMO par rapport au système SISO.

2.4 Autres paramètres du modèle

Beaucoup d'autres paramètres doivent aussi être considérés pour le modèle. Premièrement, il est important de comprendre que les antennes du modèle peuvent considérer l'effet de la polarisation. Toutes les simulations effectuées dans cette recherche utilisent cet effet de polarisation. Le modèle ne permet pas de calculer le parcours de rayon en élévation. Considérant

que les tests ont été effectués sur de grandes distances, cet effet ne devrait pas avoir un très grand impact sur le résultat final. Aussi, des tests ont été faits avec et sans l'effet de masquage. L'utilisation de cet effet permet d'avoir un portrait plus fiable de la réalité, mais rend la lecture des résultats plus difficile. On utilisera donc principalement le masquage après avoir analysé différents aspects de la communication sans masquage.

2.5 Méthodologie pour générer les données

La première étape était de générer une structure de données MATLAB contenant trois dimensions. La première représente les trois longueurs de séparation d'antenne, soit 1, 2 et 3 mètres de séparation. La seconde détermine si la transmission était avec une ligne de vue ou s'il n'y avait pas de ligne de vue. Finalement, la troisième dimension est celle des trois fréquences de propagation, soit 1,4 GHz, 2,5 GHz et 4,5 GHz qui ont été choisies arbitrairement dans le cadre de la recherche. Au total, on a donc 18 cellules représentant les permutations d'espacement, de ligne de vue et de fréquence. On peut en voir une représentation à la figure 2.2.

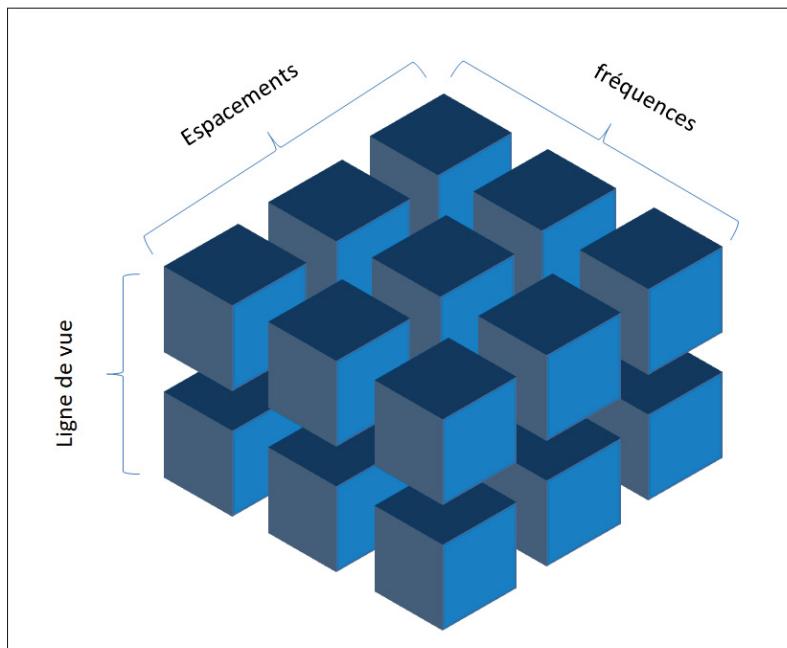


Figure 2.2 Représentation de la structure de donnée de simulation formée de 18 cellules

Pour cette recherche, les scénarios générés aléatoirement seront reproduits aux mêmes moments et aux mêmes distances pour chacune des 18 différentes cellules décrites précédemment. La disposition des objets dans l'environnement sera donc la même pour chaque cellule, permettant ainsi de les comparer plus fidèlement.

Chacune des cellules décrites dans le paragraphe précédent est formée d'un tableau à quatre dimensions. Les dimensions représentent le nombre d'antennes de transmission, le nombre d'antennes de réception, la quantité d'environnement simulée et finalement les points de distance. Les deux premières dimensions permettent de former la matrice H de la transmission. On utilise ici huit antennes à la transmission et huit antennes à la réception disposées tel que les antennes de la figure 2.1. Les opérations qui seront effectuées sur cette matrice 8×8 de paramètres H seront expliquées dans le prochain paragraphe. Pour la troisième dimension, on effectue 500 simulations de distribution stochastique d'objets différents. Chacune de ces dispositions de groupement d'objets dans l'environnement donne 20 matrices H . Ces matrices représentant 20 différentes phases d'un signal émis. Au total, on a donc 10 000 matrices H de dimensions 8×8 à chaque échelon de distance. Les mesures ont été effectuées à tous les 200 mètres sur une distance de 10 kilomètres, ce qui représente 50 différents points de distance qui composent la quatrième dimension d'une cellule.

Chacune des cellules mentionnées dans le paragraphe précédent doit pouvoir être représentée sous forme de matrices H 2×2 tel que mentionné dans la section 2.1. Une transformation simple peut être effectuée sur la matrice 8×8 pour obtenir les 16 différentes permutations de matrice 2×2 . Un exemple de l'extraction de la permutation 26-37 de la matrice H 8×8 est montré au tableau 2.1. La nouvelle matrice 2×2 est indiquée en bleu.

En raison de cette modification, le tableau de chaque cellule possède maintenant deux antennes de transmission et deux antennes de réception pour ses deux premières dimensions. Pour représenter les 16 différentes permutations d'antennes, on ajoute une dimension supplémentaire.

Maintenant, prenant un cas de matrice 2×2 . On peut calculer la puissance perçue par les systèmes de communication SISO, SIMO et MIMO. Dans le cas de SISO, une seule des quatre

Tableau 2.1 Obtention d'une matrice 2×2 à partir d'une matrice 8×8

h_{11}	h_{12}	h_{13}	h_{14}	h_{15}	h_{16}	h_{17}	h_{18}
h_{21}	h_{22}	h_{23}	h_{24}	h_{25}	h_{26}	h_{27}	h_{28}
h_{31}	h_{32}	h_{33}	h_{34}	h_{35}	h_{36}	h_{37}	h_{38}
h_{41}	h_{42}	h_{43}	h_{44}	h_{45}	h_{46}	h_{47}	h_{48}
h_{51}	h_{52}	h_{53}	h_{54}	h_{55}	h_{56}	h_{57}	h_{58}
h_{61}	h_{62}	h_{63}	h_{64}	h_{65}	h_{66}	h_{67}	h_{68}
h_{71}	h_{72}	h_{73}	h_{74}	h_{75}	h_{76}	h_{77}	h_{78}
h_{81}	h_{82}	h_{83}	h_{84}	h_{85}	h_{86}	h_{87}	h_{88}

valeurs de la matrice 2×2 est considérée, ce qui représente l'énergie qu'une antenne de réception perçoit d'une antenne de transmission. On prend donc simplement la valeur h_{11} et on peut en calculer la norme et mettre cette valeur au carré pour en déduire la puissance normalisée perçue au récepteur. On peut finalement multiplier par la puissance à la transmission étant choisie arbitrairement à 1 watt pour cette recherche.

Pour le SIMO SC, on doit calculer le carré de la norme de h_{11} et h_{12} pour sélectionner l'antenne ayant la plus haute puissance des deux. Pour SIMO MRC, on doit en fait calculer la multiplication de la matrice H 1×2 par sa matrice transposée conjuguée complexe comme on peut voir dans l'équation 2.1. Cette multiplication donnera une valeur simple.

$$P_r = P_T \times (H \times H^*) \quad (2.1)$$

Où la P_r est la puissance reçue au récepteur, P_T est la puissance à l'antenne de transmission et H représente la matrice H à la réception et H^* la matrice transposée conjuguée complexe de H .

Dans le cas du MIMO MRC, on utilise la matrice H 2×2 complète plutôt que la matrice H 1×2 . On peut employer une formule semblable indiquée à l'équation 2.2 (Gesbert *et al.*, 2003; Andersen, 2000).

$$P_r = P_T \times \max [eig(H \times H^H)] \quad (2.2)$$

La différence ici est qu'on obtient une matrice 2×2 en multipliant H avec H^H , la matrice hermitienne de H . On doit ensuite calculer les valeurs propre et sélectionner la valeur propre maximale. Cette opération permet de co-phaser les signaux reçus et de maximiser l'énergie reçue au récepteur.

Le résultat de ces différentes transformations est encore organisé sous les 18 cellules du départ. Chacune des cellules contient maintenant un tableau à quatre dimensions. La première étant nos 10 000 simulations. La seconde représente respectivement un système SISO, SIMO SC, SIMO MRC et MIMO MRC. La troisième dimension représente les différents points de distance et la quatrième représente les 16 différentes dispositions d'antenne.

2.6 Le bruit

Lors d'une communication radio, on a besoin de maintenir une certaine capacité qui est calculée avec le SNR. Ayant la puissance du signal, il faut pouvoir en faire le ratio avec la puissance du plancher de bruit P_N qui est défini dans l'équation 2.3

$$P_N = k_B \times T \times B \quad (2.3)$$

Ici, k_B représente la constante de Boltzmann, T représente la température en degré kelvin et B la largeur de bande utilisée. Une valeur de température de 293,15 K a été utilisée, soit une valeur arbitraire de 20 °C. En ce qui concerne la largeur de bande, ce scénario de WINNER II permet des résultats fiables lorsque la largeur ne dépasse pas 100 MHz. Pour les besoins de cette recherche, on utilise seulement une largeur de bande de 20 MHz.

Pour soutenir une certaine capacité, on veut s'assurer de ne pas être en deçà d'un seuil de SNR qui aurait comme effet d'interrompre le signal. Différents seuils seront utilisés lors de l'analyse des résultats pour évaluer les effets sur le système.

CHAPITRE 3

RÉSULTAT ET ANALYSE DES SIMULATIONS

3.1 Précisions

Pour l'analyse des graphiques de ce chapitre, il doit être noté que les simulations ont été faites à tous les 200 mètres. Toutefois, en raison de la continuité des courbes, certaines valeurs situées sur la ligne entre deux points calculés seront approximées.

Afin de comparer judicieusement certains graphiques et données, beaucoup de paramètres de simulation doivent demeurer constants pour isoler un phénomène particulier. L'utilisation d'un standard permettra donc d'éviter une certaine répétition des multiples paramètres. À moins d'indication contraire, les différents graphiques des résultats présentés auront été tracés en utilisant les mêmes paramètres. Premièrement, les données concernant les quatre différentes dispositions d'antenne à la transmission seront combinées pour décrire le portrait général des tests effectués. Une séparation de deux mètres entre les antennes sera utilisée au transmetteur et au récepteur. La communication sera sans ligne de vue et utilisera une fréquence centrale de 2,5 GHz. Finalement, l'effet de masquage ne sera pas non plus considéré à moins d'être indiqué autrement. L'utilisation du masquage a un effet sur la rugosité des courbes. Comme on veut éviter le phénomène pour la lecture des données, on peut simplement le désactiver dans le programme WINNER II.

3.2 Puissance perçue

3.2.1 Puissance sans ligne de vue

On peut d'abord observer les données recueillies en termes de puissance moyenne à chaque distance où les simulations de propagation ont été effectuées. La figure 3.1 présente une moyenne des puissances perçues en utilisant les paramètres standards décrits dans la section 3.1.

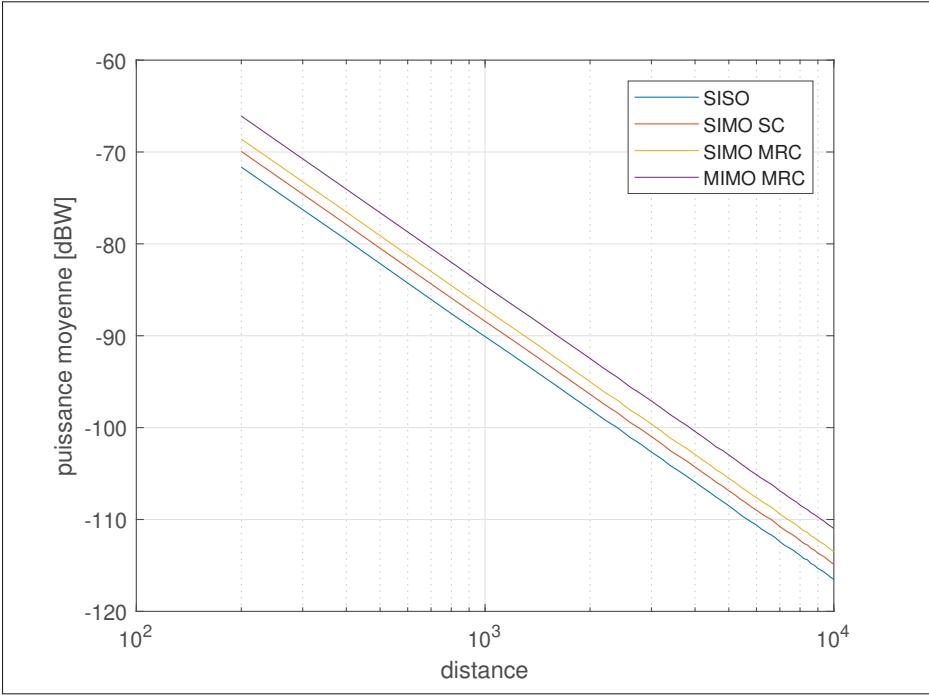


Figure 3.1 Puissance moyenne en fonction de la distance avec
espacement de 2 mètres, sans ligne de vue et une fréquence
centrale de 2,5 GHz

En premier lieu, on peut voir que simplement par la moyenne de la puissance reçue à chacune des distances, les différents types de lien de télécommunication montrent un avantage quant au nombre d'antennes utilisé. Ce résultat est prévisible, mais permet de mieux comprendre comment la puissance est captée au récepteur. Le système SIMO, ayant deux antennes à la réception, peut aller chercher plus d'énergie que l'antenne unique pour le SISO. On voit aussi que SIMO MRC a bel et bien un avantage comparé au SIMO SC. On peut voir sur la figure 3.1 qu'à chaque distance, SIMO MRC a un gain de 3 dB par rapport au SISO, qui est explicable par le double d'antenne à la réception et par la combinaison de ces différents signaux de manière cohérente. Le SIMO SC quant à lui profite du gain en diversité spatiale, mais ne peut prendre la puissance que d'une seule antenne, ce qui diminue sa performance par rapport au SIMO MRC. Pour le cas du MIMO MRC, on observe un gain de 2,6 dB par rapport au SIMO MRC. On a donc un gain de 5,6 dB par rapport au système SISO, ce qui représente 3,6 fois la puissance à la réception comparé au système SISO. Ce gain s'explique partiellement par l'utilisation du

double de la puissance à la transmission où chacune des antennes de transmission émet la même puissance que les systèmes SISO et SIMO. La puissance transmise n'a pas été normalisée par rapport aux autres systèmes en raison des objectifs de la recherche. Par ailleurs, l'utilisation d'une échelle logarithmique a été employée pour montrer que la puissance reçue décroît tel que prévu en suivant la perte de propagation en espace libre.

3.2.2 Puissance avec ligne de vue

Dans la figure 3.2 suivante, on peut encore observer la puissance moyenne observée par les différents systèmes, mais en utilisant cette fois-ci un canal avec ligne de vue pour discuter de certaines particularités du canal.

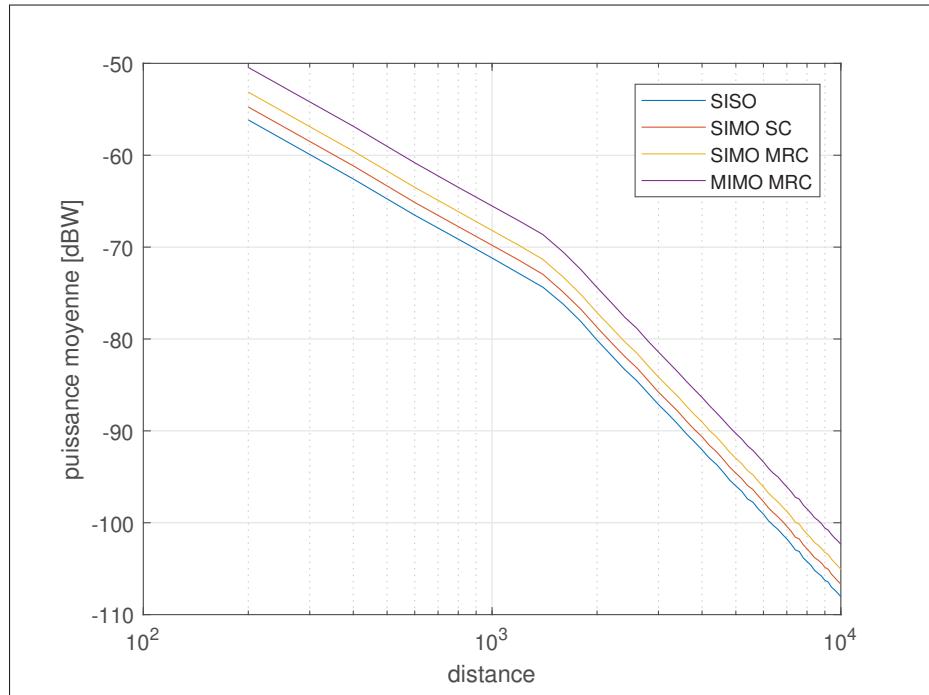


Figure 3.2 Puissance moyenne en fonction de la distance avec
espacement de 2 mètres, avec ligne de vue et une fréquence
centrale de 2,5 GHz

Le premier élément remarqué est cette inflexion se produisant à une distance d'environ 1500 mètres. Ce résultat est simplement causé par la modélisation du système. En particulier, c'est

la hauteur de l'antenne de transmission ainsi que celle de réception qui ont été choisies dans le cadre de cette recherche qui affecte la distance à laquelle on perd la ligne de vue.

Quant aux différents types de systèmes (SISO, SIMO et MIMO), ils gardent les mêmes gains l'un par rapport à l'autre lorsque comparé au système sans ligne de vue. On remarque toutefois une différence dans la puissance moyenne reçue par les différents systèmes. En raison de la ligne de vue, plus de puissance est perçue à la réception. On peut voir par exemple qu'à la plus courte distance simulée, soit 200m, la figure 3.1 montre une puissance reçue pour SISO de -72 dBW alors qu'on parle de -56 dBW pour la simulation avec ligne de vue de la figure 3.2. On peut aussi voir qu'après l'inflexion de la figure 3.2, le système a toujours plus d'énergie que le système sans ligne de vue.

3.3 Interruption du signal

Comme expliqué au premier chapitre, la puissance moyenne perçue ne permet pas de bien évaluer les capacités du système. Dans cette section, on se concentre sur la probabilité d'interruption du signal évaluée en pourcentage. Ces interruptions représentent les moments où la puissance reçue n'est pas suffisamment élevée par rapport au bruit pour satisfaire les besoins de la transmission. Le seuil choisi est en fait celui du SNR du système. Ces besoins peuvent notamment être reliés au type de modulation choisie ou simplement à l'utilisation du lien radio. On peut par exemple considérer qu'une communication vocale peut supporter un plus haut taux d'interruption que l'envoi de fichiers de texte par exemple. Cette limite de SNR sera modifiée dans la présente section pour évaluer les effets sur le système.

3.3.1 Interruption du signal sans ligne de vue

La figure 3.3 montre la probabilité d'interruption d'un signal pour les quatre différents systèmes lorsqu'on utilise un seuil de SNR de 30 dB au récepteur dans notre standard de communication.

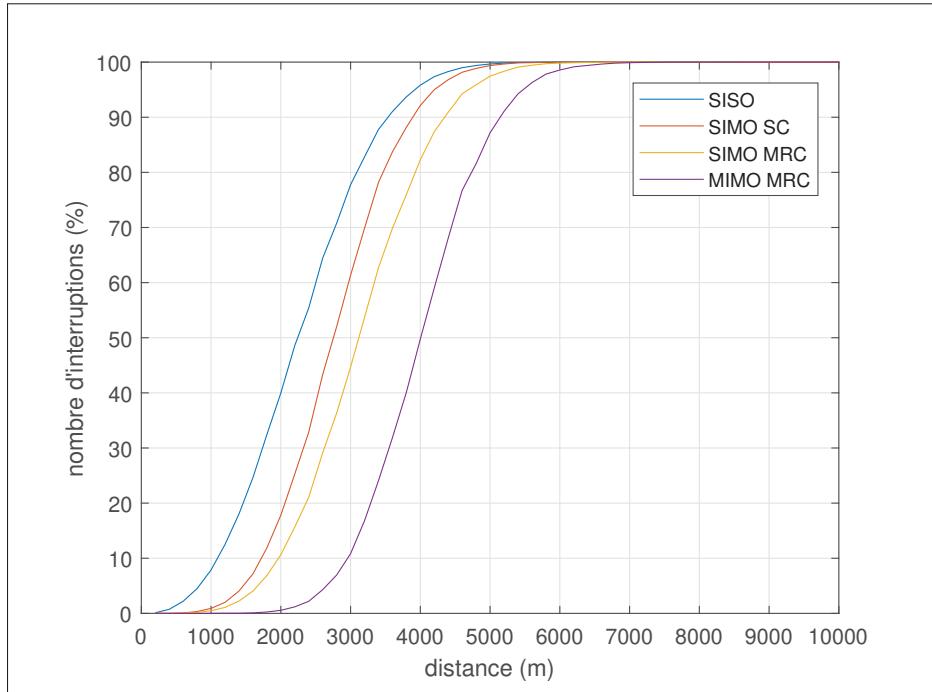


Figure 3.3 Interruption du signal en fonction de la distance avec
espacement de 2 mètres, sans ligne de vue et une fréquence
centrale de 2,5 GHz avec un seuil de 30 dB au-dessus du bruit

Tout comme avec l’analyse de la puissance moyenne reçue, on peut voir qu’avec les paramètres choisis, MIMO peut maintenir une communication de qualité similaire sur une plus grande distance par rapport à SISO. Par exemple, si nous choisissons un taux d’interruption de 2% comme standard pour le lien radio qu’on cherche à maintenir, nous pouvons trouver que SISO permet des communications jusqu’à environ 600 mètres alors que MIMO, dans les mêmes conditions et exigences, arrive à maintenir le lien jusqu’à environ 2400 mètres, soit une distance de quatre fois supérieure. On parle ici d’accroissement en distance d’environ 1800 mètres de SISO à MIMO.

On peut aussi observer que la performance des deux systèmes SIMO est similaire. SIMO SC permet une communication jusqu’à 1200 mètres alors qu’on parle d’un peu moins de 1400 mètres pour SIMO MRC. L’avantage de la diversité des antennes à la réception est l’élément clé empêchant de perdre le signal aussi souvent que SISO. On peut donc voir que même si on

considère la puissance perçue par une seule des deux antennes à la réception (SIMO SC), on a un grand avantage en raison de la diversité spatiale au récepteur.

Prenons maintenant une plus basse tolérance sur le seuil avec un SNR de 25 dB pour le lien sans fil tel qu'on peut observer à la figure 3.4

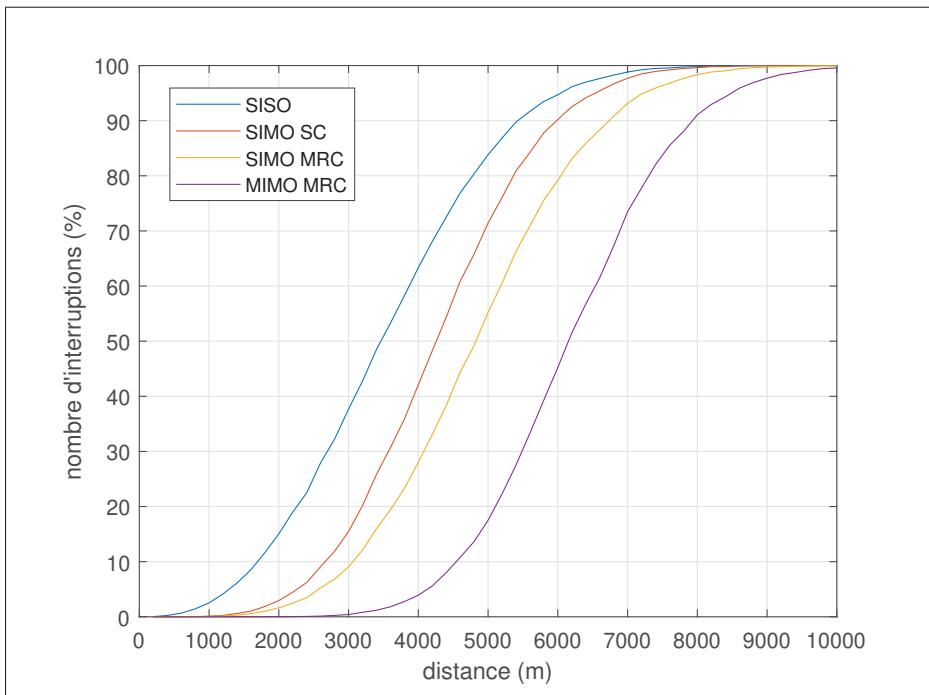


Figure 3.4 Interruption du signal en fonction de la distance avec
espacement de 2 mètres, sans ligne de vue et une fréquence
centrale de 2,5 GHz avec un seuil de 25 dB au-dessus du bruit

Toujours en analysant la probabilité d'interruption à 2%, on peut trouver que SISO peut propager à environ 900 mètres et MIMO à un peu plus de 3600 mètres. On a donc ici un accroissement en distance d'environ 2700 mètres. Cette fois encore, la portée du lien MIMO est le quadruple de la portée de SISO et le double du SIMO.

Si on baisse encore la demande sur le système, on peut voir à la figure 3.5 avec une utilisation d'un seuil de 20 dB de SNR.

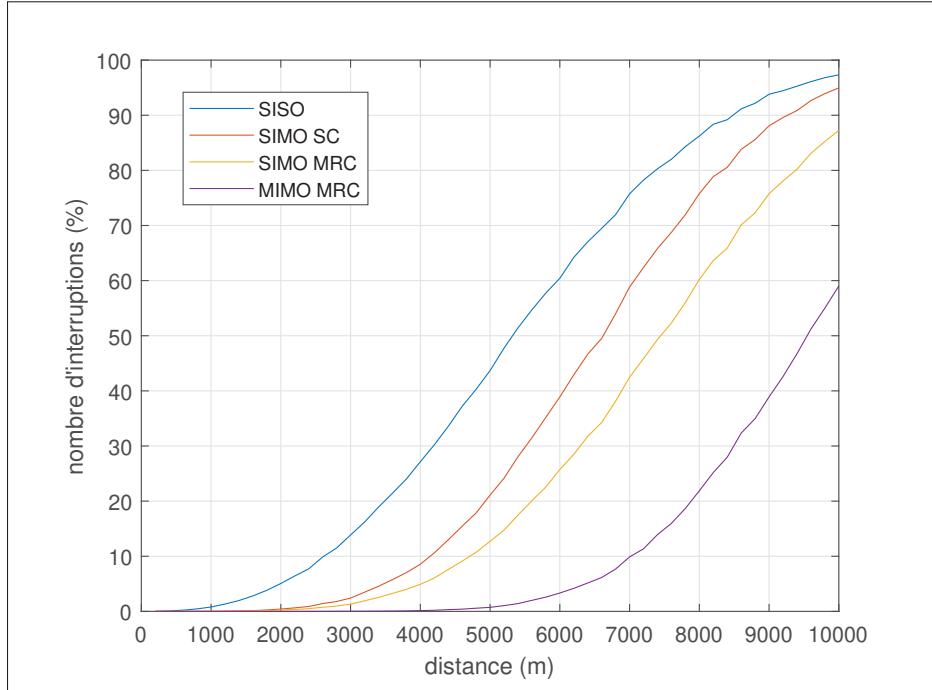


Figure 3.5 Interruption du signal en fonction de la distance avec
espace de 2 mètres, sans ligne de vue et une fréquence
centrale de 2,5 GHz avec un seuil de 20 dB au-dessus du bruit

La distance de communication à 2% d'interruption pour SISO est d'environ 1400 mètres et elle est de 5600 mètres pour MIMO. Encore une fois, MIMO permet la transmission à une distance d'environ quatre fois supérieure à la transmission de SISO. On a un accroissement en distance avec MIMO d'environ 4200 mètres.

Avec les paramètres choisis et un nombre d'interruptions constant dans la communication, ici de 2%, le système MIMO apporte un gain important en distance par rapport à un système ayant une seule antenne.

3.3.2 Interruption du signal avec ligne de vue

Les tests précédents ont été effectués sans ligne de vue, rendant la propagation du signal plus difficile. Lorsqu'on utilise une communication avec ligne de vue, la modélisation du signal

est différente et il faut en prendre compte dans l'évaluation des performances d'un système MIMO.

On peut voir dans la figure 3.6 suivante l'utilisation des mêmes paramètres du canal ayant été simulés pour la figure 3.3 avec un seuil de 30 dB de SNR. La différence ici est l'utilisation d'un canal avec ligne de vue.

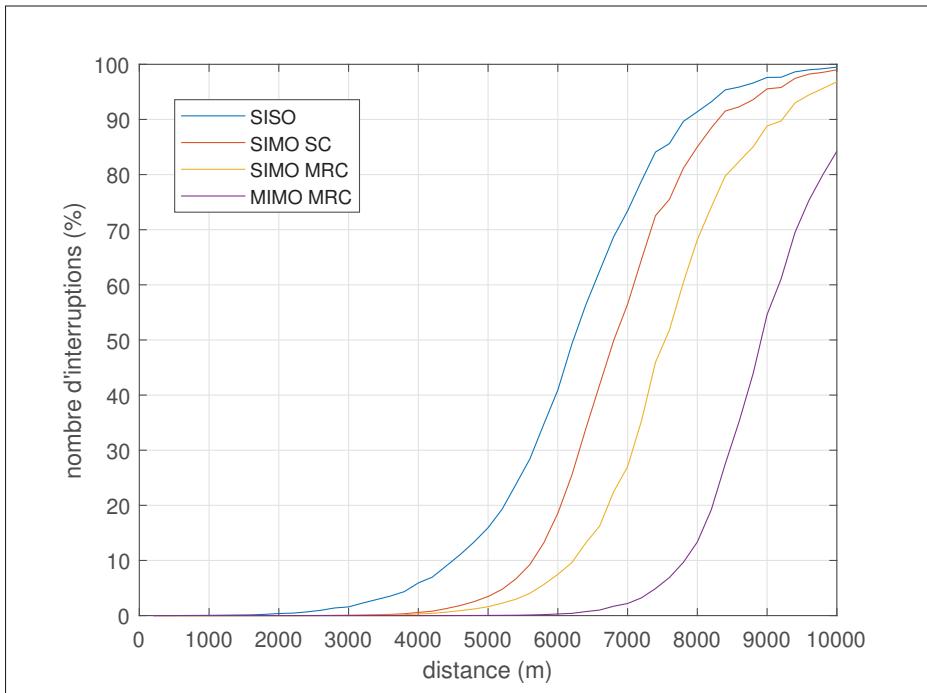


Figure 3.6 Interruption du signal en fonction de la distance avec
espacement de 2 mètres, avec ligne de vue et une fréquence
centrale de 2,5 GHz avec un seuil de 30 dB au-dessus du bruit

On peut premièrement observer que le taux d'interruption de 2% est atteint à une bien plus grande distance que celle de la figure 3.3. On obtient ici une distance pour SISO d'environ 3100 mètres, 4600 mètres pour SIMO SC, 5100 mètres pour SIMO MRC et une distance de 6900 mètres pour MIMO. Le MIMO a alors une portée environ 2,2 fois plus élevée que SISO, soit 3800 mètres de plus. Malgré que l'accroissement en distance gagnée par MIMO soit supérieur au 1800 mètres du système sans ligne de vue, la proportion du gain n'est pas aussi élevée par rapport à SISO. Ces résultats semblent indiquer que la proportion du gain en distance acquise

par un système MIMO comparé à un système SISO augmente plus les conditions du canal de propagation se détériorent.

3.4 Capacité

Plutôt que de fixer le SNR et de s'intéresser à une probabilité d'interruption particulière, il est utile de calculer la capacité du système considérant un certain pourcentage d'interruption. Ce calcul tient donc aussi en compte la largeur de bande choisie pour la recherche, soit de 20 MHz.

3.4.1 La capacité sans ligne de vue

L'effet de MIMO par rapport à SISO peut être discuté en termes de capacité du système pour un débit défini de données. La figure 3.7 montre la moyenne de la capacité de nombreuses simulations effectuées à chaque distance. Ici, on utilise les mêmes paramètres de simulation que ceux décrits à la section 3.1.

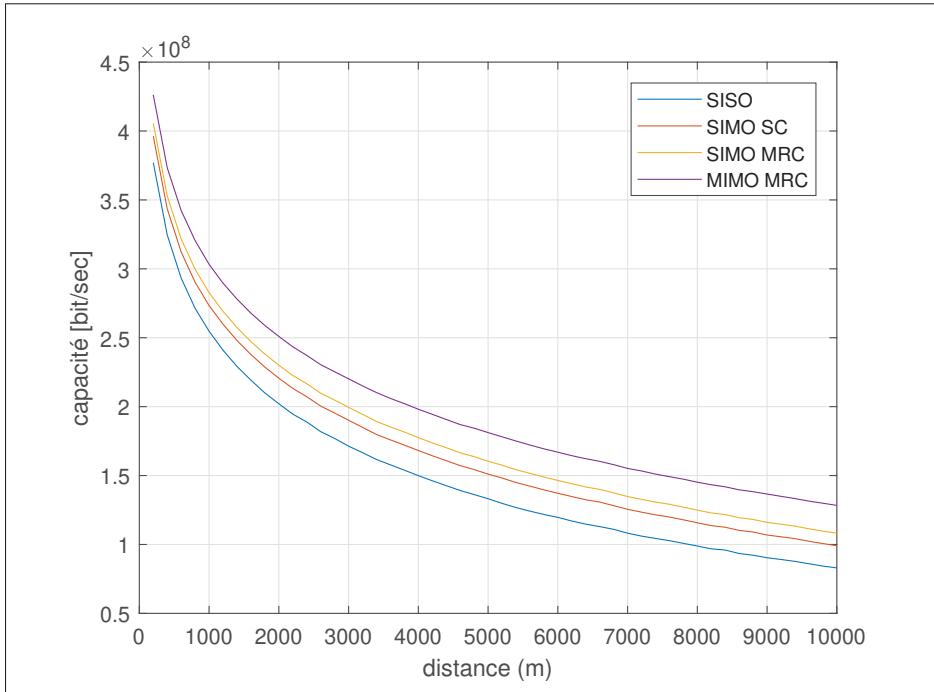


Figure 3.7 Capacité moyenne en fonction de la distance avec
espacement de 2 mètres, sans ligne de vue et une fréquence
centrale de 2,5 GHz

On peut voir ici que MIMO permet de communiquer avec la même capacité moyenne que SISO à des distances environ deux fois plus élevées. Par exemple, on peut voir que la capacité moyenne calculée avec SISO pour des distances de 1000, 2000 ou 4000 mètres est atteinte respectivement par les distances 1900, 3800 et 7600 mètres avec MIMO.

Il faut toutefois comprendre qu'on utilise ici la moyenne des capacités calculées, ce qui représente grossièrement le 50^e centile, ou la médiane, des valeurs de capacités calculées à chaque distance. On peut voir la figure 3.8 qui montre véritablement le 50^e centile donne un résultat essentiellement identique considérant le grand nombre de simulations effectuées.

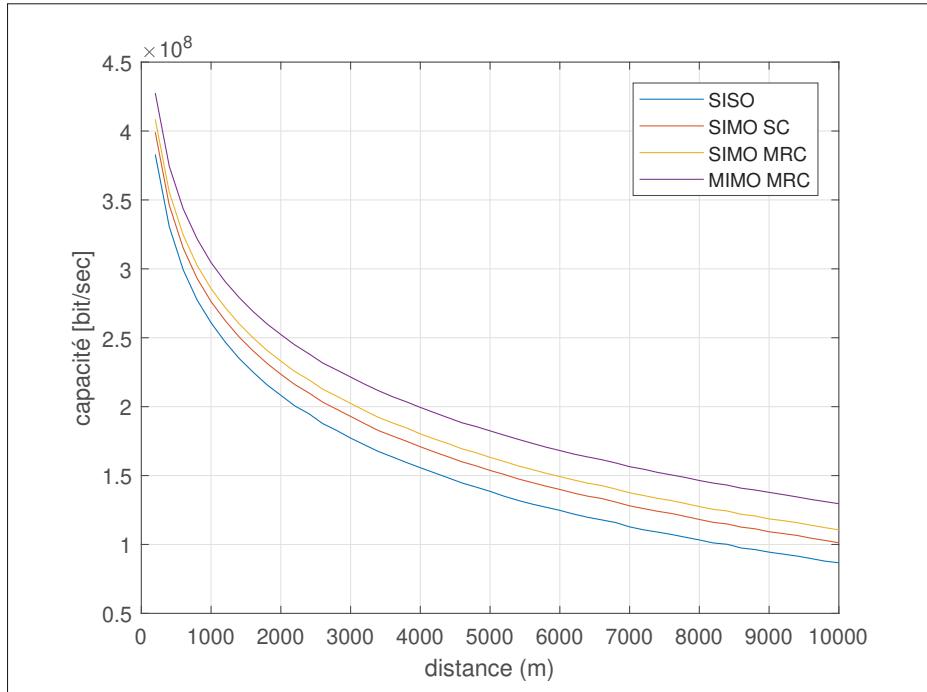


Figure 3.8 Capacité du 50^e centile en fonction de la distance avec espace de 2 mètres, sans ligne de vue et une fréquence centrale de 2,5 GHz

On peut, par le même processus, déterminer une autre valeur de probabilité d'interruption du signal. Nous pouvons donc examiner le 2^e centile qui représente la capacité qui est maintenue 98% du temps. On a donc un équivalent pour une probabilité d'interruption de 2%. On peut voir le résultat sur la figure 3.9.

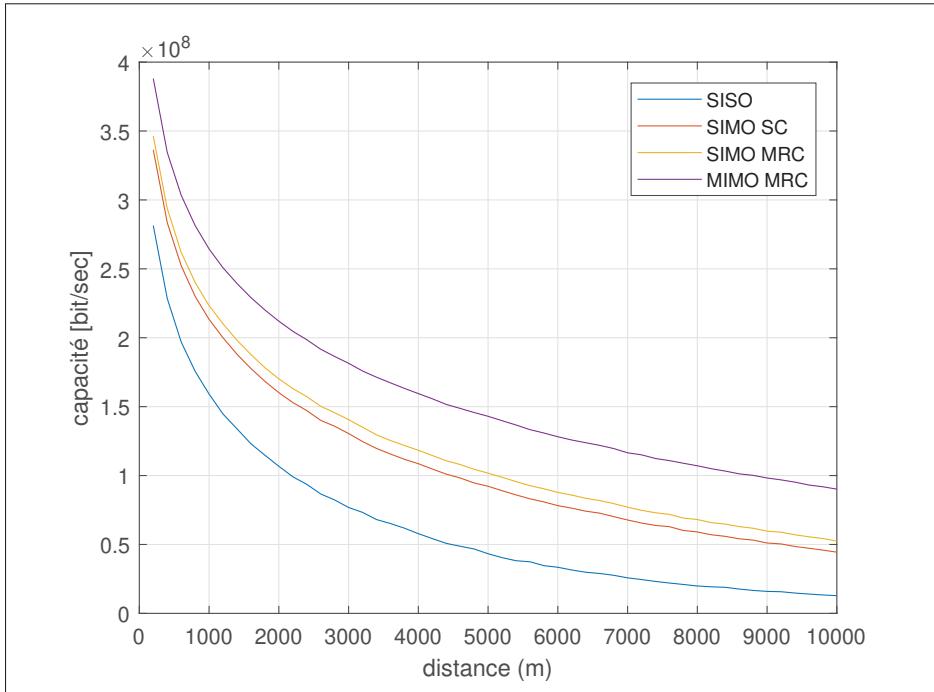


Figure 3.9 Capacité du 2^e centile en fonction de la distance avec
espacement de 2 mètres, sans ligne de vue et une fréquence
centrale de 2,5 GHz

On peut voir que les courbes de capacité des quatre systèmes sont différentes de celle décrivant les capacités moyennes indiquées à la figure 3.7. Dans le cas présent, on peut par exemple s'intéresser à une capacité de 200 Mbps. En raison des paramètres choisis, le taux d'interruption est fixé à 2%. Ici, le système SISO permet de transmettre jusqu'à environ 600 mètres en maintenant les mêmes paramètres alors qu'on calcule 2400 mètres pour MIMO. C'est une distance de quatre fois plus grande atteignable par l'utilisation du MIMO.

3.4.2 La capacité avec ligne de vue

En utilisant un canal de propagation avec ligne de vue, on peut tracer de nouveau un graphique décrivant la capacité moyenne à chaque distance tel que montré à la figure 3.10.

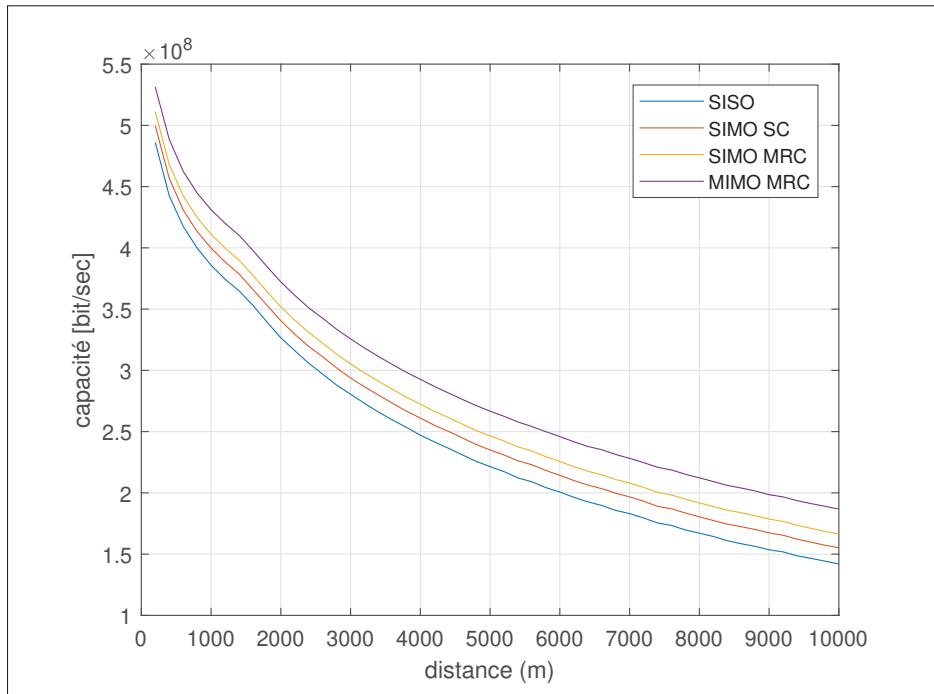


Figure 3.10 Capacité moyenne en fonction de la distance avec
espacement de 2 mètres, avec ligne de vue et une fréquence
centrale de 2,5 GHz

Encore une fois, la figure 3.11, représentant le 50^e centile de la capacité de la communication, est très semblable au graphique de la moyenne des capacités.

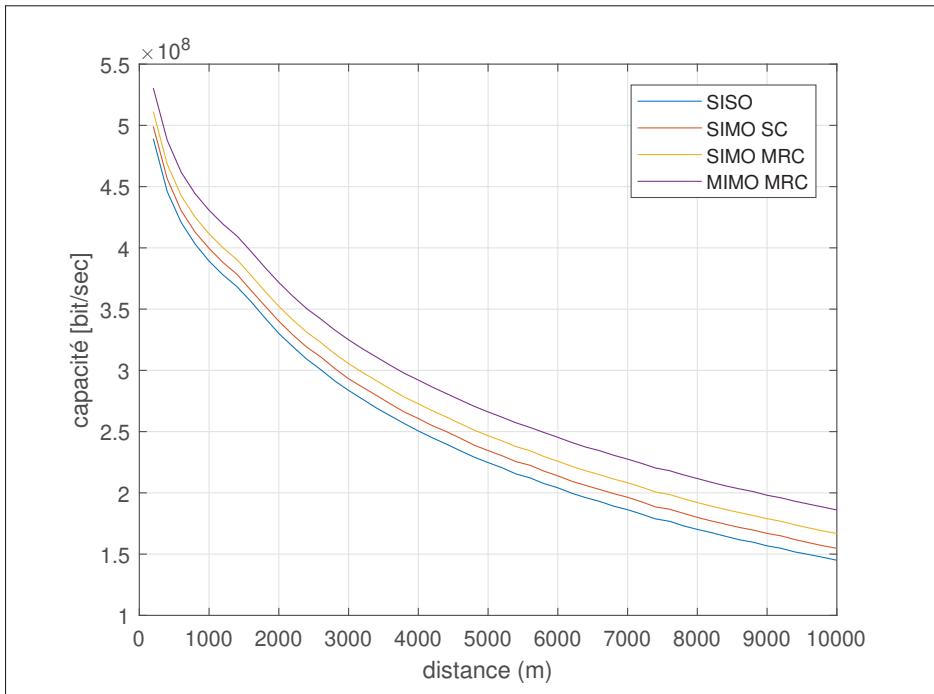


Figure 3.11 Capacité du 50^e centile en fonction de la distance avec espace de 2 mètres, avec ligne de vue et une fréquence centrale de 2,5 GHz

Maintenant, la figure 3.12 montre le 2^e centile de la capacité. On peut cette fois-ci trouver qu'avec une capacité fixe à 200 Mbps, le système SISO peut maintenir 98% des communications jusqu'à 3100 mètres alors que MIMO a une portée de 6900 mètres, ce qui représente un peu plus du double de la distance.

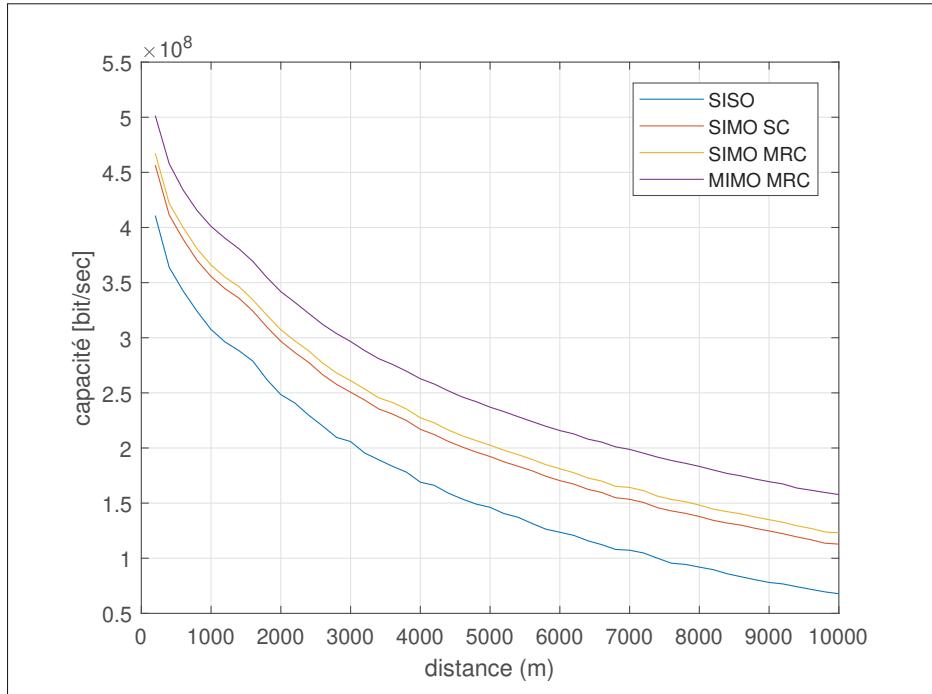


Figure 3.12 Capacité du 2^e centile en fonction de la distance avec espacement de 2 mètres, avec ligne de vue et une fréquence centrale de 2,5 GHz

Les résultats sont semblables lorsque comparés à la section 3.3, car dans les deux cas, on utilise les mêmes paramètres.

3.4.3 La capacité avec puissance normalisée pour MIMO

Il est intéressant d'observer la capacité de MIMO si on considère que la puissance à la transmission est la même que pour les systèmes SISO, SIMO SC et SIMO MRC. On peut voir aux figures 3.13 et 3.14, respectivement sans et avec ligne de vue, la capacité du 2^e centile en fonction de la distance tout comme aux figures 3.9 et 3.12, mais en normalisant la puissance à la transmission.

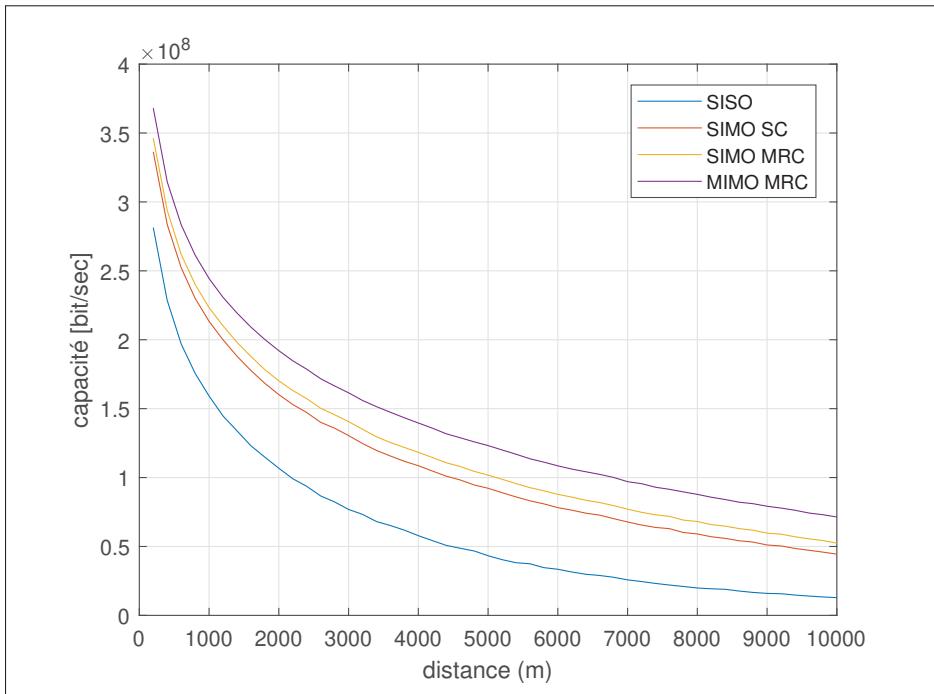


Figure 3.13 Capacité du 2^e centile en fonction de la distance avec espacement de 2 mètres, sans ligne de vue, une fréquence centrale de 2,5 GHz et une puissance MIMO normalisée

Comme on peut voir ici, MIMO garde un avantage par rapport aux autres systèmes grâce à son exploitation de la diversité spatiale. Si on prend encore la capacité de 200 Mbps, on peut voir que SISO a une portée de 600 mètres alors que MIMO a une portée de 1800 mètres, ce qui représente le triple de la distance pour 1200 mètres de gain en portée.

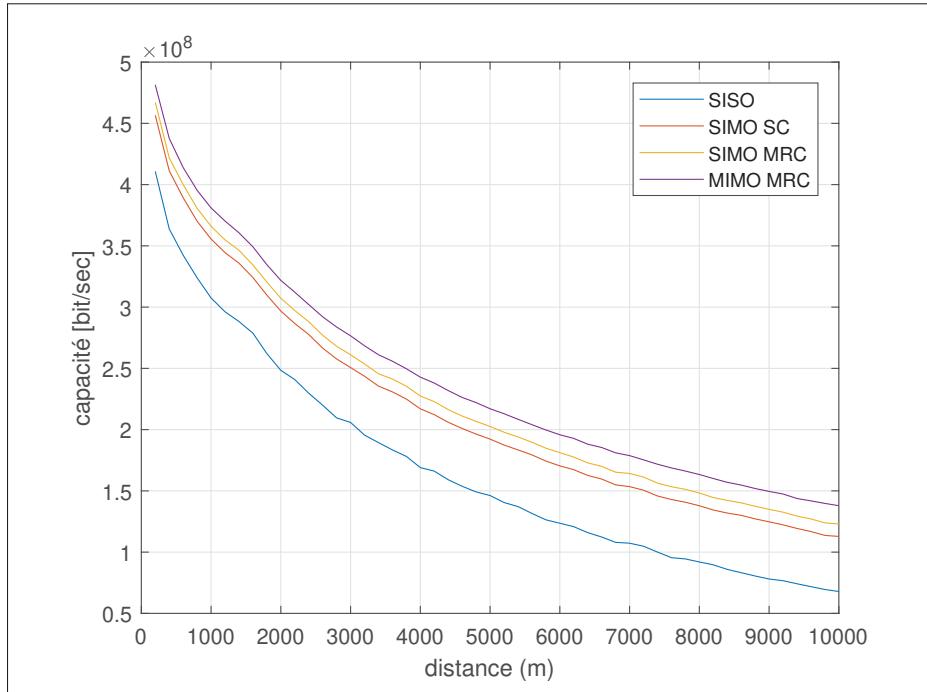


Figure 3.14 Capacité du 2^e centile en fonction de la distance avec espace de 2 mètres, avec ligne de vue, une fréquence centrale de 2,5 GHz et une puissance MIMO normalisée

Pour la ligne de vue, MIMO garde aussi un avantage par rapport aux autres systèmes. Alors que SISO atteint une distance de 3100 mètres, MIMO atteind une portée de 5800 mètres, soit d'un peu moins que le double de SISO. On parle d'un gain en portée de 2700 mètres.

Ces résultats illustrent l'avantage d'avoir des antennes à la transmission et à la réception pour diminuer la probabilité de perdre le signal.

3.4.4 La capacité avec effet de masquage

Dans le but de se rapprocher le plus fidèlement possible de la réalité, il faut inclure les effets de masquage dans l'analyse des données. L'effet de masquage pris en compte par WINNER II permet de simuler avec une plus grande justesse les évanouissements à grande échelle qu'on peut trouver dans le canal de propagation. En utilisant les mêmes paramètres qu'à la figure 3.9,

mais en considérant l'effet de masquage, on peut obtenir la figure 3.15. Il sera alors possible de comparer les deux figures.

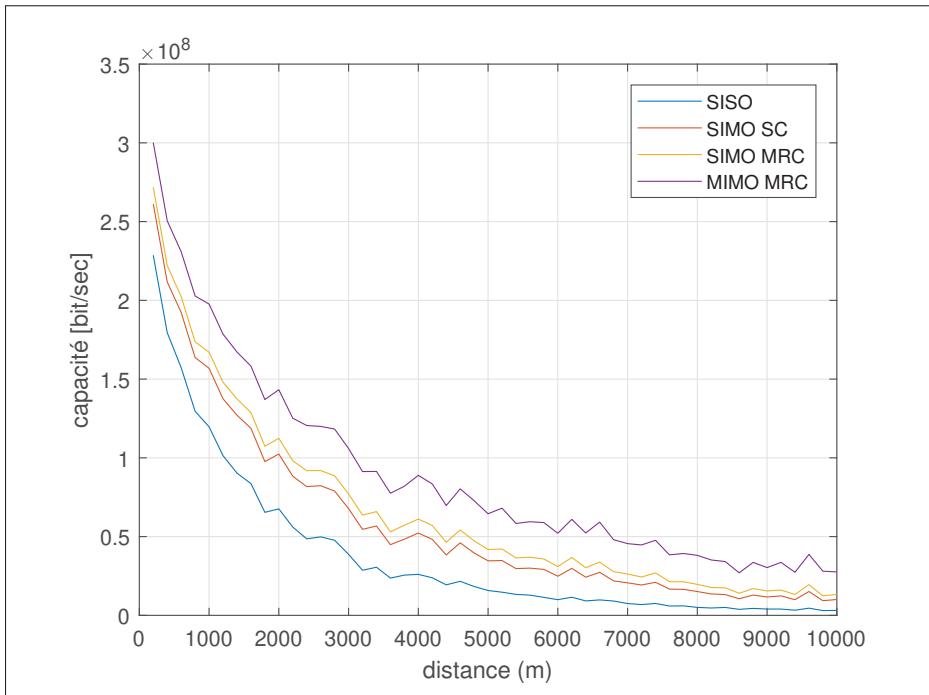


Figure 3.15 Capacité du 2^e centile en fonction de la distance avec espace de 2 mètres, sans ligne de vue, une fréquence centrale de 2,5 GHz et effet de masquage

On peut observer que le canal de propagation du scénario de WINNER II avec effet de masquage rend la communication sans fil beaucoup plus difficile. La capacité perçue à chaque distance est plus basse pour chacun des quatre types de communication. On peut toutefois observer que MIMO reste plus performant que SISO. Si nous observons la même capacité de 200 Mbps utilisée par les précédents tests, on peut lire qu'une communication SISO est possible jusqu'à environ 300 mètres et MIMO jusqu'à 900 mètres. On aurait donc ici un accroissement en distance d'environ 600 mètres. Cela représente une portée environ trois fois plus élevée avec MIMO qu'avec SISO. C'est toutefois moins que le gain proportionnel obtenu sans effet de masquage qui atteignait une portée quatre fois plus élevée.

L'effet de masquage sur une communication avec ligne de vue utilisant les paramètres utilisés à la figure 3.12 donne la figure 3.16.

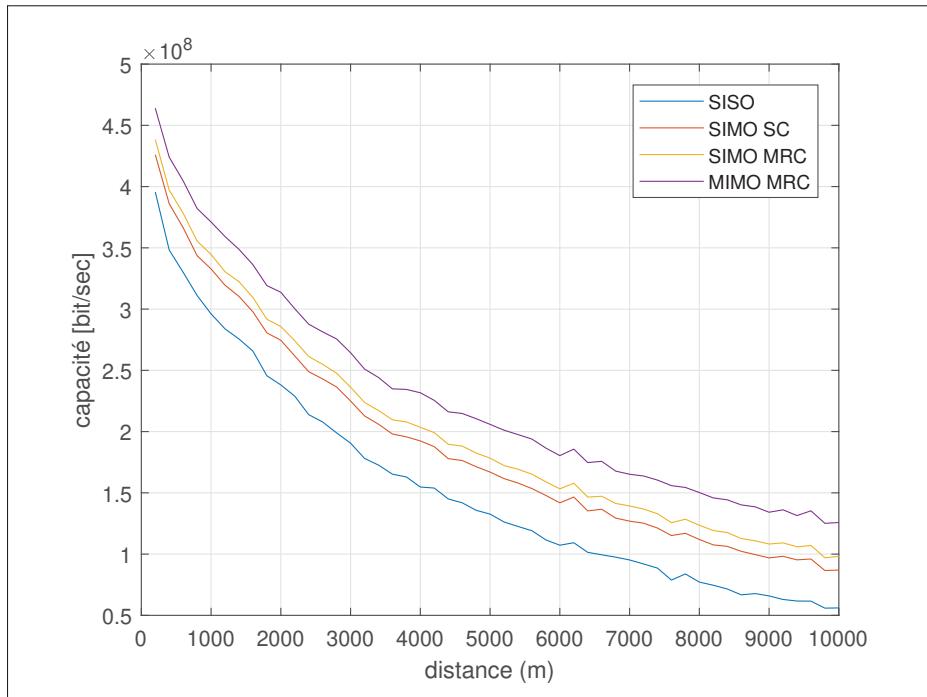


Figure 3.16 Capacité du 2^e centile en fonction de la distance avec espace de 2 mètres, avec ligne de vue, une fréquence centrale de 2,5 GHz et effet de masquage

Les données observées ici subissent un effet semblable. La communication à 200 Mbps est possible jusqu'à environ 2800 mètres pour SISO et 5200 mètres pour MIMO. On observe donc un accroissement en distance d'environ 2400 mètres, soit un peu moins du double de la distance. On peut remarquer que la communication avec ligne de vue semble moins avoir été affecté par l'effet de masquage comparé à la communication sans ligne de vue.

Avec ou sans ligne de vue, on peut voir que MIMO reste très avantageux par rapport à SISO lorsqu'on applique l'effet de masquage. L'accroissement en distance n'est toutefois pas aussi grand en raison de ces différents évanouissements. Le gain proportionnel en distance a diminué dans les deux cas lorsqu'on utilise le masquage. Sans ligne de vue, on a une portée environ trois fois plus grande avec MIMO dans un environnement avec effet de masquage comparé à quatre

fois plus élevée sans masquage. Pour un canal avec ligne de vue, on passe d'un peu plus du double à un peu moins du double de la portée lorsqu'on utilise le masquage.

3.5 La position des antennes MIMO

Le positionnement des antennes peut être séparé en deux composantes, soit l'espacement entre les antennes et la disposition de celles-ci. La disposition réfère aux quatre différents cas mentionnés au chapitre 2, c'est-à-dire 15, 26, 37 et 48.

Puisque l'effet de masquage est causé par la géométrie de certains objets présents dans le canal de propagation, le positionnement des antennes devrait théoriquement affecter la propagation du signal au travers de ce canal. Pour cette raison, les tests de cette section seront tous effectués avec l'effet de masquage.

Théoriquement, différentes dispositions et espacements des antennes devraient avoir un impact sur le canal entre autre en raison de l'effet de masquage. On peut par exemple penser à une transmission radio affectée par la présence d'un arbre ou d'une voiture générée aléatoirement par WINNER II. Changer la disposition des antennes à la transmission devrait permettre du moins de changer les différents obstacles et obstructions rencontrés à travers le canal de propagation. C'est pour éviter cet effet de positionnement sur le canal de transmission que les quatre cas sont effectués et par la suite combinés.

La fréquence centrale du signal sera aussi abordée, car elle est directement reliée à la longueur d'onde et a donc potentiellement un effet non négligeable sur la géométrie du canal et le positionnement des antennes.

3.5.1 L'espacement entre les antennes

Toujours en gardant le standard de la section 3.1, on peut prendre le graphique de capacité en utilisant le 2^e centile tel qu'à la figure 3.15 et le tracer en utilisant différents espacements d'antenne pour en analyser les conséquences. La figure 3.17 comporte trois courbes. Chacune

représente la capacité d'un système MIMO pour différents espacements entre les antennes. Il est évidemment inutile d'analyser ici un système SISO, car ce dernier n'a qu'une antenne à la transmission et à la réception. On veut simplement comparer différents systèmes MIMO ayant différent espacement d'antenne.

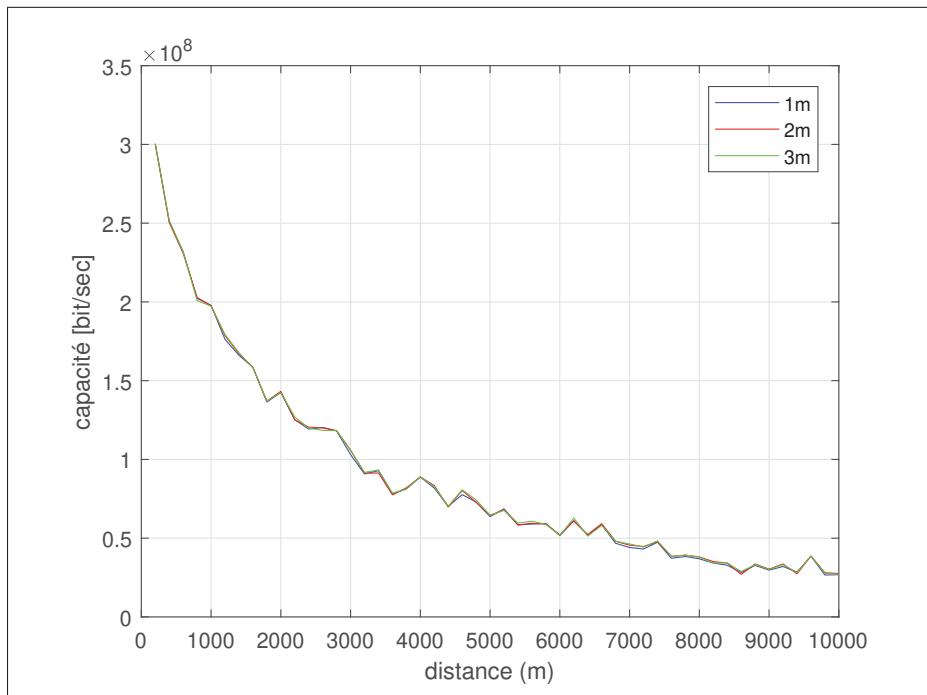


Figure 3.17 Capacité du 2^e centile en fonction de la distance avec espacement de 1,2 et 3 mètres, sans ligne de vue, une fréquence centrale de 2,5 GHz et effet de masquage

On peut clairement voir que les courbes des différents espacements d'antenne se superposent. Ceci indique simplement que l'espacement entre les antennes n'a aucun effet sur la propagation du signal, du moins pour les valeurs d'espacement choisies. Les tests effectués avec et sans ligne de vue pour des systèmes SIMO SC et SIMO MRC ont aussi donné les mêmes résultats. Ce résultat n'est pas surprenant, car les différents espacements étudiés pour cette recherche, soit de 1,2 et 3 mètres sont tous plus grands que la longueur d'onde des fréquences utilisées.

3.5.2 L'effet de fréquence

En théorie, il est connu que l'espacement entre les antennes doit être plus grand que la moitié de la longueur d'onde λ pour profiter d'une bonne diversité spatiale. Ici, les espacements choisis sont plus grands que λ , mais on veut tout de même vérifier s'il y a un impact selon la simulation. Lorsqu'effectué avec les différentes fréquences explorées dans ce mémoire, le tracé de la capacité pour différents espacements et différentes fréquences donne le résultat de la figure 3.18. Encore une fois, c'est la valeur du système MIMO qui est utilisé pour tracer chacune des neuf courbes.

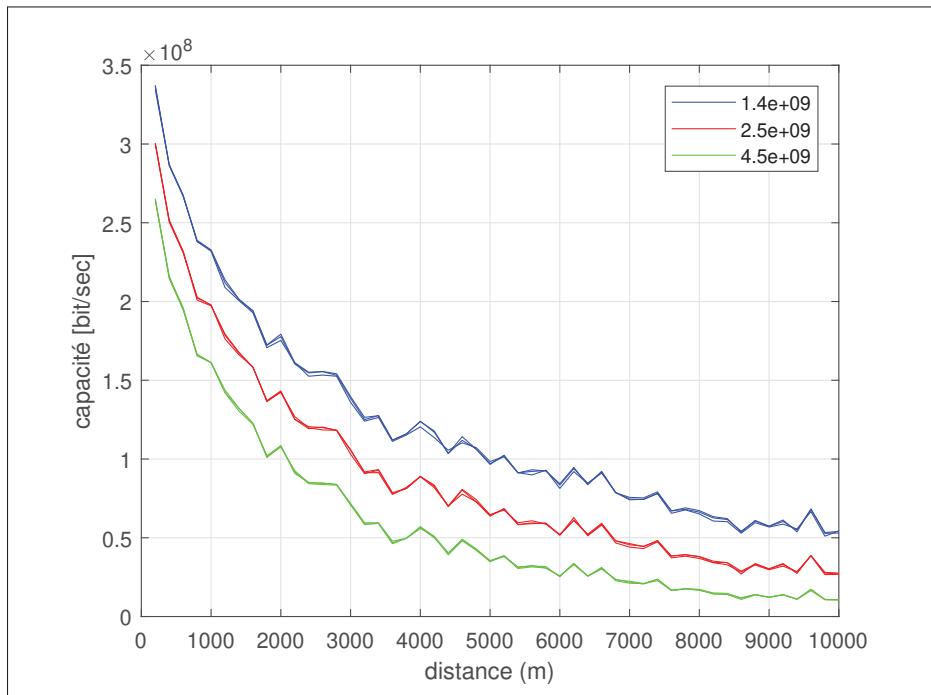


Figure 3.18 Capacité du 2^e centile en fonction de la distance avec espace de 1,2 et 3 mètres, sans ligne de vue avec effet de masquage pour les fréquences centrales de 1,4 GHz, 2,5 GHz et 4,5 GHz

Évidemment, puisque la fréquence affecte la perte de la propagation en espace libre on peut voir que plus la fréquence est basse, plus la portée est grande. Toutefois, on remarque ici

que la fréquence elle-même n'a pas eu d'effet sur l'accroissement en distance en raison de l'espacement entre les antennes.

On peut expliquer ce phénomène en raison de l'écart de grandeur entre la longueur d'onde λ des fréquences choisies qui sont bien plus basses que les différents espacements qui ont été testés dans cette recherche. Le plus grand λ est de 21,4 cm pour la fréquence de 1,4 GHz. Ce λ est bien plus petit que l'espacement de 1 mètre choisi comme plus petit espacement entre les antennes de transmission.

3.6 Discussion générale des résultats

Avec les résultats obtenus, on peut voir qu'il y a un avantage à utiliser le MIMO par rapport à un système SISO en raison de la diversité du signal apporté par ce système. Le gain en portée varie aussi en raison de plusieurs facteurs, mais on peut tout de même remarquer la tendance générale de MIMO à être plus résilient face aux conditions du canal. Par exemple, MIMO a un plus grand avantage par rapport à SISO lorsqu'il n'y a pas de ligne de vue ou que le niveau de SNR demandé est plus élevé. Le test avec puissance normalisée à la transmission pour MIMO a aussi permis de montrer l'avantage d'avoir des antennes à la transmission et à la réception pour diminuer la probabilité de perdre le signal.

En ce qui a trait à l'espacement entre les antennes, on a pu observer qu'il ne semble pas avoir d'impact notable sur la propagation en raison des fréquences étudiées et de leur longueur d'onde respective. La probabilité d'interruption calculée pour les systèmes SISO, SIMO et MIMO a permis de montrer l'avantage que la diversité spatiale peut apporter à la communication. Aussi, les graphiques de capacité évalués sans ligne de vue avec une probabilité d'interruption de 2% montrent que MIMO MRC peut maintenir une communication radio sans ligne de vue pour une portée de trois à quatre fois plus grande tout dépendamment si on considère l'effet de masquage ou non. Il y avait moins de différence lorsqu'on observait la capacité moyenne à chaque distance, mais c'est justement avec la probabilité d'interruption de 2% que MIMO manifeste un grand avantage par rapport à SISO, d'où l'importance de faire ce test.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La motivation initiale était d'évaluer le gain en portée d'un lien sans fil en utilisant la technologie MIMO. Pour effectuer les tests nécessaires de cette étude, l'outil WINNER II a été utilisé en raison de la modélisation géométrique stochastique du canal de propagation ainsi que ses nombreux scénarios modélisés à partir de véritables données empiriques.

En utilisant les scénarios et paramètres évalués dans cette recherche, les résultats observés montrent clairement un important gain en portée lié à l'utilisation de la technologie MIMO par rapport à SISO. Ce gain varie en fonction de plusieurs facteurs, dont les exigences sur le système. On peut surtout remarquer que le gain en diversité lié à l'utilisation de MIMO rend le lien radio plus robuste. Plus les conditions de propagation sont difficiles, plus le gain en portée est prononcé. Les performances obtenues semblent tout de même indiquer qu'un système MIMO a un grand potentiel d'augmenter la portée des radios.

Les résultats montrent également que les différents espacement entre les éléments d'une antenne MIMO choisis pour la recherche n'ont pas d'effet sur la transmission du signal. Les longueurs d'onde, associés aux fréquences utilisés, sont beaucoup plus petites que l'espace-ment entre les antennes. Pareillement, les différentes fréquences testées, n'ont pas influencé la transmission du système MIMO mis à part la propagation en espace libre plus élevée des plus basses fréquences.

Des travaux futurs pourraient être effectués dans le but de produire des résultats plus près de la réalité. On peut par exemple penser à des modèles prenant en compte un environnement tridi-mensionnel dans le modèle du canal. Les résultats pourraient alors être étendus à des terrains montagneux par exemple. Des paramètres concernant les conditions météorologiques comme les réflexions sur la glace et la neige dans des régions polaires pourraient également être ef-fectués. Aussi, un plus grand nombre de tests incluant la vitesse de déplacement des véhicules pourrait être évalué en plus de profondeur. Différents types d'antennes ou des systèmes MIMO

à plus de deux antennes pourraient également être testés et évalués. Finalement, un réseau plus complexe comportant de nombreux utilisateurs pourrait être simulé pour mieux comprendre les effets et interactions entre ces derniers.

BIBLIOGRAPHIE

- Andersen, J. B. (2000). Array gain and capacity for known random channels with multiple element arrays at both ends. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 18(11), 2172–2178.
- Bultitude, Y. d. J. & Rautiainen, T. (2007). IST-4-027756 WINNER II D1. 1.2 V1. 2 WINNER II Channel Models. *EBITG, TUI, UOULU, CU/CRC, NOKIA, Tech. Rep., Tech. Rep.*
- Darbari, F., Stewart, R. W. & Glover, I. (2010). *MIMO channel modelling*. InTech.
- Friedlander, B. (2005). Using MIMO to Increase the Range of Wireless Systems. *Signals, Systems and Computers, 2005. Conference Record of the Thirty-Ninth Asilomar Conference on*, pp. 1404–1408.
- Gesbert, D. & Akhtar, J. (2002). Breaking the barriers of Shannon's capacity : An overview of MIMO wireless systems. *Signal Processing*, 1(B2), B3.
- Gesbert, D., Shafi, M., Shiu, D. S., Smith, P. J. & Naguib, A. (2003). From theory to practice : An overview of MIMO space-time coded wireless systems.
- Mohr, W. (2007). The WINNER (Wireless World Initiative New Radio) project—development of a radio interface for systems beyond 3G. *International Journal of Wireless Information Networks*, 14(2), 67–78.
- Molisch, A. F. (2012). *Wireless communications*. John Wiley & Sons.
- Narandzic, M., Schneider, C., Thoma, R., Jamsa, T., Kyosti, P. & Zhao, X. (2007). Comparison of SCM, SCME, and WINNER channel models. *Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th*, pp. 413–417.
- Narandžić, M., Schneider, C. & Thomä, R. (2008). WINNER wideband MIMO system-level channel model, comparison with other reference models. *Proceedings of the Internationales Wissenschaftliches Kolloquium (IWK'09)*, 54.
- Narandžić, M., Schneider, C., Kotterman, W. & Thomä, R. S. (2013). Quantification of scenario distance within generic WINNER channel model. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2013.
- Zeng, L., Cheng, X., Wang, C.-X. & Yin, X. (2017). A 3D geometry-based stochastic channel model for UAV-MIMO channels. *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2017 IEEE*, pp. 1–5.