

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE
M. Ing.

PAR
Chahine BEN MOUSSA

CONCEPTION ET ANALYSE D'UN RELAI AÉRIEN POUR DES MOBILES

MONTREAL, LE 27 MAI 2014

©Tous droits réservés, Chahine BEN MOUSSA, 2014

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

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. Ammar Kouki, président du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

Mme Ouassima Akhrif, membre du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

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

LE 06 MAI 2014

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Ce mémoire a été élaboré au sein du laboratoire de communications et d'intégration de la micro-électronique (LACIME) à l'École de technologie supérieure.

Je voudrais tout d'abord adresser ma profonde gratitude à mon directeur de recherche Professeur François Gagnon pour ses conseils, ses directives et surtout pour la qualité de sa supervision.

Mes remerciements s'adressent aussi à notre partenaire industriel Ultra Electronics TCS pour sa confiance et son support.

Je tiens à remercier également tous les membres de l'équipe du projet « Launch & Forget » pour leur collaboration et leur soutien.

J'aimerais adresser un remerciement particulier à ma chère famille et à tous ceux à qui je dois tant pour leur support considérable tout le long de ma démarche.

CONCEPTION ET ANALYSE D'UN RELAI AÉRIEN POUR DES MOBILES

Chahine BEN MOUSSA

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente une étude d'un relai aérien entre des nœuds mobiles au sol. Deux stratégies différentes pour la conception de ce relai sont étudiées. Pour les deux stratégies, le relai consiste en un drone autonome qui se déplace de manière à relier deux véhicules terrestres mobiles avec absence de ligne de vue directe. La première stratégie (pont aérien) implique qu'un drone essaie de garder une position optimale entre les deux nœuds du sol tandis que pour la deuxième stratégie (mât aérien) le drone est toujours placé directement au-dessus de l'un des véhicules terrestres. Cette dernière stratégie est proposée dans le but de réduire la dynamique de la position optimale du relai causée notamment par la directivité des antennes associées aux mobiles au sol.

Les modèles de propagation Winner II sont utilisés afin de simuler ce type de relai et de comparer les performances des deux stratégies proposées. En particulier, un scénario spécifique à la propagation en milieu urbain est adopté.

Les résultats des simulations montrent dans chaque cas, la variation de la puissance du signal reçu par le relai aérien en fonction des positions des véhicules terrestres et du drone. Les trajectoires sont générées aléatoirement pour les deux mobiles au sol dans un milieu urbain afin de parvenir à une analyse statistique de ces deux stratégies et discuter leurs avantages en termes de qualité de signal et de contrôle de navigation.

Mots-clés: drone; UAV; relai aérien autonome; pont aérien; mât aérien; modèles Winner II

DESIGN AND ANALYSYS OF AN AIRBORNE RELAY FOR MOBILE NODES

Chahine BEN MOUSSA

ABSTRACT

This thesis presents a study of an aerial relay between ground mobile nodes. Two different strategies of building this aerial relay are studied. For both strategies, the airborne relay is considered as a signal repeater between the two ground mobile vehicles. Non-line-of-sight (NLOS) conditions are considered between the aerial relay and each mobile node. The first strategy (aerial bridge) implies that an unmanned aerial vehicle (UAV) is trying to keep an optimal position between the two ground nodes while in the aerial mast strategy; the UAV is always placed directly above one of the ground vehicles. This latter strategy is proposed in order to reduce the dynamics of the optimal position of the relay in particular caused by the directivity of mobile ground antennas.

Winner II propagation models are used in order to simulate these airborne relays and compare the performance achieved within each relay strategy. In particular, an urban environment propagation scenario is adopted.

Simulation results demonstrate in each case the variation of transmitted signal strength due to ground vehicles and UAV movement. Trajectories are generated randomly for both ground nodes on a street map of an urban area in order to achieve a statistical analysis of both strategies and discuss their advantages in terms of signal transmission and UAV navigation control.

Keywords: UAV; autonomous airborne relay; aerial bridge; aerial mast; Winner II models

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PRÉSENTATION DU RELAI DE COMMUNICATION AÉRIEN	3
1.1 Introduction	3
1.2 Mise en contexte	3
1.2.1 La modélisation du drone	3
1.2.2 Les algorithmes de contrôle	4
1.2.3 Modélisation du canal : volet communication	4
1.3 Définition du relai aérien	4
1.4 Champs d'application	5
1.4.1 Communication en environnement d'urgence	6
1.4.2 Communication en mission	6
1.5 Architecture d'un relai aérien	6
1.5.1 Le drone	6
1.5.2 Antenne du drone	8
1.5.3 Antenne du mobile au sol	8
1.6 Positionnement du relai aérien	9
1.7 Conclusion	9
CHAPITRE 2 MODÈLES DE PROPAGATION	11
2.1 Introduction	11
2.2 Modèles de Rice et de Rayleigh	11
2.2.1 Modèle de Rice	11
2.2.2 Modèle de Rayleigh	13
2.3 Le modèle de Olsen-Segal	13
2.4 Modèle ITU-R pour lien satellitaire	15
2.5 Modèles WINNER II	15
2.5.1 Scénarios proposés par WINNER II	16
2.5.2 Modélisation de l'affaiblissement	18
2.6 Conclusion	19
CHAPITRE 3 SIMULATION DU RELAI AÉRIEN	21
3.1 Introduction	21
3.2 Description de l'environnement	21
3.2.1 Géométrie du milieu	21
3.2.2 Mobilité	22
3.3 Caractéristiques du relai aérien	23
3.3.1 Antennes et fréquence de porteuse	23
3.3.2 Comportement du drone : Pont aérien	25
3.3.3 Algorithme de recherche de la position optimale	26
3.3.4 Modélisation du lien selon Winner II	26
3.4 Problèmes rencontrés	28

3.4.1	Directivité des antennes associées aux nœuds mobiles	29
3.4.2	Comportements des nœuds mobiles.....	30
3.5	Solutions proposées	30
3.5.1	Mât aérien	31
3.5.2	Modification des antennes	32
3.6	Conclusion	34
CHAPITRE 4 SIMULATION ET COMPARAISON DES STRATÉGIES :		
	PONT AÉRIEN VS MÂT AÉRIEN	35
4.1	Introduction.....	35
4.2	Description des scénarios de simulation	35
4.3	Simulation temporelle.....	37
4.3.1	Scénario 1.....	37
4.3.2	Scénario 2.....	41
4.3.3	Scénario 3.....	44
4.4	Résultats statistiques	47
4.5	Conclusion	50
CONCLUSION.....		51
ANNEXE I MODÉLISATION DÉTAILLÉE DE LA PERTE DE PROPAGATION SELON WINNER II		53
ANNEXE II CONTEXTES DE LA MISE EN PLACE DU RELAI AÉRIEN.....		57
ANNEXE III ALGORITHME DE RECHERCHE DE LA POSITION OPTIMALE		61
LISTE DES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		63

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1 Scénarios proposés par WINNER II.....	17
Tableau 4.1 Paramètres et hypothèses de simulation	36
Tableau 4.2 Mesures statistiques.....	49

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Relai aérien entre deux camions.....	5
Figure 1.2 Drone de type quadrotor	7
Figure 1.3 Angles d'inclinaison du drone.....	8
Figure 3.1 Trajectoires des camions et du drone sur la carte de	22
Figure 3.2 Patron de rayonnement de l'antenne sur	24
Figure 3.3 Patron de rayonnement de l'antenne sur	24
Figure 3.4 Relai pont aérien.....	25
Figure 3.5 Recherche de la position optimale.....	26
Figure 3.6 Distribution spatiale de la puissance du signal selon Winner II.....	28
Figure 3.7 Dynamique de la position optimale avec des antennes directives.....	30
Figure 3.8 Relai mât aérien.....	31
Figure 3.9 Patron de rayonnement suivant le plan azimut.....	33
Figure 3.10 Patron de rayonnement suivant le plan d'élévation.....	33
Figure 4.1 Trajectoires des camions et du drone pour le scénario 1	38
Figure 4.2 Résultats des simulations pour le scénario 1 (pont aérien).....	39
Figure 4.3 Résultats des simulations pour le scénario 1 (mât aérien).....	40

Figure 4.4	Trajectoires des camions et du drone pour le scénario 2.....	42
Figure 4.5	Résultats des simulations pour le scénario 2 (pont aérien).....	43
Figure 4.6	Résultats des simulations pour le scénario 2 (mât aérien).....	44
Figure 4.7	Trajectoires des camions et du drone pour le scénario 3.....	45
Figure 4.8	Résultats des simulations pour le scénario 3 (pont aérien).....	46
Figure 4.9	Résultats des simulations pour le scénario 3 (mât aérien).....	47
Figure 4.10	Statistiques des puissances	48
Figure 4.11	Statistiques des distances.....	49

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

BS	Base Station
ESC	Extremum Seeking Control
GPS	Global Positioning System
ISM	Industrial, Scientific and Medical radio bands
ITU	International Telecommunication Union
LOS	Line-Of-Sight
MS	Mobile Station
NLOS	Non Line-Of-Sight
PL	Path Loss
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
WINNER	Wireless World Initiative New Radio
WPAN	Wireless Personal Area Network

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE MESURE

dB	décibel
dBm	décibel par rapport à 1mW
GHZ	gigahertz
h	heure
Hz	hertz
km	kilometre
m	mètre
MHz	mégahertz
min	minute
m/s	mètre par seconde
rad	radian
s	seconde
W	Watt

INTRODUCTION

Actuellement, les UAV (Unmanned Aerial Vehicle) appelés aussi drones ont considérablement attiré l'attention de plusieurs applications notamment dans le domaine des télécommunications. Une grande tendance vers l'emploi des relais de drone dans les réseaux de télécommunications est, en effet, due aux avantages que cette technique offre dans des cas particuliers où on désire étendre la couverture avec un déploiement très rapide en créant un relai entre plusieurs nœuds distants et séparés par divers obstacles.

Ainsi, et dans le but de remédier aux problèmes de portée radio dans les systèmes de communication sans-fil véhicule-à-véhicule, les relais aériens peuvent être utilisés. Ceux-ci permettent d'étendre cette portée de communication et de résoudre certains problèmes de NLOS engendrant une perte de communication ou une mauvaise réception du signal radio à partir des nœuds mobiles au sol.

Dans cette perspective, l'objectif du projet serait de déployer un drone comme un relai de communication entre deux nœuds mobiles au sol avec des conditions de non-line-of-sight (NLOS) pour assurer la continuité de la communication et garantir une qualité de service acceptable dans un environnement urbain.

Parmi les contraintes rencontrées, on note l'absence d'un signal GPS stable pouvant donner une information de localisation précise du drone et des véhicules terrestres. Par conséquent, notre drone doit naviguer de manière autonome sans aucune connaissance des positions des nœuds mobiles au sol et en utilisant uniquement l'information disponible à partir des mesures de puissance de signal reçu. Le contrôle du drone dans le cadre de ces contraintes reste un problème ouvert. Toutefois, avant d'aborder les questions de navigation et de contrôle qui ne font pas l'objet de ce mémoire, il est important d'examiner et de comparer les avantages et les inconvénients des différentes stratégies d'exploitation et les configurations possibles afin que notre étude soit bien menée. Cela va nous aider à choisir le scénario avec le meilleur

compromis entre la continuité de la communication et la qualité de service d'une part, et la complexité du contrôle requis par les algorithmes de navigation d'autre part. Ainsi, deux stratégies possibles de relai aérien sont proposées et comparées dans le présent mémoire.

La première stratégie est dite pont aérien où un drone autonome est placé entre les deux nœuds du sol à une hauteur déterminée. Ce relai aérien vise à suivre à tout moment une position optimale à partir de laquelle il reçoit le meilleur signal possible à partir des deux nœuds terrestres. Dans un environnement d'espace libre avec LOS (line-of-sight) pour les deux liens, cette position optimale serait le centre géométrique entre les nœuds du sol.

La seconde stratégie est le mât aérien où, comme son nom l'indique, le drone est placé directement au-dessus de l'un des nœuds du sol et le suit en permanence afin de maintenir la communication avec l'autre nœud terrestre. Cette stratégie est proposée comme une solution pour réduire la dynamique de la position optimale que le drone essaie de rejoindre afin de conserver une qualité de signal acceptable lui permettant de communiquer avec les deux mobiles. En effet, cette dynamique est engendrée surtout par la directivité des antennes des mobiles au sol.

Voici une présentation du contenu de ce mémoire :

Le chapitre 1 présente le contexte global dans lequel s'inscrit notre travail. Il définit et présente également d'une manière générale le relai aérien, ses caractéristiques et principaux champs d'application ainsi qu'un survol sur les éléments clés avec lesquels il interagit.

Le chapitre 2 aborde une étude de quelques modèles de propagation dont le modèle de Winner II sur lequel se base notre étude de relai.

Le chapitre 3 présente les différents scénarios proposés afin de simuler notre relai dans des conditions assez réalistes ainsi que les méthodes de positionnement adoptées.

Le chapitre 4 contient les principaux résultats de simulation et les conclusions qui en étaient tirées.

CHAPITRE 1

PRÉSENTATION DU RELAI DE COMMUNICATION AÉRIEN

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, on donne tout d'abord une mise en contexte générale de l'étude effectuée et présentée dans ce mémoire. La notion de relai de communication et en particulier le relai aérien est ensuite défini. L'architecture générale d'un relai aérien est également présentée en définissant les éléments essentiels pour la mise en place d'un relai aérien. Quelques exemples de champs d'application sont, par la suite, cités afin de mettre en évidence l'importance de ce type de plateforme de communication. Enfin, la problématique de positionnement du relai aérien est évoquée afin d'introduire la démarche suivie dans notre étude.

1.2 Mise en contexte

En effet, le travail effectué dans le cadre du présent mémoire s'inscrit dans le cadre d'un projet d'équipe appelé « Launch & Forget » en partenariat avec Ultra Electronics TCS. L'objectif de ce projet est de créer un drone entièrement autonome permettant de prendre automatiquement le relai radio entre deux nœuds radios mobiles dont la qualité de la liaison de communication devient mauvaise.

Le projet global comporte trois volets principaux :

1.2.1 La modélisation du drone

L'objectif de ce volet est de réaliser un modèle réaliste d'un drone commercial pour les simulations et le développement des algorithmes de contrôle. Ceci, en acquérant les paramètres de vol (force de poussée des moteurs, masse du drone, inertie du châssis, inertie des moteurs, etc.) et en intégrant les données correspondantes au simulateur. Les résultats

obtenus permettront ensuite d'identifier les spécifications à considérer lors du choix du drone.

1.2.2 Les algorithmes de contrôle

Cette partie du projet vise le développement d'un système de contrôle pour répondre adéquatement au scénario et aux objectifs du projet, soit le positionnement autonome du drone en fonction des caractéristiques mesurées des liaisons radios entre le drone et les émetteurs radios montés sur les véhicules. Ceci nécessite un ajustement et une optimisation des algorithmes de contrôle selon les scénarios et les paramètres du drone.

1.2.3 Modélisation du canal : volet communication

En effet, cette partie du projet représente l'objet de notre étude. La démarche générale se base sur la conception d'un simulateur permettant d'obtenir les puissances reçues à un point donné de l'espace. La structure et les paramètres de simulation doivent permettre facilement de construire un scénario complet où les deux véhicules peuvent se déplacer dans l'espace selon les trois degrés de liberté (X,Y,Z) en imitant le comportement réaliste d'une voiture dont la vitesse est variable dans le temps. Dans le calcul des puissances, les positions des antennes et leurs patrons de rayonnement doivent être pris en compte.

D'autre part, une étude des différents modèles de propagation existants dans la littérature doit être effectuée afin d'identifier le modèle le plus approprié au contexte du projet et de l'intégrer au simulateur. Ensuite, une stratégie de positionnement du drone doit être adoptée en fonction des résultats fournis par le simulateur.

1.3 Définition du relai aérien

Un relai de communication peut être défini comme une station qui transmet des messages d'une station à une autre ou entre plusieurs stations, de manière à faciliter les communications entre ces unités. Ces relais sont utilisés pour étendre la portée de

communication en répétant des signaux radio. Il existe plusieurs façons d'établir un relai de communication, et l'une de ces techniques est le relai aérien en utilisant des avions, des satellites ou des drones. Ce dernier type de relai, offre plus de flexibilité au niveau du déploiement et d'extensibilité. De plus, il permet de résoudre certains problèmes de communication qui sont engendrés par l'absence de la ligne de vue directe (LOS) entre deux stations radio. Ce relai aérien peut donc être très utile dans les régions montagneuses ou forestières où une communication directe est rendue difficile ou même, dans certains cas, impossible.

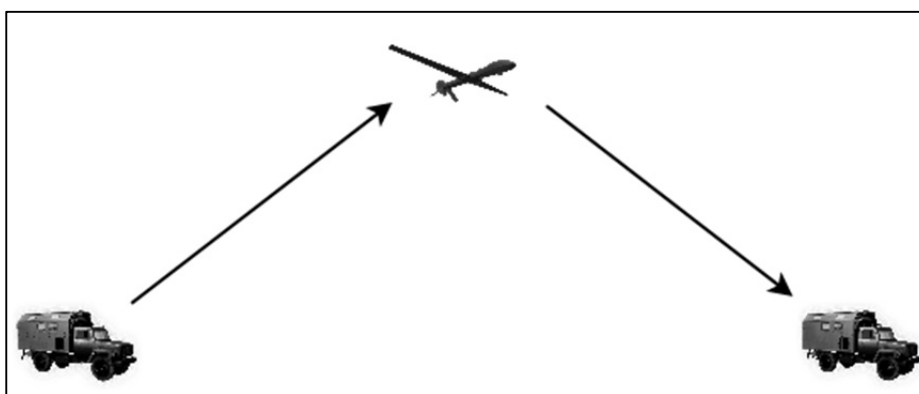


Figure 1.1 Relai aérien entre deux camions

1.4 Champs d'application

Aujourd'hui, les plateformes de drones sont utilisées pour assurer la fonction d'un relai de communication, et ceci, dans plusieurs applications et notamment celles qui sont utilisées dans des missions secrètes ou d'urgence où la communication entre les différentes entités représente un défi face aux conditions environnementales et à certaines circonstances difficiles. Ces circonstances peuvent être liées, par exemple, à des conditions d'urgence ou d'intervention dans le cadre de certaines missions.

1.4.1 Communication en environnement d'urgence

Un relai aérien peut être facilement mis en place dans un environnement d'urgence où, par exemple, on pourra remplacer un réseau cellulaire détruit par un désastre grâce à une communication assurée par un drone opérant comme une station de base alternative pouvant connecter les terminaux mobiles et même les localiser. Dans cette perspective, le relai aérien assure une fonction de sauvetage dans les circonstances les plus désastreuses et dangereuses.

1.4.2 Communication en mission

La nature de certains convois ou missions peut rendre impossible la communication à travers un réseau préétabli. Ceci pourrait être dû à des raisons de sécurité ou de difficulté d'accès. D'autre part, la plupart des réseaux personnels sans fils (WPAN) sont limités en portée. On peut, par conséquent, voir l'importance de la mise en place d'un relai aérien auquel se connectent les terminaux au cours de la mission. Une telle plateforme permettra aux terminaux mobiles de communiquer entre eux d'une manière plus sûre et avec une qualité de service acceptable.

1.5 Architecture d'un relai aérien

Avant d'entamer une étude détaillée du relai aérien, il est important de présenter son architecture. Ceci revient à définir ses différentes composantes (drone, antennes...) et les entités extérieures avec lesquelles il interagit.

1.5.1 Le drone

Le drone représente le support du relai aérien. Ce support se caractérise par une grande mobilité et une rapidité qui lui permettront de se positionner de façon à relier les nœuds au sol au cours de leur déplacement. Il existe plusieurs types de drones dont le quadrotor (figure

1.2) qui est très utilisé dans les études académiques grâce à son coût raisonnable et sa stabilité par rapport à d'autres types de drones.

L'altitude du drone consiste un élément très important dans la conception du relai aérien. En effet, le drone doit être suffisamment haut afin de surmonter tout type d'obstacle (édifice, arbre, montagne...). Cependant, certains types de drones sont limités en termes d'altitude maximale ou d'autonomie. Ceci revient à considérer une certaine limitation dans l'altitude considérée dans la simulation de notre relai aérien.

D'autre part, il est important de prendre compte de la nature autonome du relai aérien qui constitue l'une des spécifications du projet pour lequel on présente cette étude. En effet, lors de la conception du relai aérien, on doit penser à garder le drone à une altitude raisonnable afin de ne pas courir le risque de perte de communication résultant à un comportement inattendu du drone.

Après avoir pensé à toutes ces contraintes, y compris la hauteur maximale des édifices présents dans un milieu urbain de taille moyenne, on a proposé de fixer l'altitude du relai aérien à 200m. Ceci constitue une des contraintes à considérer lors du choix du modèle de propagation approprié.



Figure 1.2 Drone de type quadrotor

1.5.2 Antenne du drone

L'antenne fixée sur le drone permet de recevoir un signal radio provenant d'un terminal et de le retransmettre, par la suite, à un ou plusieurs terminaux. Cette antenne doit être omnidirectionnelle car on ne peut pas prévoir dans quelle direction se trouve les nœuds au sol surtout avec une mobilité du drone dans l'espace et la possibilité d'effectuer des rotations sur les trois axes. Ces axes sont représentés par la figure 1.3.

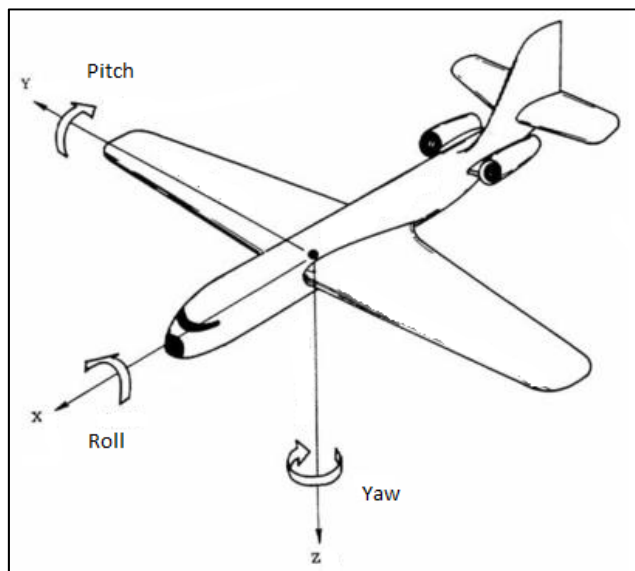


Figure 1.3 Angles d'inclinaison du drone

1.5.3 Antenne du mobile au sol

L'antenne fixée sur le mobile au sol, par exemple, sur un camion qui se déplace dans un milieu urbain peut être plus directive que l'antenne du drone. Ceci s'explique par le fait que ce véhicule terrestre est limité en mobilité et ne doit communiquer qu'à partir de demi-espace supérieur au plan sur lequel il se déplace. Toutefois, une certaine ouverture de l'antenne est toujours nécessaire puisque le camion peut changer de direction à tout moment.

1.6 Positionnement du relai aérien

Le positionnement du drone par rapport aux nœuds mobiles constitue une problématique dans la conception du relai aérien. D'une part, l'autonomie du drone doit être assurée en permanence tout en tenant compte de la mobilité des véhicules. D'autre part, le drone doit pouvoir se placer dans une position optimale afin de garder une qualité de service acceptable, et ceci, même sans avoir accès à un signal GPS lui permettant de connaître les emplacements des nœuds mobiles.

1.7 Conclusion

Ce premier chapitre a présenté le contexte général dans lequel s'inscrit notre étude de relai de communication aérien. Ceci nous permet d'une part de comprendre et de justifier la démarche suivie dans la réalisation de notre étude, et d'autre part de souligner l'importance du travail qui fait l'objet des prochains chapitres de ce mémoire. Une définition du relai aérien ainsi qu'une présentation de ses principaux champs d'application ont été fournies. La description de l'architecture globale du relai aérien a été également abordée dans ce chapitre.

CHAPITRE 2

MODÈLES DE PROPAGATION

2.1 Introduction

Ce chapitre présente quelques modèles de propagation tirés de la littérature afin d'envisager la possibilité de les adopter dans le cadre d'une communication air-sol. Une étude des caractéristiques de ces modèles nous permettra ensuite de discuter les avantages et les limites de chacun. Enfin, on décrit le choix le plus approprié en ce qui a trait au modèle retenu pour la réalisation des simulations de notre relai aérien. Cette décision s'est prise en fonction de la correspondance aux objectifs du projet en termes de conditions environnementales et d'exigences techniques.

2.2 Modèles de Rice et de Rayleigh

Un environnement de propagation est généralement riche d'obstacles affectant directement la transmission des ondes radio. Il existe plusieurs types d'obstacles dont les bâtiments, les montagnes, les arbres, la surface de la terre ou encore les conditions météorologiques comme la pluie et le brouillard. Ces obstacles engendrent souvent des diffractions, réflexions et réfractions des ondes électromagnétiques, ce qui induit une dégradation de la qualité du lien. Par conséquent, un canal de communication sera caractérisé par la propagation multitrajet dans l'espace et de leur reconstitution à la réception. Dans cette perspective, deux modèles de canaux ont été développés afin de modéliser ce phénomène de multitrajet: le canal de Rice et le canal de Rayleigh qui font l'objet de la présente section.

2.2.1 Modèle de Rice

Ce modèle définit un canal multitrajet, dit canal de Rice, dans lequel on considère la propagation d'une onde directe à laquelle s'ajoutent plusieurs ondes réfléchies.

Une expression de la réponse impulsionnelle $R(t)$ d'un tel type de canal aura donc la forme suivante (Proakis & Salehi, 2007):

$$R(t) = \delta(t) + \sum_{i=1}^N \alpha_i(t) \delta(t - \tau_i(t))$$

- $R(t)$: réponse impulsionnelle du canal de Rice;
- $\delta(t)$: amplitude du trajet direct normalisée à 1;
- N : nombre de composante réfléchies;
- α_i : amplitude du $i^{\text{ième}}$ trajet;
- τ_i : délai du $i^{\text{ième}}$ trajet.

L'enveloppe du spectre du signal reçu se caractérise par un comportement qui suit la loi de probabilité suivante dite de Rice :

$$P(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} e^{-(r^2+s^2)/2\sigma^2} I_0\left(\frac{rs}{\sigma^2}\right), & r \geq 0 \\ 0, & r < 0 \end{cases}$$

- $P(r)$: loi de Rice;
- r : amplitude du signal reçu;
- σ^2 : puissance moyenne des composantes de signal réfléchies;
- s^2 : puissance moyenne de la composante principale;
- I_0 : fonction de Bessel du 1^{er} ordre modifiée.

Le fait que le modèle néglige la dépendance statistique qui pourrait exister entre les paramètres de chacun des trajets considérés constitue une limite majeure de celui-ci.

2.2.2 Modèle de Rayleigh

Le modèle de Rayleigh repose sur une étude statistique modélisant les effets de l'environnement sur la propagation des ondes. Ce modèle pourrait être considéré comme un cas particulier du modèle de Rice après avoir omis la composante directe. Ainsi, le signal résultant serait une superposition des composantes réfléchies. Le canal de Rayleigh représente une modélisation des canaux radio en milieu urbain où on observe une dominance des composantes réfléchies du signal et une absence presque totale de la possibilité d'avoir un signal qui va directement de l'émetteur vers le récepteur.

Le signal résultant possède une enveloppe qui suit la loi stochastique suivante:

$$P(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} e^{-r^2/2\sigma^2}, & r \geq 0 \\ 0, & r < 0 \end{cases}$$

- r : amplitude du signal reçu;
- σ^2 : puissance moyenne des composantes de signal réfléchies.

Ainsi, le modèle de Rayleigh a les mêmes limites que le modèle de Rice puisqu'il n'est qu'un cas particulier de ce dernier. De plus, à ces limites s'ajoute dans notre cas le fait que ce modèle néglige la composante directe du signal qui est importante dans le cas d'une communication air-sol.

2.3 Le modèle de Olsen-Segal

Le modèle de Olsen-Segal est un modèle empirique (expérimental) dont l'objectif est de calculer la probabilité de coupure d'une liaison radio. Il a été récemment développé au centre de recherche des communications du Canada (CRC). Il tient compte d'un très

grand nombre d'expériences effectuées à travers le monde (23 pays). Des mesures ont donc été prises sur des liens terrestres avec une portée variant entre 10 et 140 km et des fréquences porteuses allant de 120 MHz à 37 GHz. Ce modèle prend en considération des perturbations atmosphériques ainsi que de la réflexion des ondes sur le sol.

La probabilité de perte de lien est estimée dans le cadre de ce modèle par la formule suivante (Proakis & Salehi, 2007):

$$P = Kd^{3.6}f^{0.89}(1 + 10^3|\varepsilon|)^{-1.4}F^{-1}$$

- P : probabilité de perte de lien;
- K : facteur géo climatique;
- d : distance (km);
- f : fréquence de la porteuse (GHz);
- ε : angle d'élévation du trajet (rad);
- F : marge d'évanouissement.

Cette formule empirique exprime la probabilité de perte de liaison radio pour une marge d'évanouissement égale à F . Notons que la formule ci-dessus n'est valide que pour un évanouissement assez élevé $F \geq 15 \text{ dB}$. La validité du modèle est également conditionnelle à une plage de fréquence telle que $120 \text{ MHz} \leq f \leq 37 \text{ GHz}$. De plus, des conditions sur la distance: $10 \text{ km} \leq d \leq 140 \text{ km}$, et sur l'angle d'élévation: $\varepsilon < 2^\circ$ doivent être respectées (Loyka, Kouki, & Gagnon, 2001).

Ce modèle donne une prédiction de la qualité de la liaison radio en fonction de l'angle d'élévation qui représente un facteur important pour les communications air-sol. Cependant le modèle est valide uniquement pour des angles d'élévation très faibles, alors que pour une telle liaison cet angle pourrait être plus élevé.

2.4 Modèle ITU-R pour lien satellitaire

On connaît ce modèle aussi sous le nom de "ITU-R Model for Earth-to-Space Path" (ITU-R Recommendation, 1999). Il a été principalement conçu pour les systèmes de communication satellitaire. Ce modèle est considéré ici puisque la communication air-sol est similaire à une communication satellitaire pour les aspects dispersifs sous le premier kilomètre d'atmosphère.

Un tel type de communication fait intervenir des fréquences porteuses de l'ordre du GHz. Par conséquent, la propagation du signal radio sera principalement affectée par des phénomènes de nature météorologique tels que la pluie, les nuages et le brouillard. La formule empirique du modèle permet de déterminer la marge maximale des évanouissements pouvant être observée en fonction d'une probabilité de perte du signal donnée. Une analyse approfondie des résultats publiés démontre que les évanouissements observés sont de l'ordre de 10 à 15 dB.

Parmi les limites importantes de ce modèle, on note le fait que les antennes utilisées dans les communications satellitaires sont très directionnelles. Par conséquent les composantes réfléchies du signal seraient négligées devant la composante directe. D'autre part, l'environnement de propagation dans le cadre de la communication satellitaire diffère de celui dans lequel un relai aérien est déployé. En effet le relai est placé à une altitude de quelques centaines de mètres, soit de 200m dans le cas de notre étude. Ce modèle n'est pas donc approprié pour notre problème.

2.5 Modèles WINNER II

WINNER II (Kyösti, et al., 2007) est la dernière version (celle de l'année 2007) du modèle de WINNER qui fut le fruit d'un projet élaboré par un groupe de chercheurs et présenté dans

le cadre de « Information Society Technologies ». C'est un modèle stochastique basé sur la géométrie du milieu de propagation.

Les paramètres du canal sont déterminés d'une manière stochastique en se basant sur les distributions statistiques résultantes des mesures effectuées sur le canal radio. La géométrie des antennes et leurs champs de rayonnement peuvent être définis proprement par l'utilisateur du modèle. Les réalisations du canal sont générées avec un principe géométrique en additionnant les contributions des rayons avec introduction de paramètres de courte échelle comme le délai, la puissance et les angles d'arrivée et de départ.

Contrairement à la plupart des modèles de propagation pour la communication radio cellulaire, le modèle de WINNER peut supporter une altitude de la station de base allant jusqu'à 1000m. Ceci a bien été testé et validé expérimentalement (Kyösti, et al., 2007). Ceci nous permet bien d'accepter ce modèle au niveau de l'altitude du relai envisagée (200m).

2.5.1 Scénarios proposés par WINNER II

Les scénarios proposés dans cette section ont été spécifiés selon les recommandations du projet WINNER. Ils sont développés selon les environnements et les conditions dans lesquelles les simulations WINNER ont été effectuées. Le tableau 2.1 résume l'ensemble des scénarios envisagés par le modèle et leurs paramètres correspondants tels que la définition de l'environnement cible, le mode de visibilité, la mobilité, la plage de fréquence supportée et la portée radio. En effet, il existe deux faits à comprendre à propos des scénarios et des modèles de canaux correspondants :

1. Les scénarios abordent quelques situations typiques et ne sont pas aptes à représenter tous les environnements et les conditions possibles (par exemple, le cas des régions rurales montagneuses n'a pas été traité). La hauteur des antennes ne peut pas être également traitée avec toutes les possibilités. Et généralement, les environnements traités dans le

projet WINNER peuvent correspondre à des milieux urbains de certains pays de l'Europe ou de l'Amérique du Nord;

2. Les scénarios peuvent être classés en deux catégories : la première est celle où la plupart des scénarios utilisent une façon habituelle pour placer l'émetteur et le récepteur. Ainsi, le seul paramètre de localisation sera la distance entre l'émetteur et le récepteur. La deuxième catégorie tient compte de l'architecture des édifices et des rues. Dans ce cas, l'émetteur et le récepteur peuvent être localisés par des coordonnées cartésiennes. Cette dernière catégorie inclue les scénarios A1, A2, B1, B2 et B4. Les autres scénarios appartiennent évidemment à la première catégorie.

Tableau 2.1 Scénarios proposés par WINNER II

Scénario	Définition	Visibilité	Mobilité (km/h)	Fréquence (GHz)	Nature du réseau	Note
A1	Intérieur / résidentiel	LOS/ NLOS	0 à 5	2 à 6	Local	
A2	Intérieur à extérieur	NLOS	0 à 5	2 à 6	Local	Point d'accès interne. Mobile externe en milieu urbain
B1	Micro-cellule urbaine typique	LOS NLOS	0 à 70	2 à 6	Local, Métropolitain	
B2	Mauvaise micro-cellule	NLOS	0 à 70	2 à 6	Métropolitain	Même que B1 + longs délais
B3	Large espace intérieur	LOS/ NLOS	0 à 5	2 à 6	Local	
B4	Extérieur à intérieur	NLOS	0 à 5	2 à 6	Métropolitain	

Scénario	Définition	Visibilité	Mobilité (km/h)	Fré- quence	Nature du réseau	Note
C1	Sous-urbain	LOS/ NLOS	0–120	2 à 6	Étendu	
C2	Macro-cellule urbaine	LOS/ NLOS	0–120	2 à 6	Métropolitain , Étendu	
C3	Mauvaise micro-cellule	NLOS	0–70	2 à 6	-	Même que C2 + longs
C4	Extérieur à intérieur	NLOS	0-5	2 à 6	Métropolitain	
D1	Macro-cellule en milieu rural	LOS/ NLOS	0–200	2 à 6	Étendu	
D2	Réseaux mobiles: BS - MRS,	LOS	0 –350	2 à 6	Étendu	Très grande variabilité
	Réseaux mobiles: MRS - MS, milieu rural	LOS / OLOS/ NLOS	0 – 5	2 à 6	Local	Même que A1 NLOS

2.5.2 Modélisation de l'affaiblissement

WINNER développe pour chacun des scénarios proposés une modélisation de l'affaiblissement du signal radio en se basant non seulement sur les résultats des mesures effectués dans le cadre du modèle, mais aussi des résultats extraits de la littérature ouverte. Une expression générale de la perte due à la propagation (path loss) est donnée par l'équation suivante (Kyösti, et al., 2007):

$$PL = A \log_{10}(d) + B + C \log_{10}(f_c/5) + X$$

Cette modélisation est applicable pour des fréquences comprises entre 2 et 6GHz, et ceci, indépendamment des hauteurs des antennes. Ainsi, par exemple, la perte due à la propagation en espace libre serait un cas particulier de l'expression ci-dessus. En effet il suffit de considérer $A = 20$, $B = 46.4$, $C = 20$ et $X = 0$.

$$PL_{free} = 20\log_{10}(d) + 46.4 + 20\log_{10}(f_c/5)$$

Le tableau A I-1 (Annexe I) expose une description détaillée des modèles de path loss relatifs à chacun des scénarios proposés dans le cadre de WINNER. Cette modélisation tient compte du facteur de visibilité entre l'émetteur et le récepteur.

2.6 Conclusion

Les modèles de propagation ont été développés essentiellement dans l'objectif de modéliser l'effet des différents phénomènes physiques qui sont responsables de l'affaiblissement du signal radio: la propagation multitrajet due surtout aux réflexions, les conditions environnementales et météorologiques, etc. Une analyse critique des caractéristiques de ces modèles de propagation empiriques et statistiques nous a permis de conclure que le milieu de propagation représente un facteur d'importance cruciale pour la modélisation du canal de propagation. Ainsi, aucun de ces modèles : Rice, Rayleigh, Olsen-Segal ainsi que le modèle de communication satellitaire de ITU, ne peut être retenu pour la simulation de notre relai aérien.

Premièrement, ces modèles sont applicables à des communications terrestres et spatiales respectivement. Deuxièmement, le patron d'ouverture des antennes utilisées dans les communications terrestres (quelques degrés) ainsi que celui des antennes mises en place pour servir des communications satellitaires est nettement inférieur à l'ouverture d'antenne exigée pour notre relai aérien. Troisièmement, le modèle Olsen-Segal est limité à des trajets d'élévation de quelques degrés, ce qui est inférieur aux exigences d'une liaison

aérienne. Quatrièmement, certains de ces modèles négligent les réflexions (modèle satellitaire) et d'autres ne considèrent que les ondes réfléchies (canal de Rayleigh). Finalement, les modèles de WINNER II semblent modéliser la propagation des ondes d'une façon plus réaliste tout en donnant une multitude de scénarios possibles avec une liberté de choix aussi bien pour les antennes que pour les fréquences de porteuse. Par conséquent, les équations de WINNER II sont les plus appropriées pour évaluer les performances de notre relai aérien.

CHAPITRE 3

SIMULATION DU RELAI AÉRIEN

3.1 Introduction

Ce chapitre fournit une description détaillée du relai aérien et présente l'ensemble des paramètres proposés selon les spécifications du projet. Ces paramètres permettent de modéliser l'environnement cible et le comportement de chacune des composantes du relai de façon réaliste. Ensuite, une simulation sur Matlab nous permet de visualiser le comportement du signal transmis par le relai en temps réel pour un scénario de pont aérien. Ceci permet d'identifier les problèmes éventuels pouvant être rencontrés après le déploiement du relai. Enfin, des solutions seront proposées dans le but de parvenir à un scénario de relai permettant la bonne transmission du signal de l'émetteur jusqu'au récepteur.

3.2 Description de l'environnement

On rappelle que l'objectif du projet consiste à déployer un drone comme un relai de communication entre deux nœuds mobiles au sol. Ainsi, une importance sera accordée à l'environnement où l'on propose de réaliser ce relai. La géométrie du milieu et la manière dont les mobiles au sol se déplacent consistent deux éléments essentiels à définir avant de discuter les caractéristiques du relai.

3.2.1 Géométrie du milieu

L'absence d'une ligne de vue directe (LOS) entre l'émetteur et le récepteur constitue la motivation première pour la conception d'un relai aérien. Cette situation se présente souvent dans les régions montagneuses et dans les milieux urbains où les édifices ont des hauteurs importantes. Dans cette perspective, le milieu urbain a été choisi comme environnement de simulation pour notre relai.

3.2.2 Mobilité

Le déplacement des mobiles au sol s'effectue à l'aide de camions avec une vitesse variant entre 0 et 50km/h ce qui représente une marge réaliste pour des déplacements en milieu urbain. Les trajectoires suivies par les camions correspondent à une cartographie bien définie à l'aide de Google Maps. La figure 3.1 représente une vue de dessus sur les trajectoires suivies par les camions et la trajectoire résultante du drone.

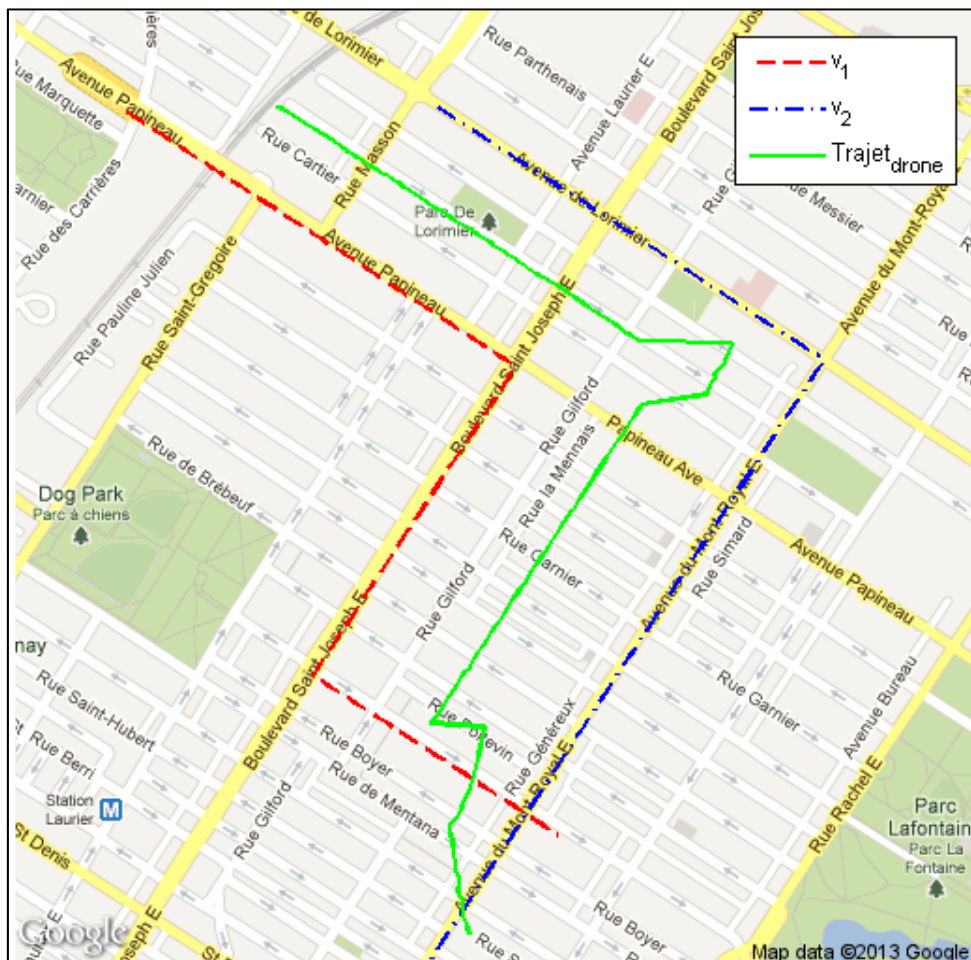


Figure 3.1 Trajectoires des camions et du drone sur la carte de Google Maps

3.3 Caractéristiques du relai aérien

Le relai aérien est défini par un ensemble de caractéristiques et de composantes matérielles qui sont choisies en fonction de l'environnement, de la géométrie du milieu et de la mobilité des véhicules.

3.3.1 Antennes et fréquence de porteuse

L'antenne des mobiles au sol choisie pour effectuer un premier test possède un diagramme de rayonnement illustré aux figures 3.2 et 3.3 ainsi que les caractéristiques et la configuration suivantes (Stella Doradus, 2012):

- gain: 9dBi ;
- ouverture à 3dB: 75° x 50°;
- bande passante: 2.4 à 2.485 Ghz ;
- inclinaison verticale : 90°;
- puissance de transmission: 50 dBm.

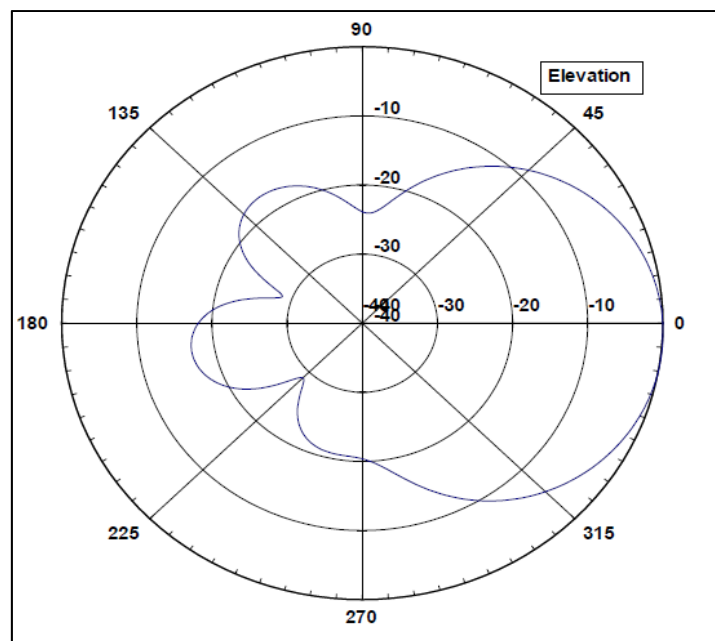


Figure 3.2 Patron de rayonnement de l'antenne sur le plan d'élévation

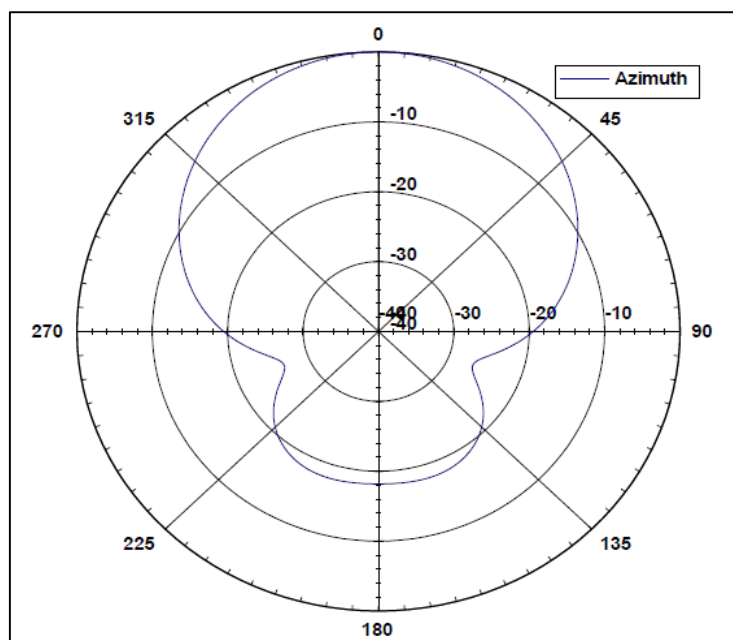


Figure 3.3 Patron de rayonnement de l'antenne sur le plan azimuth

D'autre part, et pour des raisons de simplification, on supposera que le drone possède une antenne omnidirectionnelle parfaite ($\text{gain}=0$). La fréquence de la porteuse sera fixée à 2.4 GHz. Cette fréquence appartient bien à la bande ISM et convient donc à une utilisation sans avoir besoin d'une autorisation particulière.

3.3.2 Comportement du drone : Pont aérien

Selon une stratégie de relai proposée qu'on appelle pont aérien, notre drone est placé entre les deux nœuds au sol à une hauteur déterminée comme le montre la figure 3.4. Le relai suivra donc une position optimale où il pourrait recevoir la meilleure puissance de signal en provenance des deux nœuds mobiles au sol. En effet, cette position est différente du milieu géométrique des deux nœuds au sol à cause de la variation des directions des antennes.

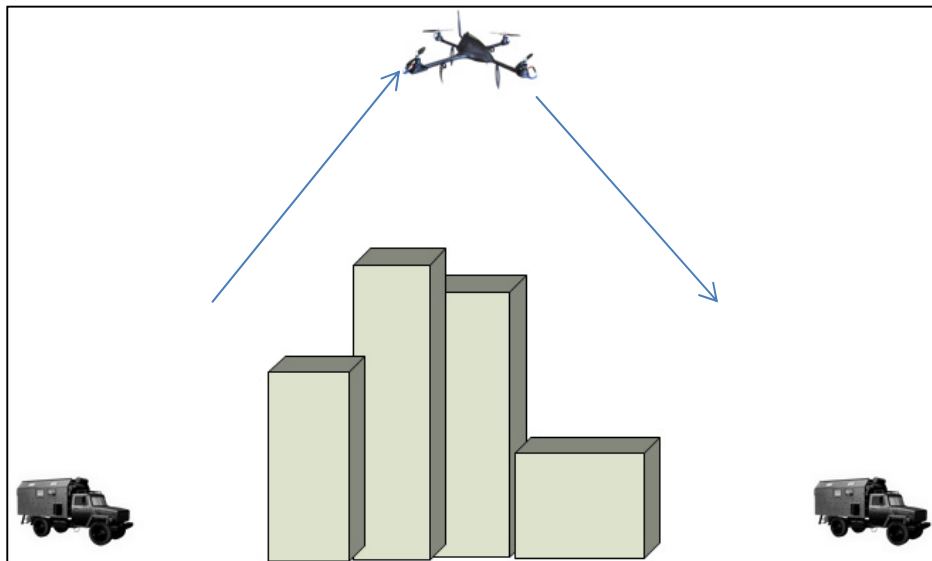


Figure 3.4 Relai pont aérien

3.3.3 Algorithme de recherche de la position optimale

Afin de simplifier le problème sans perte majeure de performances, on supposera que le drone essaie de joindre une position où il recevra les signaux transmis des deux camions avec une différence des puissances maximales reçues inférieure à 3dB. Notre algorithme de recherche du point optimal se base sur le fait que cette position optimale doit être très proche du milieu géométrique des camions considéré comme point de départ. Pour ceci, on propose une méthode de recherche parcourant les possibilités de positionnement du relai en spirale centrée par le milieu des deux nœuds mobiles à l'instant considéré. La spirale est de forme elliptique (figure 3.5) dont la longueur du petit axe et du grand axe dépendent des positions des nœuds mobiles V1 et V2.

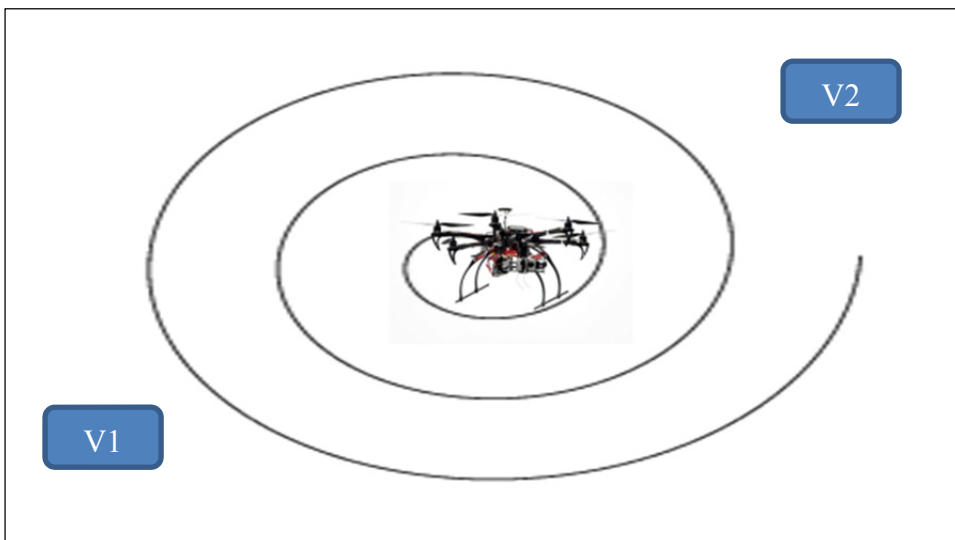


Figure 3.5 Recherche de la position optimale

3.3.4 Modélisation du lien selon Winner II

Winner II propose une modélisation mathématique à travers des équations de « path loss » pour plusieurs types d'environnement de propagation décrit par le terme «scenario» selon la

terminologie du modèle (Kyösti, et al., 2007). Le «scenario» ainsi choisi pour nos simulations est C2 (propagation en macro-cellule urbaine typique). Ce choix correspondra aux caractéristiques de notre environnement cible et aux exigences de mobilité des nœuds terrestres (Tableau 2.1).

Dans le cadre de ce modèle, et en particulier du scénario C2, la modélisation du « path loss » distingue deux cas différents : celui du LOS et celui du NLOS (Kyösti, et al., 2007):

$$PL_{LOS}[dB]=40 \log_{10}(d)+13.47-14 \log_{10}(h_{BS})-14 \log_{10}(h_m)+6 \log_{10}(f/5)$$

$$PL_{NLOS}[dB]=[44.9-6.55 \log_{10}(h_{BS})] \log_{10}(d)+34.46+5.83 \log_{10}(h_{BS})+23 \log_{10}(f/5)$$

- d : distance entre l'émetteur et le récepteur (entre le drone et le camion);
- h_{BS} : hauteur de la station de base (altitude du drone);
- h_m : hauteur de l'antenne du mobile au sol (en dessus du camion);
- f : fréquence de la porteuse.

Ainsi, la puissance du signal reçu par le drone sera exprimée en fonction des gains de l'émetteur (G_t) et du récepteur (G_r) sous la forme suivante :

$$P_r[dBm]=P_t+G_t+G_r-PL$$

- P_t : puissance transmise;
- PL : «path loss» (PL_{LOS} ou PL_{NLOS} selon le mode de visibilité).

La distribution spatiale des deux puissances est représentée à la figure 3.5, et ceci, pour $h_{BS}=200m$, $h_m=2m$ et deux camions aux positions (1750,1600) et (4000,2750).

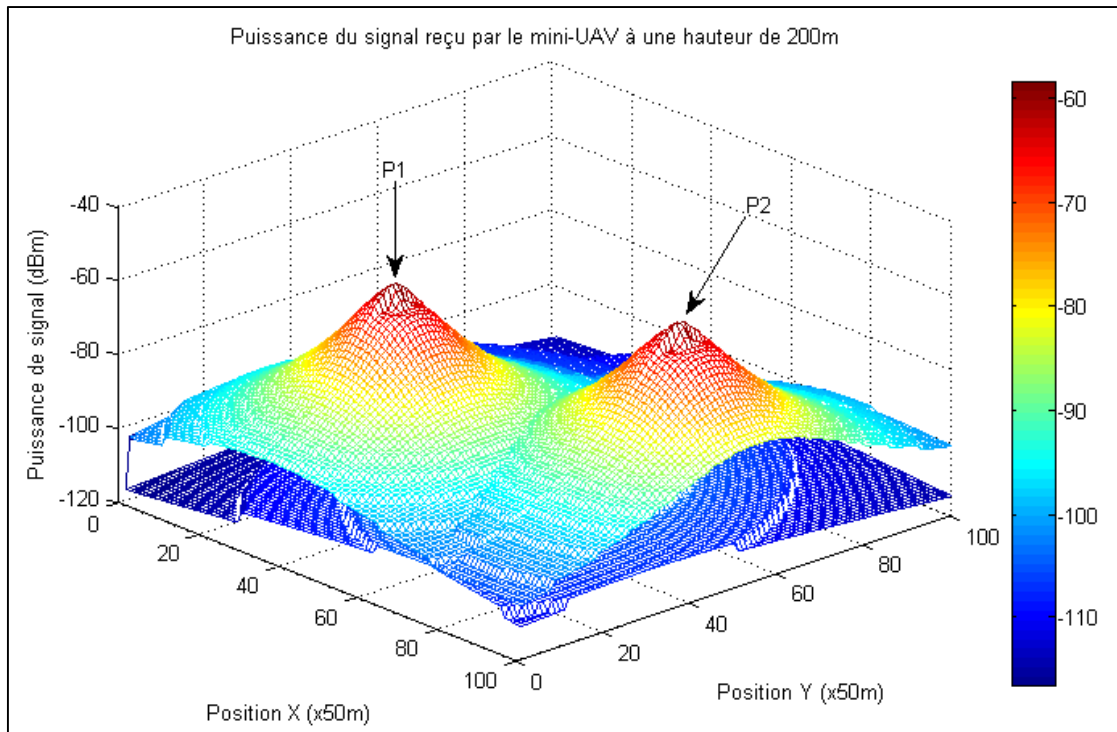


Figure 3.6 Distribution spatiale de la puissance du signal selon Winner II

3.4 Problèmes rencontrés

La simulation du scénario décrit dans ce chapitre a été effectuée à l'aide de Matlab. La modélisation proposée se base sur les vecteurs temps-position de chacune des entités constituant le relai (les camions et le drone). Les trajectoires des camions ont été définies de manière aléatoire laissant ainsi le drone à la recherche d'un point optimal où il peut recevoir la meilleure qualité de signal des deux camions. L'altitude du drone a été supposée fixée à 200m avec une légère variation de 1m autour de cette altitude afin d'améliorer le réalisme des simulations. Les résultats de la simulation nous ont permis d'identifier quelques problèmes liés aux choix des antennes et à la mobilité des nœuds au sol.

3.4.1 Directivité des antennes associées aux nœuds mobiles

En effet, la simulation nous confirme que le choix des antennes directives pour les nœuds au sol pourrait avoir un impact négatif sur le comportement du drone. En essayant d'améliorer le gain et peut être la portée des liens radio, la dynamique de la position optimale que le drone devrait suivre devient problématique. En particulier, notre relai aérien devra se comporter d'une manière non réaliste afin de suivre cette position optimale qui dépend surtout de la direction selon laquelle les antennes des nœuds mobiles rayonnent avec un gain maximal.

La figure 3.7 représente les positions relatives des camions (V1 et V1) et du drone (UAV) suite à l'utilisation des antennes ayant un gain de 9dBi (figures 3.2 et 3.3). Ces positions sont identifiées par des points avec des pas à la seconde sur le plan horizontal (X,Y). On constate ainsi l'existence d'une grande variation de la position théorique optimale que le drone doit suivre. Cette variation atteint à un certain instant les 50m. Ce qui implique que le drone doit se déplacer à une vitesse de 50m/s afin de rejoindre cette nouvelle position optimale.

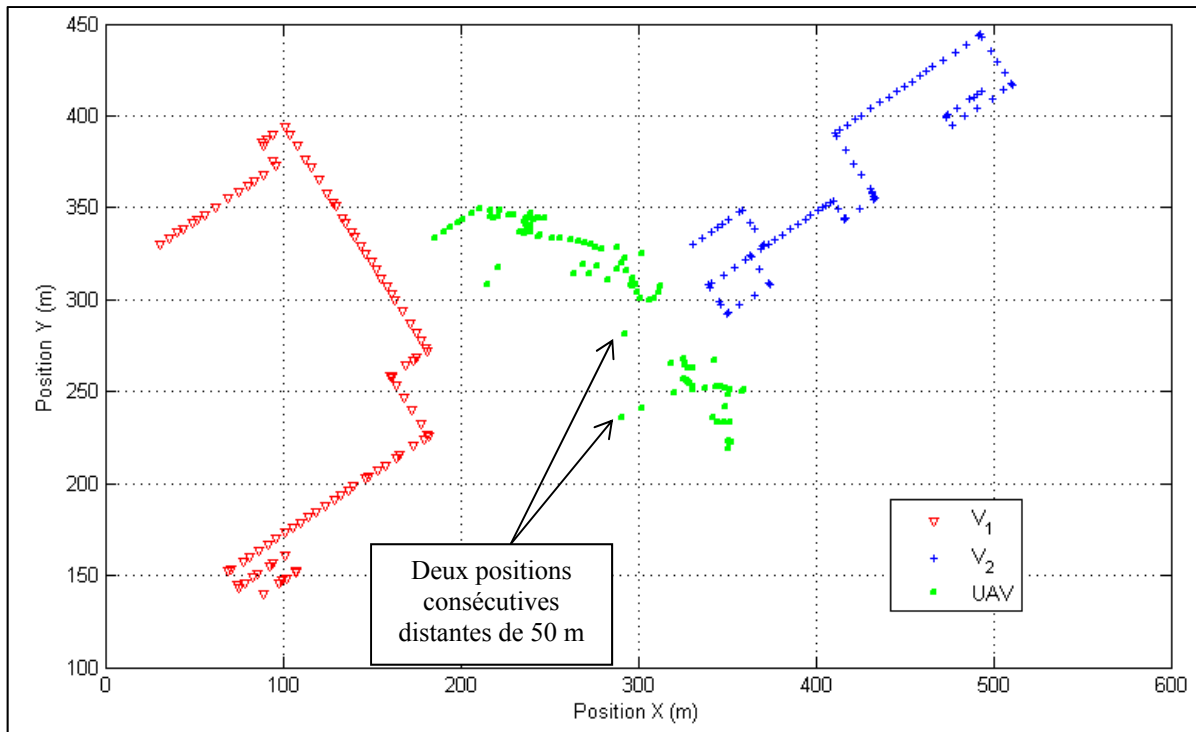


Figure 3.7 Dynamique de la position optimale avec des antennes directives

3.4.2 Comportements des nœuds mobiles

La manière dont les mobiles au sol se déplacent contribue d'une manière considérable dans la dynamique problématique de la position optimale. En effet, par exemple, un changement de direction d'un camion à une assez grande vitesse va non seulement engendrer un changement de direction de l'antenne, mais aussi une rapidité de déviation qui aura comme impact de déplacer la position optimale d'une grande distance dans un laps de temps très court. Toutefois, un tel changement de direction ne peut se qualifier comme comportement normal d'un véhicule en général.

3.5 Solutions proposées

Dans le but de réduire la mobilité du point optimal de réception de signal radio, on se propose, d'une part, d'adopter une nouvelle stratégie (dite mât aérien) pour le positionnement du drone par rapport aux participants au sol. D'autre part, on propose un choix d'antennes

plus adéquat à notre relai aérien qui se caractérise par une mobilité importante de chacune de ses composantes.

3.5.1 Mât aérien

Cette nouvelle stratégie vient comme remède aux problèmes rencontrés lors de la simulation du relai pont aérien. Elle consiste à positionner le drone en permanence au-dessus de l'un des nœuds mobiles au sol dans le but de maintenir la liaison avec le deuxième nœud (figure 3.8). Cette nouvelle configuration permet de réduire le risque de perte de communication avec les deux nœuds au sol en réduisant l'impact de la mobilité des camions sur la dynamique de la position optimale de réception de signal. D'autre part, une telle disposition du drone par rapport à un camion au sol permet un accès plus rapide et plus garanti à un point d'atterrissage dans le cas où l'autonomie de la batterie est dégradée. Par conséquent, la stratégie de mât aérien touchera non seulement à l'aspect communication mais aussi à la partie contrôle de navigation du drone.

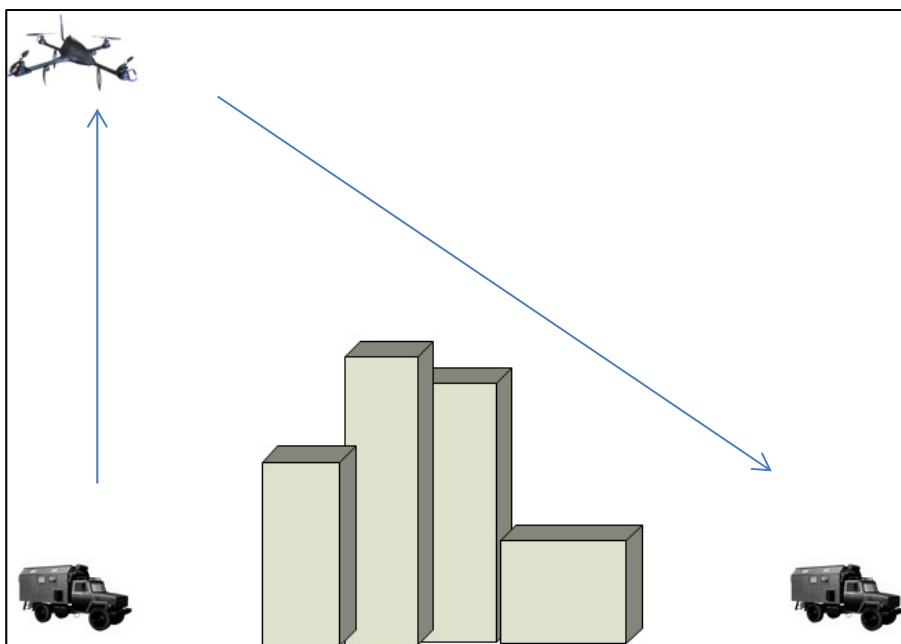


Figure 3.8 Relai mât aérien

3.5.2 Modification des antennes

Afin d'éviter les problèmes qu'on a déjà rencontrés dans la simulation du pont aérien, on se propose de changer les antennes des nœuds mobiles au sol par des antennes moins directives. Les antennes choisies peuvent se qualifier d'antennes omnidirectionnelles réelles. Elles sont caractérisées par la configuration suivante (Amphenol, 2009):

- gain: 2 dBi ;
- ouverture horizontale: 360°;
- bande passante: 1710 à 2700 Mhz ;
- puissance d'entrée: 100W (50 dBm) ;
- inclinaison verticale : 0°.

En effet, diriger l'antenne verticalement permet une meilleure réception de la part du relai aérien étant donné que la position relative de ce dernier par rapport au mobile au sol peut varier à n'importe quel moment. D'autre part, la puissance d'entrée choisie pour l'antenne correspond à la puissance maximale supportée par celle-ci selon les données fournies par le constructeur (Amphenol, 2009).

Le patron de rayonnement de cette antenne est représenté par les figures 3.9 et 3.10.

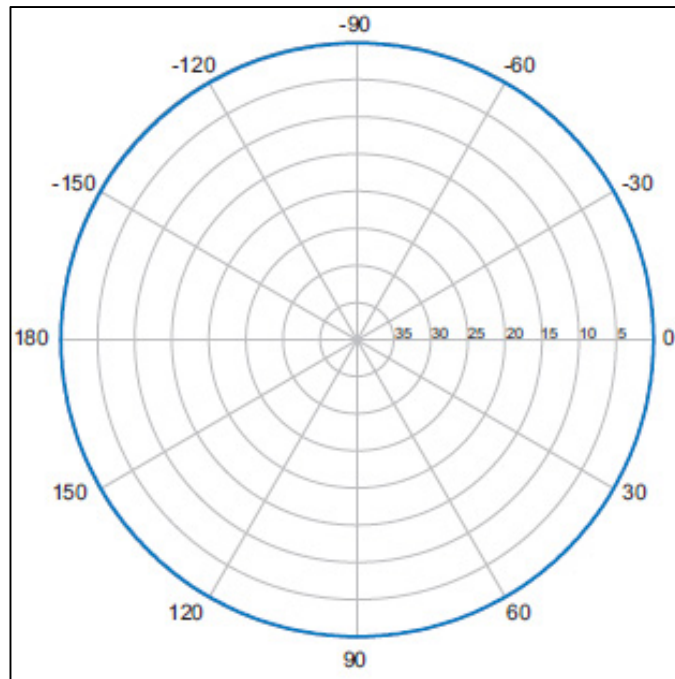


Figure 3.9 Patron de rayonnement suivant le plan azimut

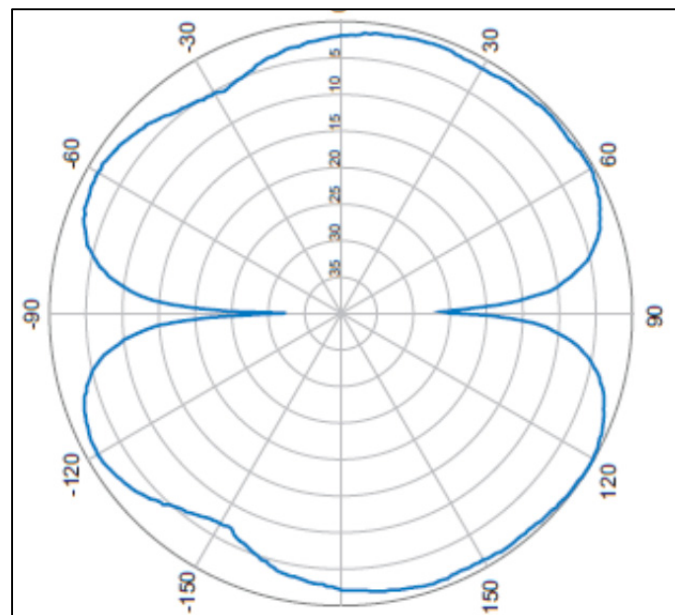


Figure 3.10 Patron de rayonnement suivant le plan d'élévation

3.6 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de paramétrer les différentes entités constituant le relai aérien ainsi que l'environnement dans lequel il est déployé (antennes, camions, drone, environnement de propagation...). Ceci nous permet de visualiser le comportement du signal transmis en fonction des paramètres d'entrée à travers une simulation sous Matlab, et ceci, pour une première stratégie dite pont aérien. Ainsi, on a eu l'avantage de prévoir certains problèmes qu'on pourrait rencontrer lors du déploiement du relai. Ces problèmes étaient surtout causés par la directivité des antennes choisies et la mobilité des participants au sol. Par conséquent, on a proposé quelques méthodes qui pourraient réduire l'impact de la mobilité des camions sur la dynamique de la position optimale de réception des deux nœuds au sol, et ceci, en jouant sur les antennes d'une part et sur la disposition du drone par rapport aux mobiles au sol d'autre part. L'évaluation des performances et la comparaison de ces stratégies feront l'objet du quatrième chapitre du présent mémoire.

CHAPITRE 4

SIMULATION ET COMPARAISON DES STRATÉGIES : PONT AÉRIEN VS MÂT AÉRIEN

4.1 Introduction

Ce chapitre présente les simulations effectuées dans le but d'évaluer chacune des stratégies proposées pour le relai aérien (pont aérien et mât aérien). Après une description générale des scénarios proposés et de l'environnement de mesure, les résultats des simulations sont illustrés graphiquement selon des scénarios différents. Ensuite, une analyse temporelle et statistique des performances du relai permet de discuter les avantages et les inconvénients de chaque stratégie selon des métriques bien définies.

4.2 Description des scénarios de simulation

Les simulations proposées tiennent compte des hypothèses annoncées au chapitre 3. Ces hypothèses consistent essentiellement dans le choix du modèle de propagation et des caractéristiques de chacune des composantes du relai aérien (antennes, comportement du drone et des camions...). Le tableau 4.1 fournit un rappel des paramètres mis en jeu pour chacune des stratégies de relai proposées (pont aérien et mât aérien) en introduisant une brève description de chaque hypothèse considérée pour les simulations effectuées.

On rappelle que la stratégie de pont aérien consiste dans le positionnement du drone qui essaie toujours de garder une position intermédiaire entre les deux mobiles au sol. Cette position est supposée optimale dans le cas où l'on reçoit des puissances de signal des deux camions reliés au sol avec une différence inférieure à 3dB tout en demeurant le plus proche de leur milieu géométrique. D'autre part, pour la stratégie du mât aérien, le drone suit l'un des nœuds au sol en permanence (à l'aide d'un capteur) tout en gardant une altitude fixe à définir en fonction de l'environnement de simulation cible.

Tableau 4.1 Paramètres et hypothèses de simulation

Stratégie Paramètre	Pont aérien	Mât aérien
Modèle de propagation	<p>Winner II, scénario C2 (propagation en macro-cellule urbaine)</p> <p>Visibilité : NLOS</p> $PL_{NLOS}[dB] = \left[44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{BS}) \right] \log_{10}(d) + 34.46 + 5.83 \log_{10}(h_{BS}) + 23 \log_{10}(f/5)$	<p>Pour la liaison impliquant le nœud terrestre suivi par le drone, on considère le modèle de perte due à la propagation en espace libre, <i>free space loss</i> :</p> $PL_{free}[dB] = 20 \log_{10}(d) + 46.4 + 20 \log_{10}(f/5)$ <p>L'autre liaison est modélisée comme le cas du pont aérien.</p>
Fréquence de porteuse	2.4 GHz	
Antenne du drone	Omnidirectionnelle	
Comportement du drone	Le drone essaye de garder une position intermédiaire optimale à une altitude fixe de 200m.	Le drone suit l'un des nœuds au sol en permanence (à l'aide d'un capteur) tout en gardant une altitude fixe de 200m.
Antennes des nœuds au sol	<p>Gain: 2dBi</p> <p>Ouverture horizontale: 360°</p> <p>Bande passante: 1710 à 2700 Mhz</p> <p>Puissance d'entrée: 50 dBm</p> <p>Inclinaison verticale : 0°</p>	
Comportement des camions (nœuds au sol)	<p>Vitesse : variant de 0 à 50 km/h</p> <p>Trajectoire : suit les rues d'une carte avec une manière aléatoire</p> <p>Condition sur le changement de direction : vitesse inférieure à 10 km/h</p>	

Les résultats de simulation auxquels on s'intéresse dans le but d'évaluer les performances de chaque stratégie sont la variation de la puissance du signal reçu par le relai aérien ainsi que la variation des distances relatives entre le drone et les nœuds mobiles au sol.

La distance mesurée la plus importante pour notre étude est appelée « distance d'atterrissage ». Elle est définie comme la distance séparant le drone et le nœud mobile (camion) le plus proche. Cette métrique s'avère très importante non seulement dans le cas où l'autonomie de la batterie du drone se dégrade, mais aussi dans le cas où la communication est perdue à travers le relai.

4.3 Simulation temporelle

Les simulations temporelles proposées couvrent une durée simulée de 10 minutes pendant laquelle les camions parcourent des trajectoires de forme réaliste par rapport à une cartographie donnée d'un milieu urbain. À chaque exécution d'une simulation temporaire on obtient un scénario constitué d'une trajectoire différente des camions et un comportement résultant différent du drone. Ce comportement dépend à la fois des trajectoires des camions et de la stratégie de relai adoptée (pont aérien ou mât aérien).

4.3.1 Scénario 1

Un premier scénario simulé pour une durée de 10 minutes donne les trajectoires représentées par la figure 4.1. Le trajet du drone représenté correspond au cas du pont aérien. Cependant, pour le cas du mât aérien, le drone suit la trajectoire du premier camion (V1). Cette représentation est commune à tous les scénarios proposés.

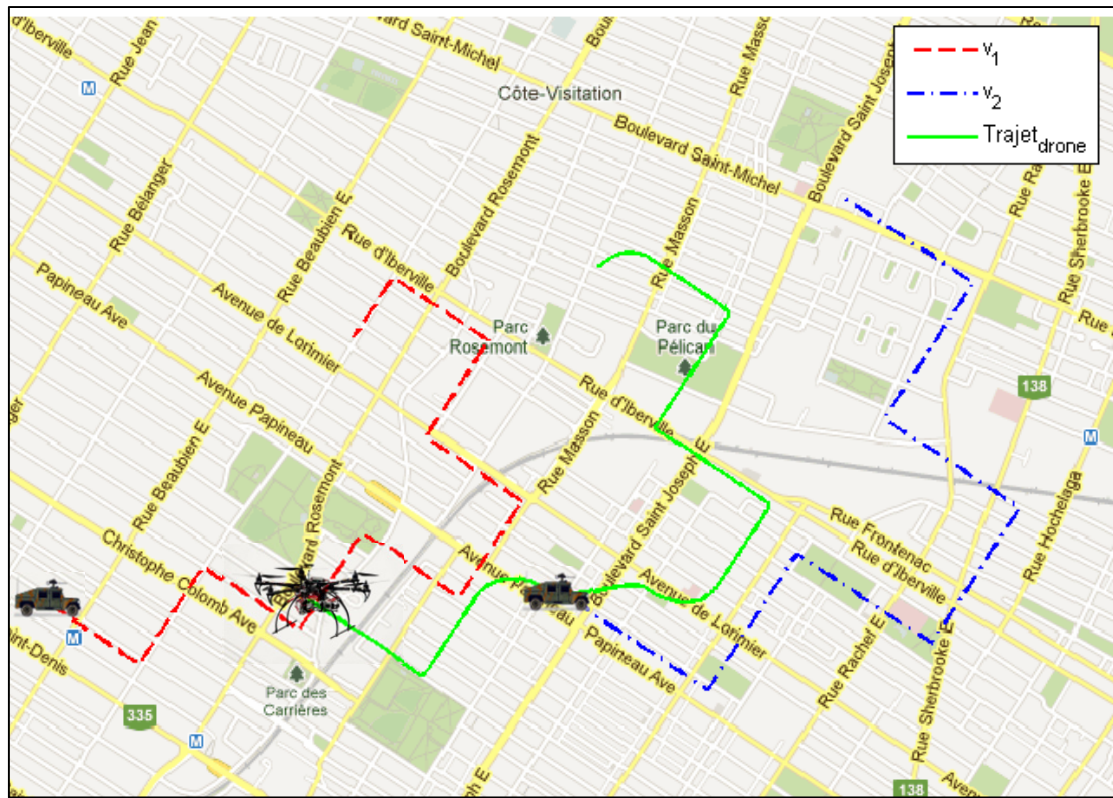


Figure 4.1 Trajectoires des camions et du drone pour le scénario 1

Contrairement aux résultats obtenus au chapitre 3 en utilisant des antennes directives pour les camions, on observe une trajectoire du drone plus réaliste. Le comportement des camions au moment de changement de direction joue aussi un rôle assez important dans cette constatation. En effet, un changement de direction de 90° à une vitesse assez faible permet au drone plus de temps pour retrouver sa nouvelle position optimale.

Les figures 4.2 et 4.3 représentent respectivement les résultats de simulation pour le cas du pont aérien ainsi que celui du mât aérien. La puissance de signal reçu par le drone en provenance de chacun des camions (P1 et P2) et les distances relatives entre les composantes du relai sont représentés en temps réel.

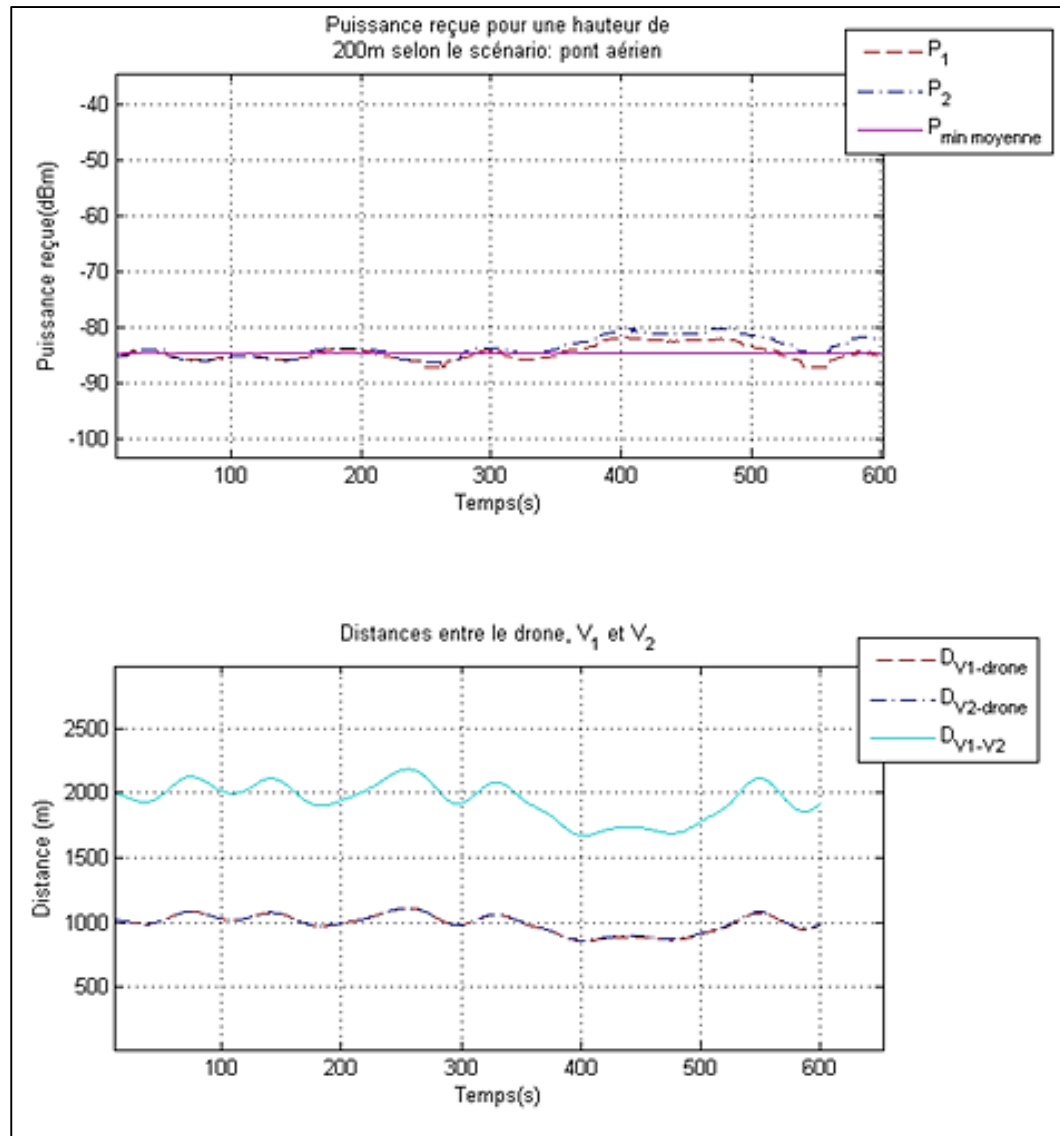


Figure 4.2 Résultats des simulations pour le scénario 1 (pont aérien)

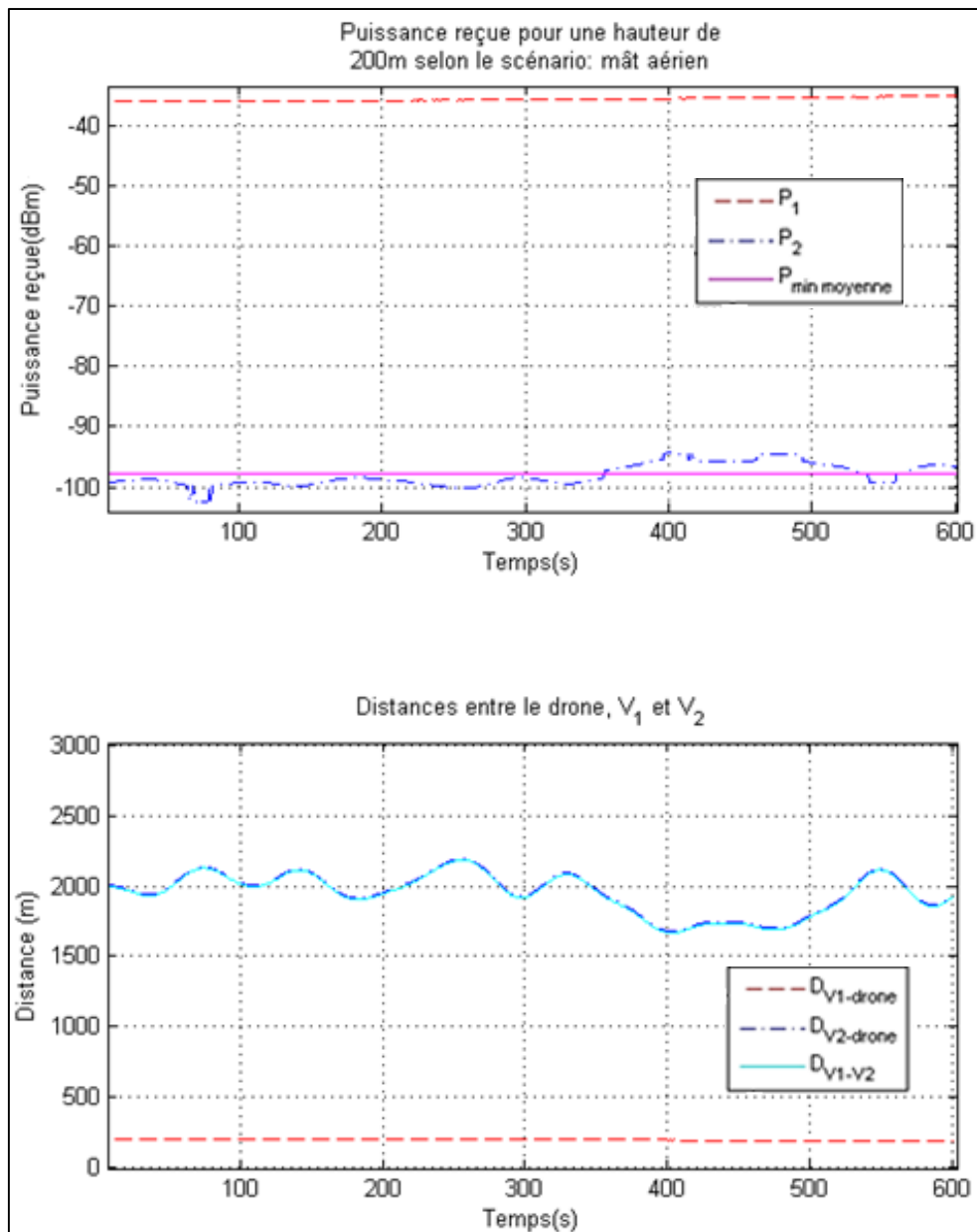


Figure 4.3 Résultats des simulations pour le scénario 1 (mât aérien)

On peut observer à travers la figure 4.2 que dans le cas du pont aérien, la différence entre P_1 et P_2 ne dépasse pas 3dB. Ceci confirme bien le bon fonctionnement de l'algorithme de positionnement mis en place pour cette stratégie. La moyenne de la puissance minimale reçue calculée pour la totalité de la durée simulée est de -85 dBm. D'autre part, la distance d'atterrissage moyenne est autour de 1 km.

La figure 4.3 démontre le même type de résultats pour le cas du mât aérien. Pour cette dernière stratégie, la puissance de signal minimale moyenne reçue par le drone est d'environ -97 dBm. Soit une perte de 12 dB par rapport au cas du pont aérien. Cependant, on constate une puissance reçue de -37 dBm pour le lien direct et une distance d'atterrissage quasiment constante autour de 200m.

4.3.2 Scénario 2

Un deuxième scénario permet de visualiser les trajectoires différentes de chacune des composantes du relai aérien (figure 4.4). En interprétant ensuite les données représentées par les figures 4.5 et 4.6, on constate une moyenne de la puissance minimale reçue de -87 dBm pour la stratégie du pont aérien. Pour le mât aérien cette moyenne est de -100.5 dBm, soit une perte de 13.5 dB par rapport à la première stratégie. Concernant la distance d'atterrissage (définie dans 4.2), une moyenne d'environ 1200m est enregistrée pour la stratégie de pont aérien, soit 1km de plus par rapport au cas du mât aérien.

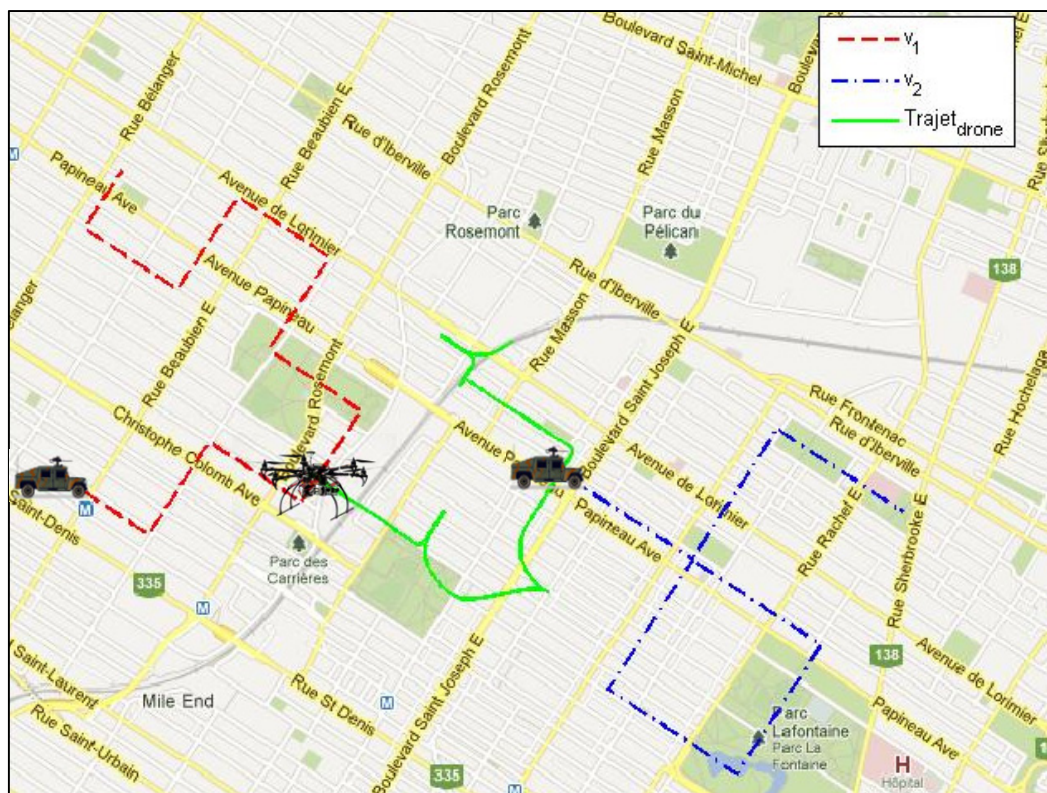


Figure 4.4 Trajectoires des camions et du drone pour le scénario 2

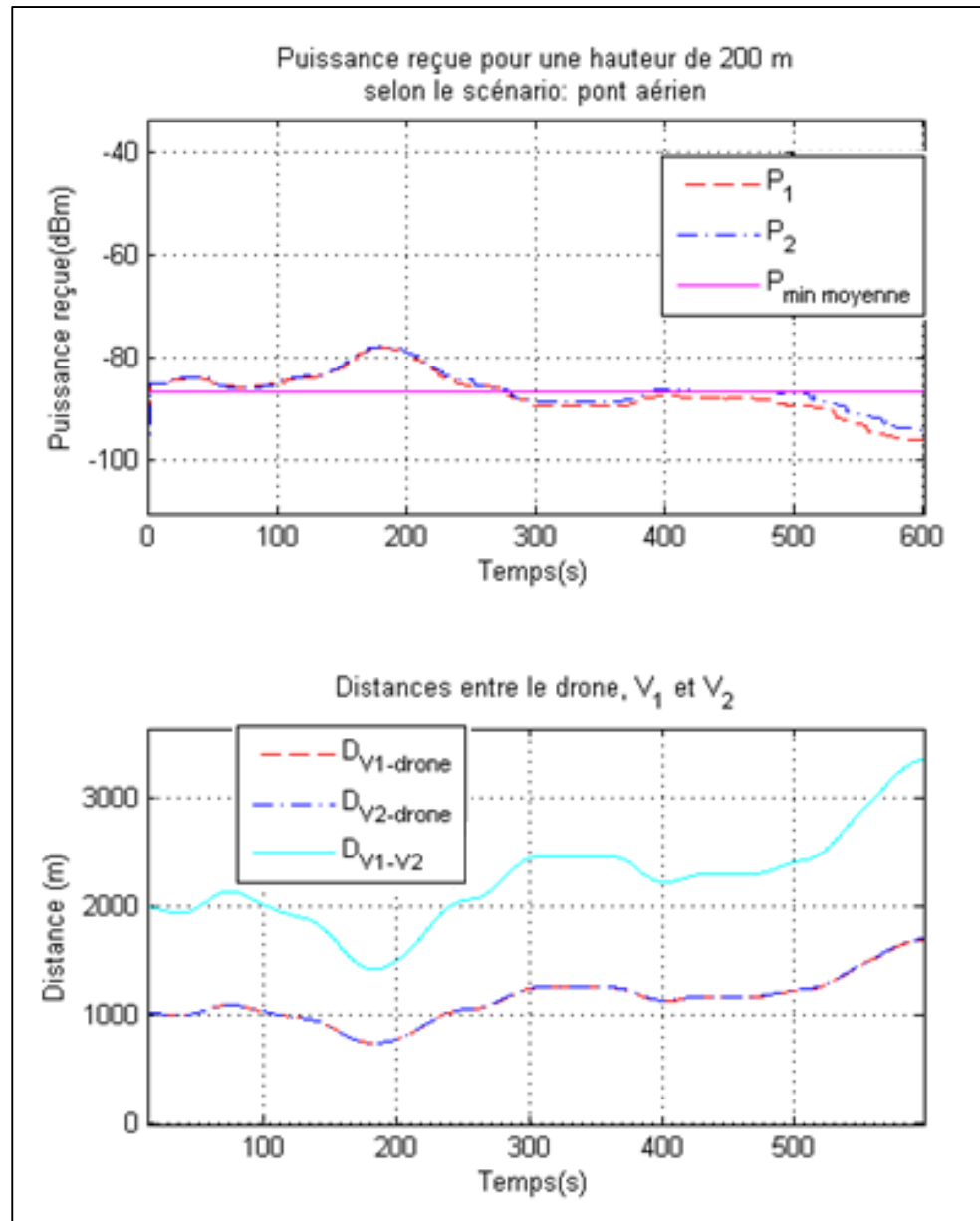


Figure 4.5 Résultats des simulations pour le scénario 2 (pont aérien)

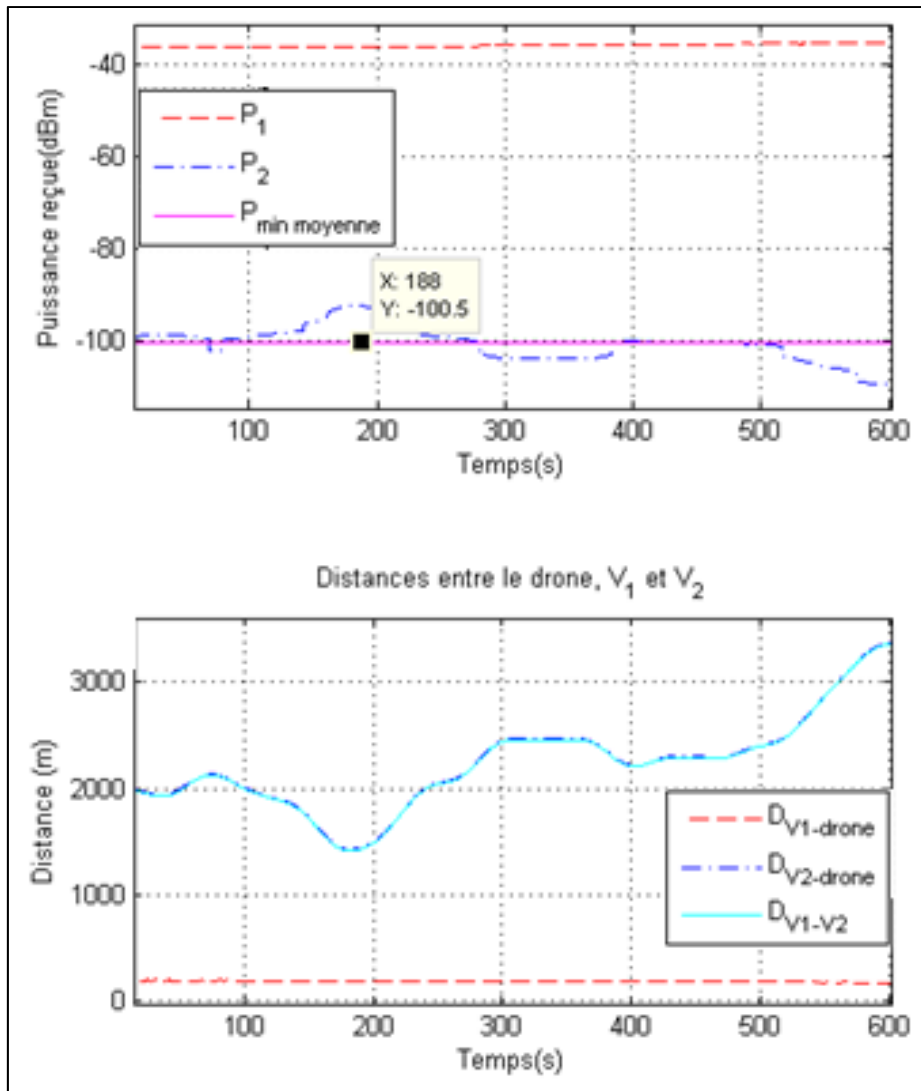


Figure 4.6 Résultats des simulations pour le scénario 2 (mât aérien)

4.3.3 Scénario 3

Avec un troisième scénario, on observe les mêmes faits constatés avec les scénarios 1 et 2. Les trajectoires du drone et celle des camions sont représentées par la figure 4.7.

À travers une analyse des résultats observés dans les figures 4.8 et 4.9, on constate que, pour le pont aérien, on gagne plus de puissance donc plus de portée pour notre relai aérien.

Cependant, on perd de plus en plus l'avantage d'accéder à un point d'atterrissage plus rapidement. D'autre part, avec le mât aérien on pourrait profiter d'un lien avec une puissance reçue moyenne supérieure à -40 dBm. Ce lien serait profitable pour des communications à haut-débit, notamment, des données de vidéosurveillance.

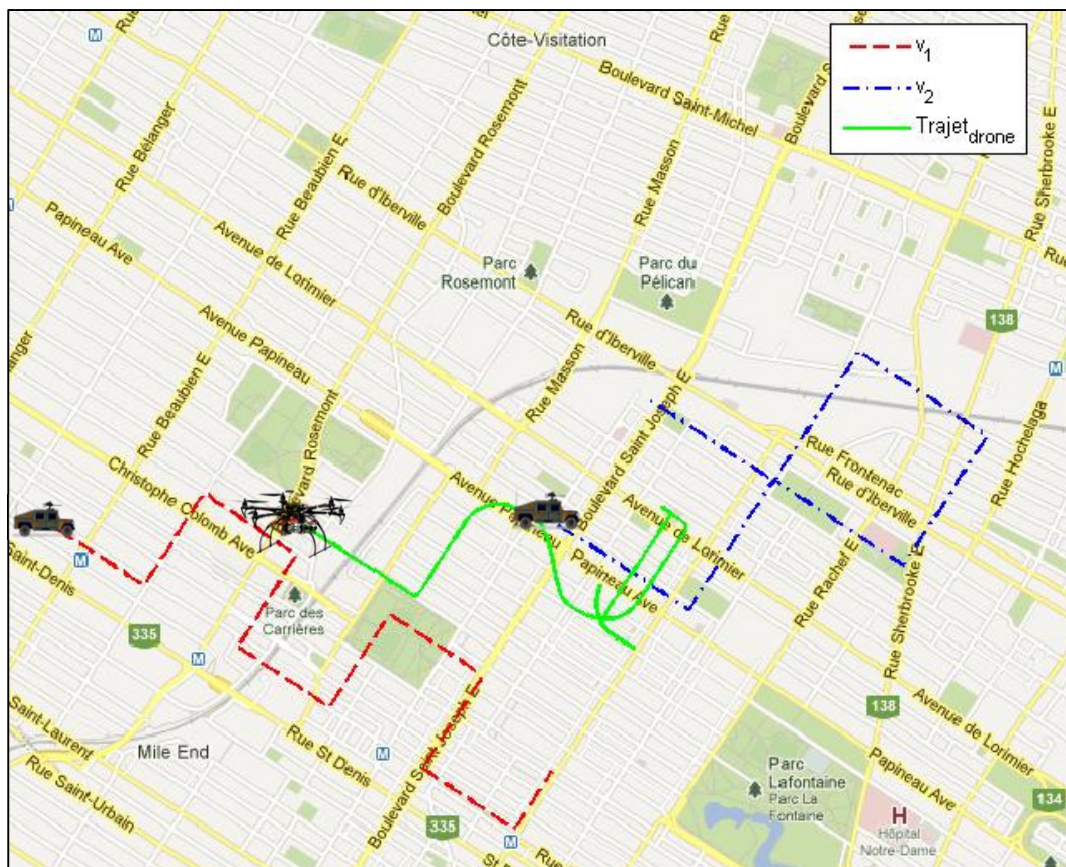


Figure 4.7 Trajectoires des camions et du drone pour le scénario 3

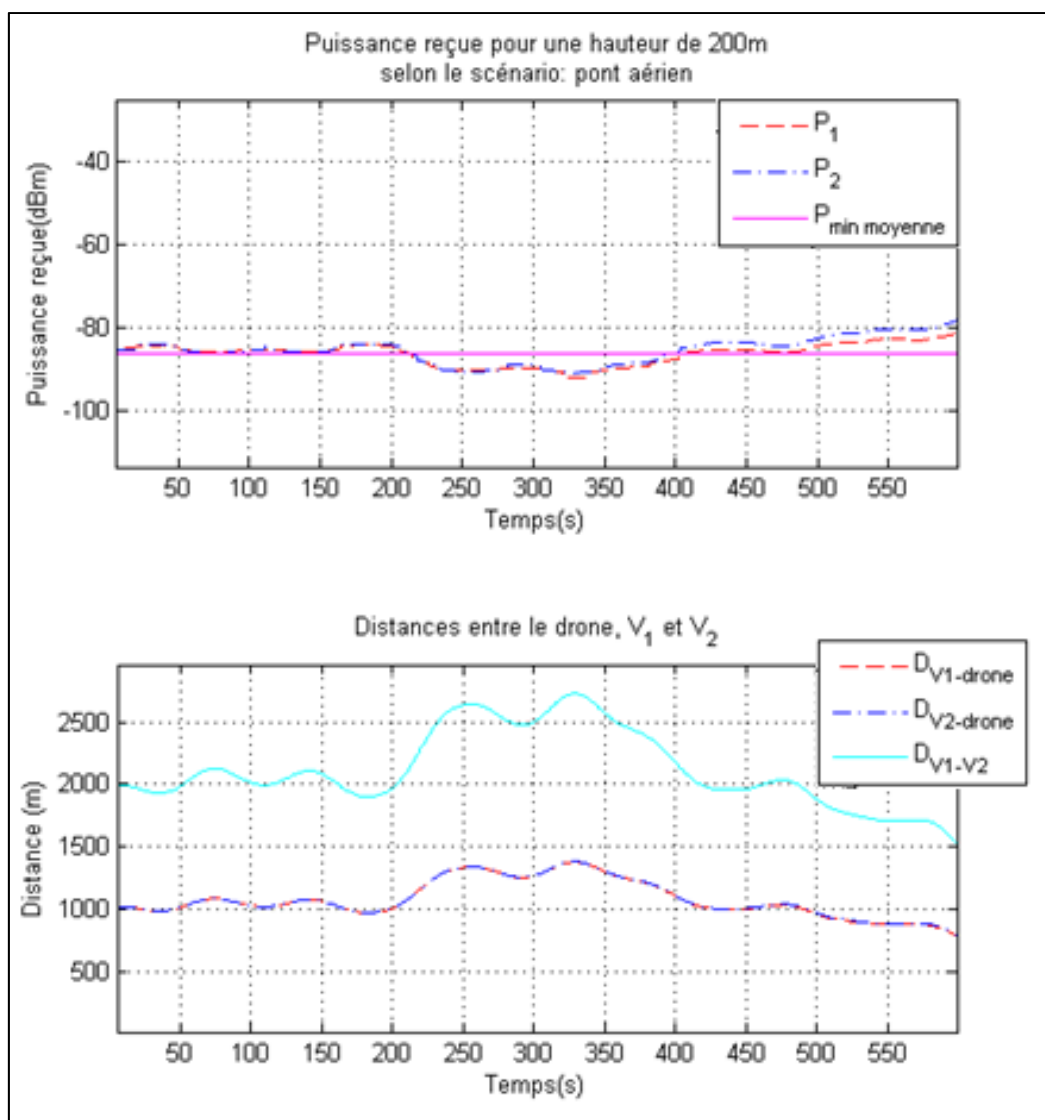


Figure 4.8 Résultats des simulations pour le scénario 3 (pont aérien)

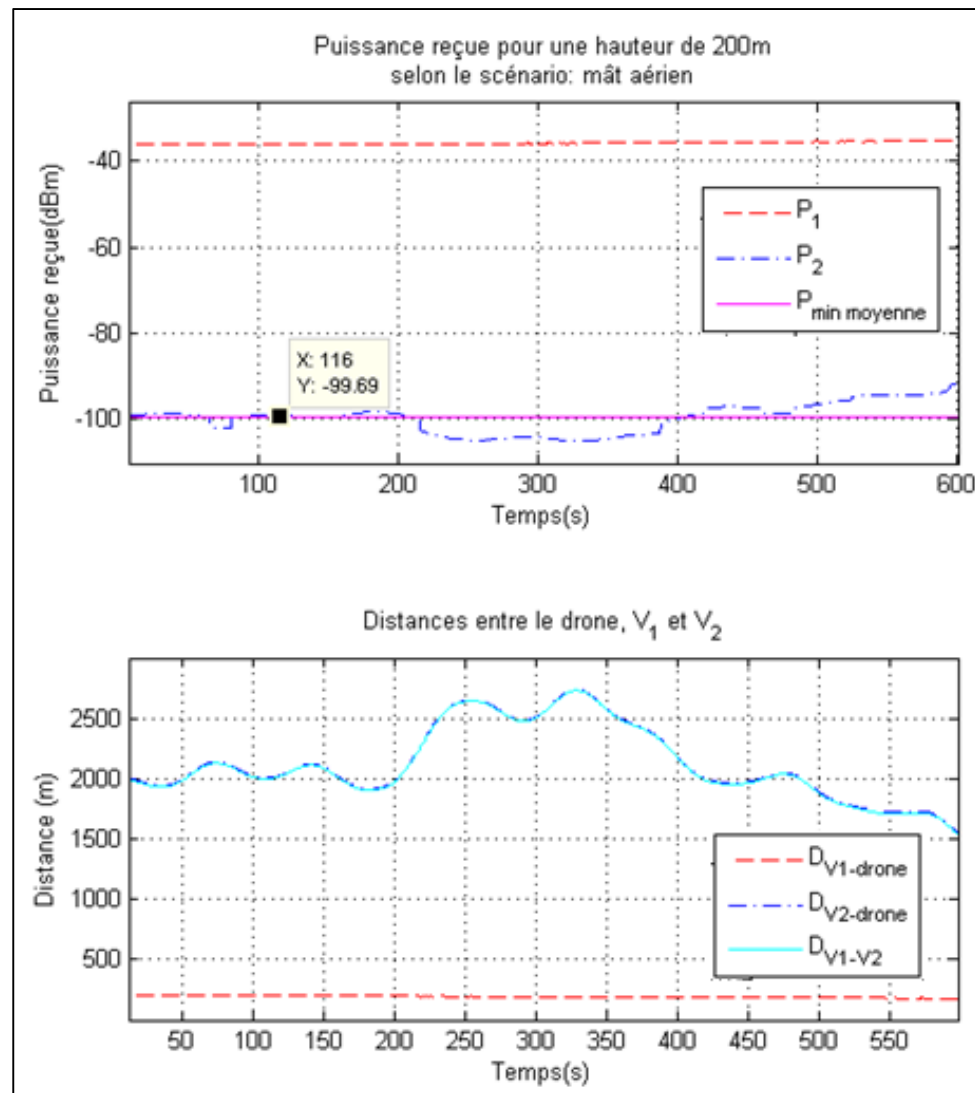


Figure 4.9 Résultats des simulations pour le scénario 3 (mât aérien)

4.4 Résultats statistiques

Dans le but d'obtenir plus de précision et de fiabilité à travers les résultats des simulations, on se propose d'introduire une méthode statistique pour le calcul des performances de chaque stratégie de relai considérée. Cette méthode fait intervenir un nombre assez grand de simulations sur lequel on appliquera quelques opérations permettant d'analyser les résultats obtenus. En effet, les statistiques tiennent compte des mesures de la puissance du signal reçu

par le drone et des distances séparant les composantes du relai aérien. L'ensemble des résultats obtenus pour 10^4 simulations est représenté par la figure 4.10 démontrant la moyenne du signal minimum reçu par le drone et par la figure 4.11 démontrant la moyenne de la distance minimale entre le drone et les camions (distance d'atterrissage).

Le même comportement du signal reçu et des distances est souvent constaté. Une moyenne de 13.5 dB a été calculée pour la différence de la puissance de signal minimum reçue entre les deux stratégies proposées. D'autre part, on observe une perte moyenne de 1338m pour la distance d'atterrissage du pont aérien par rapport au mât aérien. Le tableau 4.2 fournit plus de détails sur les statistiques observées à la fin des simulations.

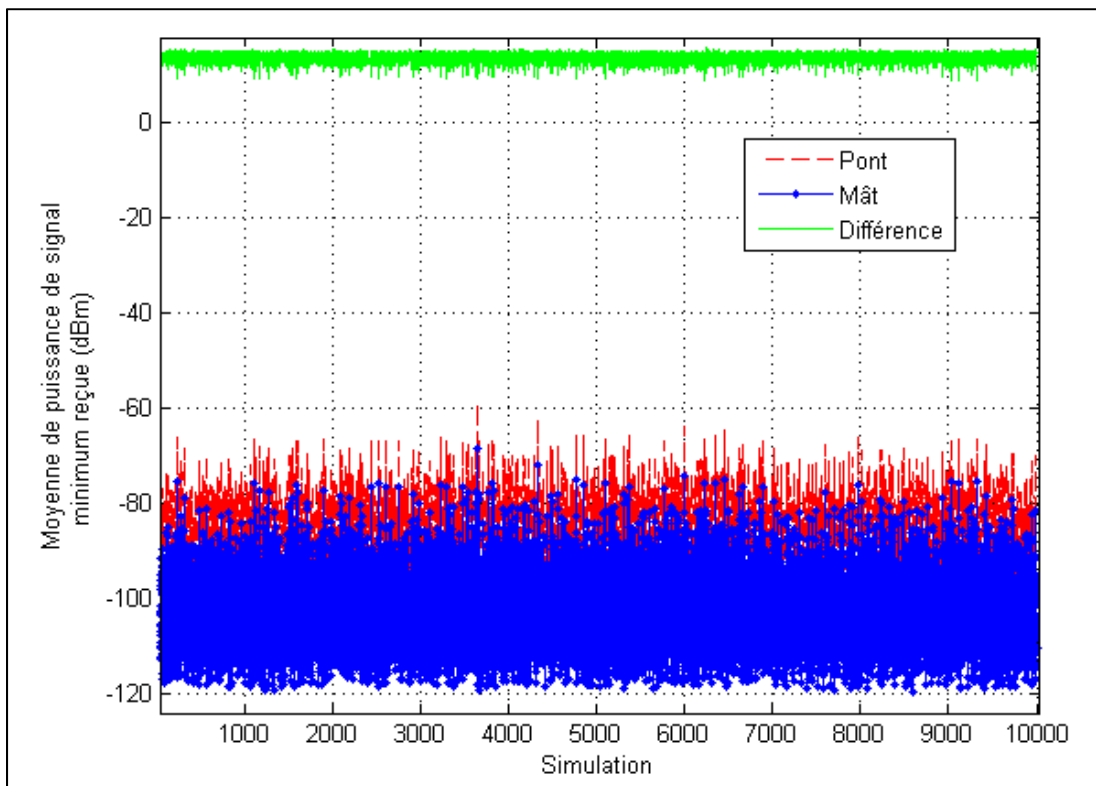


Figure 4.10 Statistiques des puissances

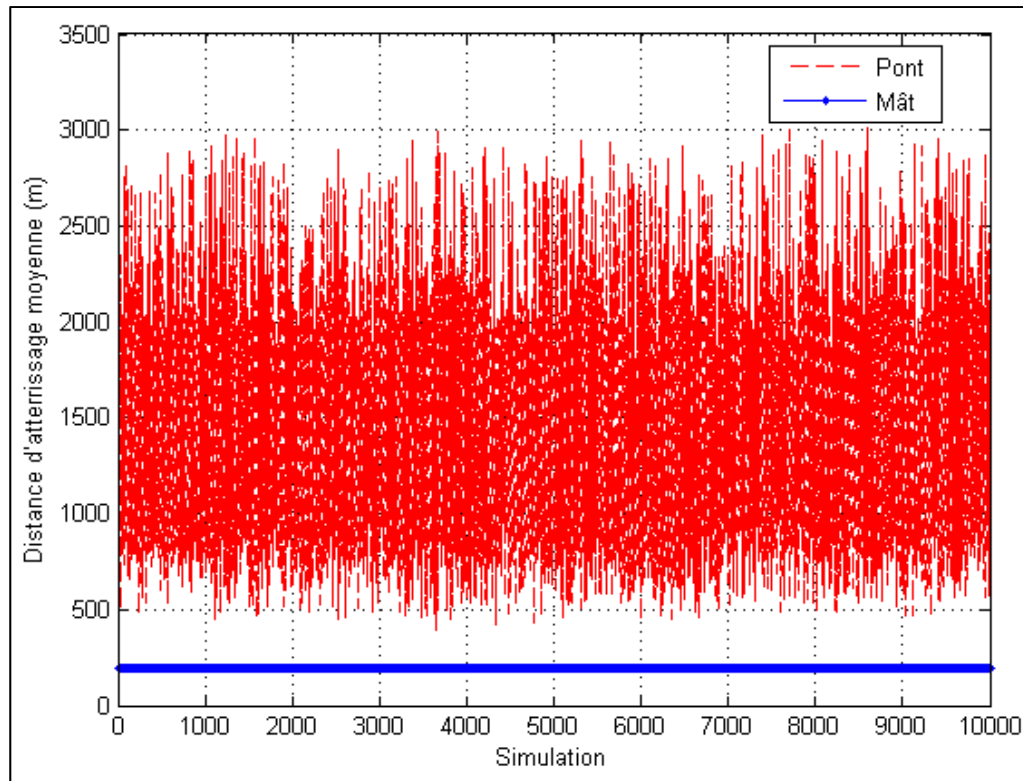


Figure 4.11 Statistiques des distances

Tableau 4.2 Mesures statistiques

<i>Mesure statistique</i>	P_p (dBm)	P_m (dBm)	$ P_p - P_m $ (dB)	D_p (m)	D_m (m)
Moyenne statistique	-88.1	-101.6	13.5	1338	199
Écart type	7.1	8.2	1.21	490	0.58

- P_p : puissance minimale reçue pour la stratégie du pont aérien;
- P_m : puissance minimale reçue pour la stratégie du mât aérien;
- D_p : distance d'atterrissage pour la stratégie du pont aérien;
- D_m : distance d'atterrissage pour la stratégie du mât aérien.

4.5 Conclusion

Les simulations présentées dans ce chapitre ont pour objectif d'évaluer les performances de chacune des stratégies proposées pour le relai aérien. Les métriques sur lesquelles se base l'étude comparative effectuée sont principalement la puissance du signal minimum reçu par le relai en provenance des nœuds mobiles au sol et la distance d'atterrissage. D'une part, la maximisation de cette puissance sert à garantir la continuité de la communication à travers le relai.

D'autre part, la minimisation de la distance d'atterrissage permet au drone de rejoindre l'une des plateformes mobiles plus rapidement et par conséquent éviter un éventuel risque de perte ou de collision. Toutefois, le choix de la stratégie de relai à adopter reste dépendant des caractéristiques techniques de chacune des composantes intervenant dans la réalisation de la plateforme (autonomie du drone, vitesse des nœuds mobiles, directivité des antennes...) ainsi que des exigences relatives à la communication (fréquence de porteuse, portée de communication désirée, sensibilité du récepteur...).

CONCLUSION

Dans ce mémoire, nous avons présenté deux stratégies pour la réalisation d'un relai aérien (porté par un drone) entre deux terminaux mobiles au sol. Une première stratégie dite pont aérien représente une manière habituelle de placement du relai qui vise à garder une position optimale au milieu des deux terminaux reliés. Une deuxième stratégie dite mât aérien a été proposée suite à la détection de plusieurs problèmes lors de la simulation d'un pont aérien. Ces problèmes sont dus essentiellement à la mobilité des terminaux au sol et à la variation rapide de la position optimale que le relai doit suivre. Cette variation est causée principalement par la directivité des antennes associées aux mobiles au sol.

Ensuite, une étude comparative entre ces deux stratégies de relai a été réalisée en se basant sur la modélisation Winner II pour la propagation des ondes en milieu urbain. L'objectif de cette étude était d'évaluer les performances du lien radio pour chaque stratégie de relai pour pouvoir enfin prendre la décision adéquate quant au choix de la stratégie à adopter.

Plusieurs paramètres ont été choisis dans le but de représenter le comportement du drone et des terminaux qu'on suppose être attachés à des camions mobiles au sol. Ces paramètres incluent le choix des antennes pour chacune des composantes du relai aérien, l'altitude du drone, la variation de la vitesse des camions ainsi que l'étendue ou la portée maximale visée par la simulation.

Les résultats ainsi obtenus étaient basés dans un premier temps sur des simulations temporelles pour différents scénarios. Chaque scénario représente des trajectoires différentes pour les camions ainsi qu'un comportement résultant du drone en fonction de la variation de la puissance du signal reçu dans le temps. Dans un deuxième temps, une étude statistique a été réalisée en se basant sur les moyennes statistiques des mesures effectuées pour un grand nombre de scénarios générées par le simulateur.

Enfin, la décision du choix de stratégie de relai aérien à adopter reste dépendante non seulement de la qualité du signal radio observé et de la portée maximale supportée par le

relai, mais aussi des caractéristiques techniques du drone. Parmi ces caractéristiques on s'intéresse surtout à sa vitesse maximale et à son autonomie permettant de prévoir la distance d'atterrissage nécessaire.

ANNEXE I

MODÉLISATION DÉTAILLÉE DE LA PERTE DE PROPAGATION SELON WINNER II

Tableau-A I- 1 Modélisation de la perte de propagation pour chaque scénario

Scénario		Perte due à la propagation [dB]
A1	LOS	$A = 18.7, B = 46.8, C = 20$
	NLOS	$A = 36.8, B = 43.8, C = 20$ et $X = 5(n_w - 1)$ (murs minces) ou $X = 12(n_w - 1)$ (murs épais)
	NLOS	Murs minces: $A = 20, B = 46.4, C = 20, X = 5n_w$
		Murs épais: $A = 20, B = 46.4, C = 20, X = 12n_w$
	FL	Pour chacun des cas ci-dessus, ajouter la perte du sol dans le cas où l'émetteur et le récepteur ne se trouvent pas sur le même étage : $FL = 17 + 4(n_f - 1), \quad n_f > 0$
A2	NLOS	$PL = PL_b + PL_{tw} + PL_{in}$ $\{ PL_b = PL_{B1} (d_{out} + d_{in})$ $\{ PL_{tw} = 14 + 15(1 - \cos(\theta))^2$ $PL = 0.5d$

Scénario		Perte due à la propagation [dB]
B1	LOS	$A = 22.7, B = 41.0, C = 20$ $PL = 40.0 \log_{10}(d_l) + 9.45 - 17.3 \log_{10}(h'_{BS}) - 17.3 \log_{10}(h'_{MS}) + 2.7 \log_{10}(f_c/5.0)$
	NLOS	$PL = PL_{LOS}(d_k) + 20 - 12.5n_j + 10n_j \log_{10}(d_l) + 3 \log_{10}(f_c / 5.0)$
B2	NLOS	B1
B3	LOS	$A = 13.9, B = 64.4, C = 20$
	NLOS	$A = 37.8, B = 36.5, C = 23$
B4	NLOS	A2
B5a	LOS	$A = 23.5, B = 42.5, C = 20$
B5c	LOS	B1 LOS
B5f	NLOS	$A = 23.5, B = 57.5, C = 23$
C1	LOS	$A = 23.8, B = 41.2, C = 20$ $PL = 40.0 \log_{10}(d) + 11.65 - 16.2 \log_{10}(h_{BS}) - 16.2 \log_{10}(h_{MS}) + 3.8 \log_{10}(f_c/5.0)$
C1	NLOS	$PL = (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{BS})) \log_{10}(d) + 31.46 + 5.83 \log_{10}(h_{BS}) + 23 \log_{10}(f_c/5.0)$

Scénario		Perte due à la propagation [dB]
C2	LOS	$A = 26, B = 39, C = 20$ $PL = 40.0 \log_{10}(d) + 13.47 - 14.0 \log_{10}(h_{MS}) - 14.0 \log_{10}(h_{BS}) + 6.0 \log_{10}(f_c/5.0)$
C2	NLOS	$PL = (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{BS})) \log_{10}(d) + 34.46 + 5.83 \log_{10}(h_{BS}) + 23 \log_{10}(f_c/5.0)$
C3	NLOS	C2 NLOS
C4	NLOS	$PL = PL_{C2}(d_{out} + d_{in}) + 17.4 + 0.5 d_{in} - 0.8 h_{MS}$
D1	LOS	$A = 21.5, B = 44.2, C = 20$ $PL = 40.0 \log_{10}(d) + 10.5 - 18.5 \log_{10}(h_{BS}) - 18.5 \log_{10}(h_{MS}) + 1.5 \log_{10}(f_c/5.0)$
D1	NLOS	$PL = 25.1 \log_{10}(d) + 55.4 - 0.13(h_{BS} - 25) \log_{10}(d/100) - 0.9(h_{MS} - 1.5) + 21.3 \log_{10}(f_c/5.0)$
D2a	LOS	D1 LOS

ANNEXE II

CONTEXTES DE LA MISE EN PLACE DU RELAI AÉRIEN

Les différents paramètres à prendre en considération lors de la modélisation d'un problème lié aux relais aériens se classent dans le tableau AII-1 selon les différents contextes considérés (Dos Santos Moreira, 2010).

Tableau-A II- 1 Paramètres à considérer selon le contexte de la mise en place du relais aérien

Contexte	Paramètre	Description
Qualité du lien/signal	Rapport signal/bruit (SNR)	Le rapport de la puissance du signal reçu par la puissance du bruit
	Taux d'erreur binaire (BER)	Nombre de bits erronés reçus par rapport au nombre total de bits transmis
	Bande passante	Ressource disponibles exprimée en bit/s
	Délai (latence)	Durée requise pour la transmission d'un packet de données
	Jigue	Mesure de la variance du délai
	Disponibilité du lien	
Sécurité	Intégrité	Intégrité des données tout au long de l'émission
	Confidentialité	L'immunité aux interceptions
	Authenticité	Vérification de la source des données

Contexte	Paramètre	Description
Ressources	Consommation d'énergie	L'énergie consommée pour l'envoi et l'émission des données
	Carburant	Ce paramètre permet de définir la portée de la couverture du drone
	Budget de mission	Cette information est nécessaire lorsque le lien est chargé
Environnement	Température, pluie, nuages, humidité, pression	En général, la présence de l'eau dans l'un de ses états dans l'aire cause la dégradation du signal par l'absorption du rayonnement électromagnétique
	Animaux volants	Ce type d'animaux peut endommager le drone
	Fumée	Cause l'instabilité du drone
	Pollution	La pollution peut causer la dégradation des équipements
	Vent	Affecte l'équilibre du drone
Géographie	Caractéristiques naturelles (montagnes, collines)	La présence de tels obstacles peut être prévue, sauf que la prédiction de leur effet sur la qualité du signal reste difficile
	Obstacles	Édifices, tours
	Occupation terrestre	milieu urbain, rural, champs

Contexte	Paramètre	Description
Navigabilité	Rotation	Rotation autour de l'axe longitudinal du drone
	Visibilité directe	Existence d'une ligne directe entre deux points
	Parcours	Trajet planifié pour la mission
Criticité de la mission	Élevée	Plusieurs aspects critiques pourraient être attribués à la mission

ANNEXE III

ALGORITHME DE RECHERCHE DE LA POSITION OPTIMALE

```
function [x y]=spiral(x_min,x_max,y_min,y_max,ind,ind_max)

x_med=(x_min+x_max)/2;
y_med=(y_min+y_max)/2;

long=150*pi;

t = linspace(0,long,ind_max);

x =x_med+ ((x_max-x_min)/(2*long))*t(ind).*cos(t(ind));
y =y_med+ ((y_max-y_min)/(2*long))*t(ind).*sin(t(ind));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

[P1,P2,pos_v1,pos_v2,d1t,d2t,v1t,v2t,d12t]
=channelSimulator_v2_4(x,y,h,t,context);

    ind=1;
    ind_max=10000;

    while (abs(P1-P2)>3)  && (ind<ind_max)

        [x,y]=spiral(x_min,x_max,y_min,y_max,ind,ind_max);

        [P1,P2,pos_v1,pos_v2,d1t,d2t,v1t,v2t,d12t]
        =channelSimulator_v2_4
        (x,y,h,t,context);
        ind=ind+1;
    end
```


LISTE DES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Amphenol. (2009). Récupéré sur [www.amphenol-jaybeam.com](http://www.amphenol-jaybeam.com/tech_doc_files/21.Amphenol%20Jaybeam%20Product%20Catalogue%20-%20Europe,%20Africa%20and%20Middle%20East.pdf): http://www.amphenol-jaybeam.com/tech_doc_files/21.Amphenol%20Jaybeam%20Product%20Catalogue%20-%20Europe,%20Africa%20and%20Middle%20East.pdf
- Dos Santos Moreira, E. (2010). A Context-Aware Communication Link for Unmanned Aerial Vehicles. *2010 Sixth Advanced International Conference on Telecommunications (AICT)*. Barcelona.
- ITU-R Recommendation. (1999). *Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Earth-Space Telecommunication Systems*. Genève.
- Kyösti, P., Meinilä, J., Hentilä, L., Zhao, X., Jämsä, T., Schneider, C., . . . Rautiainen, T. (2007). *WINNER II Channel Models*.
- Loyka, S., Kouki, A., & Gagnon, F. (2001). Fade depth prediction on wireless microwave links using two-ray multipath model. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2001*, (pp. 493 - 498 vol.1). Toronto, Ont. , Canada.
- Proakis, J., & Salehi, M. (2007). *Digital Communications (5ème éd)*. McGraw-Hill Education.
- Stella Doradus. (2012). Récupéré sur [www.stelladoradus.com](http://www.stelladoradus.com/wp-content/uploads/2012/11/26.8080.planet.27-08-09.txt): <http://www.stelladoradus.com/wp-content/uploads/2012/11/26.8080.planet.27-08-09.txt>