

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

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

PAR
HACHEM MOHANNA

ÉTUDE DU MOUVEMENT DES RÉSEAUX MOBILES AD HOC, ESTIMATION ET
PRÉDICTION DE LA QUALITÉ DE LIEN PAR UNE MÉTHODE
D'EXTRAPOLATION HISTORIQUE UTILISANT LES « TIME SERIES »

MONTRÉAL, LE 5 SEPTEMBRE 2006

(c) droits réservés de Hachem Mohanna

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Michel Kadoch, directeur de mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Zbigniew Dziong, codirecteur de mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Jean-Marc Lina, président du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Michel Lavoie, membre du jury
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC
LE 8 AOUT 2006
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

ÉTUDE DU MOUVEMENT DES RÉSEAUX MOBILES AD HOC, ESTIMATION ET PRÉDICTION DE LA QUALITÉ DE LIEN PAR UNE MÉTHODE D'EXTRAPOLATION HISTORIQUE UTILISANT LES « TIME SERIES »

Hachem Mohanna

SOMMAIRE

Les MANETs (Mobile Ad hoc NETWORKS) ont été au cœur d'un nombre croissant de travaux de recherche et de publications au cours de ces dernières années. Bien que la majorité de ces études traitent d'un aspect particulier ou à une couche donnée des systèmes ad-hoc, de plus en plus de travaux abordent les problématiques avec une vision globale, allant de plus en plus vers une approche *cross-layer*.

Un des principaux problèmes dans un MANET est la variation constante de la qualité des liens entre les nœuds, essentiellement due à leurs mouvements. De nombreuses approches basées sur la prédiction de la qualité de lien, sur la prédiction du mouvement, ou du moment de rupture ont été proposées. Nous proposons un modèle, *Time Series Received Power Prediction* (TSRPP), simple, efficace et basé sur des éléments historiques. Il permet de prédire la variation de la puissance reçue à partir des valeurs passées à travers l'utilisation des outils de *time series* basés sur le *exponential smoothing*. L'idée est d'offrir un outil qui fournit des éléments d'information sur l'état des liens à horizon court, deux secondes. Une liberté totale étant laissée aux utilisateurs de notre outil quand aux changements à apporter dans les protocoles de la couche MAC, du routage, de construction et maintenance de *clusters* et de *backbones* pour prendre en compte la prédiction dans leur fonctionnement.

Il ne fait nul doute que, pour le moment, les outils de simulation sont le moyen privilégié pour tester toute proposition ou éprouver un protocole. De ce fait et au vu de l'impact considérable de la mobilité sur les performances des MANETs, une modélisation réaliste du mouvement prend toute son importance. Pour élaborer et tester notre modèle de prédiction dans de bonnes conditions de réalisme, nous proposons deux modèles de mobilité, *Temporal Dependency with Pause time Dependency mobility model* (TDPD) et *Temporal Dependency and Movement Dependency mobility model* (TDMD), qui se veulent aussi simples d'utilisation que *Random Waypoint* tout en fournissant des traces plus réalistes. De même et dans le but de modéliser de façon assez fine la puissance du signal reçu par le récepteur, nous utilisons un modèle de propagation répandu dans la littérature qui prend aussi bien en compte les phénomènes d'atténuation à tendance longue que les variations aléatoires plus rapides.

À travers des simulations sous Matlab, nous montrons les caractéristiques de nos modèles de mouvements ainsi que la qualité des résultats de notre modèle de prédiction. Nos résultats tendent à confirmer le proverbe « l'histoire est ce qui empêche l'avenir d'être n'importe quoi ».

STUDY OF MOVEMENT IN MOBILE AD-HOC NETWORKS, ESTIMATION AND PREDICTION OF LINK QUALITY THROUGH A TIME SERIES BASED METHODE

Hachem Mohanna

ABSTRACT

In recent years, MANETs (Mobile Ad hoc NETWORKs) have been at the heart of an increasing number of research studies. Even though the majority of this effort solves specific problems and at a specific layer, a growing number of studies use a global vision thus using a cross-layer approach.

The variation of link quality due to nodes mobility in MANETs is considered to be one of the main problems that have to be dealt with. Numerous approaches have been proposed to predict either the quality of links, node movement, or the time of link breakage.

In this thesis a Time Series Received Power Prediction (TSRPP) model is proposed. By applying an exponential smoothing time series approach on historic data, the variations of the received power level in the future, two seconds, is simply and efficiently predicted. It is expected that proposed model can be seamlessly integrated with MAC layer protocols, routing protocols as well as clusters and backbones building and maintenance.

As simulations are for the time being the main way to test new ad-hoc technologies and protocols, the use of realistic mobility models is therefore a key element. In order to develop and test the prediction tool in fairly good conditions, we propose two mobility models: the Temporal Dependency with Pause time Dependency mobility model (TDPD) and the Temporal Dependency and Movement Dependency mobility model (TDMD). These two models give much more realistic traces than the Random Waypoint mobility model although they are equally simple to configure and use. Also, and in order to have realistic power data of received signal, we use a well developed propagation model.

Through simulations using Matlab, we are able to show some characteristics of our mobility models as well as the good performance of our prediction tool.

REMERCIEMENTS

Je tiens avant tout à remercier M. Michel Lavoie d'avoir accepté de faire partie du jury ainsi que M. Jean-Marc Lina d'avoir accepté de le présider.

Je souhaite exprimer la plus profonde gratitude à mon directeur de recherche, Michel Kadoch, pour sa patience et ses bons conseils ainsi que pour m'avoir donné l'opportunité et la liberté de développer mes idées tout au long de la maîtrise. Je remercie également tout particulièrement Zbigniew Dziong, le codirecteur de ma maîtrise, pour son temps, sa patience et ses bons conseils.

Un grand merci à tous les membres du LAGRIT, professeurs et étudiants. Leurs éclairages, nos discussions, et parfois nos « désaccords », ont été pour moi une constante source de compréhension, de questionnement et d'idées. Une reconnaissance particulière, à Basile sans qui je n'aurai pas su surmonter le gouffre de la propagation radioélectrique, à Marie-Eve sans qui les hiéroglyphes de la couche physique me seraient restés incompréhensibles, et à Zouheir qui a eu la patience de relire les premières versions de ce mémoire et de m'en indiquer les nombreuses fautes et lacunes.

Une dernière pensée à mes parents et à ma famille qui ont été une source continue de soutien et d'encouragement. Enfin à mes amis qui ont su me divertir à chaque fois qu'une saturation guettait, un grand merci à eux.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	iii
ABSTRACT	v
REMERCIEMENTS	vi
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES	xvii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 SURVOL DES RÉSEAUX AD-HOC.....	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Retour sur les réseaux sans fils	9
1.2.1 La norme 802.11	11
1.2.2 Le Bluetooth.....	12
1.3 Particularités des couches dans les réseaux ad-hoc.....	14
1.3.1 La couche physique.....	14
1.3.2 La couche MAC et le scheduling.....	19
1.3.2.1 Problèmes particuliers de la couche Mac dans le cas des MANETs	19
1.3.2.2 Protocoles de la couche MAC pour les MANETs	28
1.3.3 La couche réseau et le routage	30
1.3.3.1 Problèmes particuliers du routage dans le cas des MANETs	30
1.3.3.2 Protocoles de routage pour les MANETs.....	32
1.4 Approches particulières des réseaux ad-hoc	34
1.4.1 La notion de cluster.....	34
1.4.2 Les backbones	36
1.4.3 Le cross-layer	37
CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE	39
CHAPITRE 3 LA PROPAGATION RADIO ET LE MODÈLE UTILISÉ	43
3.1 Introduction.....	43
3.2 Modélisation de l'atténuation grande échelle	49
3.3 Modélisation des phénomènes d'évanescences	53
CHAPITRE 4 LE MOUVEMENT DES MANET	57
4.1 Introduction.....	57
4.2 État de l'art.....	60

4.2.1	Caractéristiques des différents modèles de mobilité.....	60
4.2.2	Quelques modèles de mobilité	65
4.2.2.1	Random Walk Mobility Model	65
4.2.2.2	Random Waypoint Mobility Model.....	66
4.2.2.3	Boundless Simulation Area Mobility Model	68
4.2.2.4	Gauss-Markov Mobility Model	69
4.2.2.5	Markovian Random Path Model	71
4.2.3	Le steady state	73
4.2.4	Influence du mouvement sur les performances des MANETs.....	73
4.3	Modèles de mobilité implémentés et développés	76
4.3.1	Random Waypoint mobility model.....	78
4.3.2	Temporal Dependency mobility model.....	80
4.3.3	Temporal Dependency with Pause time Dependency mobility model	87
4.3.4	Temporal Dependency and Movement Dependency mobility model.....	94
4.4	Comparaison des modèles de mobilité implémentés et développés	101
4.4.1	Choix des paramètres des modèles	101
4.4.2	Notre outil d'analyse et de comparaison.....	104
4.4.3	Comparaison des modèles de mobilité.....	110
4.5	Synthèse et conclusion	118
CHAPITRE 5 LA PRÉDICTION DE LA QUALITÉ DE LIEN.....		119
5.1	Introduction	119
5.2	État de l'art.....	121
5.2.1	Classification des modèles de prédiction	122
5.2.2	Survol des modèles de prédiction existants	125
5.2.3	Synthèse et limitations des modèles.....	136
5.3	Time Series Received Power Prediction (TSRPP).....	137
5.3.1	Notre approche et son intérêt	137
5.3.2	Nos modèles d'estimation et de prédiction	138
5.3.2.1	Description des modèles d'estimation et de prédiction.....	138
5.3.2.2	Scénarios de tests Matlab	145
5.3.2.3	Choix du paramètres α	150
5.3.3	Tests du modèle d'estimation avec les scénarios de tests	155
5.3.3.1	Tests avec le premier et le second scénario de mouvement.....	155
5.3.3.2	Tests avec le troisième et le quatrième scénario de mouvement	159
5.3.4	Test du modèle de prédiction avec les scénarios de test	162
5.3.4.1	Tests avec le premier et le second scénario de mouvement.....	163
5.3.4.2	Tests avec le troisième et le quatrième scénario de mouvement	166
5.3.5	Test du modèle de prédiction avec les modèles de mouvements.....	170
5.3.5.1	Prédiction à 2s	174
5.3.5.2	Prédiction à 10s.....	179
5.4	Synthèse et conclusion	182
CONCLUSION.....		184

RECOMMANDATIONS.....188
BIBLIOGRAPHIE191

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Débit théorique et taux de codage pour différentes modulations d'un système IEEE 802.11x 16
Tableau II	Valeurs typiques de β et σ_{dB} 50
Tableau III	Valeurs considéré pour β et σ_{dB} 51
Tableau IV	Paramètres du modèle RW 103
Tableau V	Paramètres du modèle TD 103
Tableau VI	Paramètres du modèle TDPD 103
Tableau VII	Paramètres du modèle TDMD 103
Tableau VIII	Tableau comparatif des erreurs quadratiques moyennes pour le premier scénario de mouvement 164
Tableau IX	Tableau comparatif des erreurs quadratiques moyennes pour le deuxième scénario de mouvement 164
Tableau X	Tableau comparatif des erreurs quadratiques moyennes pour le troisième scénario de mouvement 167
Tableau XI	Tableau comparatif des erreurs quadratiques moyennes pour le quatrième scénario de mouvement 168
Tableau XII	Tableau comparatif des erreurs quadratiques moyennes pour le premier cas de mouvement 175
Tableau XIII	Tableau comparatif des erreurs quadratiques moyennes pour le deuxième cas de mouvement 175

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Topologies d'un réseau à infrastructure et d'un MANET 7
Figure 2	Exemple de relais de trafic entre deux nœuds (A) et (B) 8
Figure 3	Réseau 4G..... 10
Figure 4	Exemple d'un ESS..... 12
Figure 5	Exemple d'un scatternet 13
Figure 6	Modèle de canal de transmission..... 15
Figure 7	Modèle de canal de propagation..... 15
Figure 8	Débit admissible de différentes modulations en fonction du SNR..... 16
Figure 9	Puissance du signal reçu fonction de la distance pour deux types de carte sans fil IEEE 802.11 17
Figure 10	Débit fonction de la distance pour plusieurs types de routeurs 802.11 17
Figure 11	Variation du débit avec la distance..... 18
Figure 12	Zone de communication et zone grise 19
Figure 13	Problème des stations cachées..... 21
Figure 14	Problème des stations exposées..... 21
Figure 15	Utilisation du RTS/CTS 22
Figure 16	Exemple de false blocking..... 23
Figure 17	Exemple de temporary dead lock 23
Figure 18	Le TDMA 24
Figure 19	Le FDMA 24
Figure 20	Combinaison des modes FDMA et TDMA..... 24
Figure 21	L'OFDM..... 26
Figure 22	Le CDMA..... 26
Figure 23	Le FHSS 27
Figure 24	Structure d'un cluster 35
Figure 25	Schéma d'un backbone..... 37
Figure 26	Différentes architectures cross-layer 38

Figure 27	Propagation du signal	44
Figure 28	Variations rapides et lentes de la puissance du signal	44
Figure 29	Puissance du signal en fonction de la distance dans le cadre du modèle de Rayleigh	45
Figure 30	Effet de la présence d'obstacles sur le signal reçu	46
Figure 31	Effet du shadowing dû à l'orientation de l'émetteur sur la puissance du signal reçu	46
Figure 32	Scénario de test avec quatre cas de mouvement.....	51
Figure 33	Variation de la distance et de la puissance de réception théorique pour les quatre cas de mouvement.....	52
Figure 34	Effet du shadowing sur la puissance de réception pour le cas2 de mouvement et pour différentes valeurs de σ_{dB}	53
Figure 35	Principe de la méthode des TDL	54
Figure 36	Scénario de mouvement	55
Figure 37	Amplitude (en dB) des évanouissements des canaux A et B	56
Figure 38	Diagramme conceptuel des caractéristiques des modèles de mobilité.....	60
Figure 39	Traitement des bords dans le modèle Random walk.....	66
Figure 40	Trace du mouvement d'un nœud suivant le modèle Random Waypoint	67
Figure 41	Représentation des bords dans le modèle Boundless Simulation Area	68
Figure 42	Trace du mouvement d'un nœud suivant le modèle Boundless Simulation Area.....	69
Figure 43	Trace du mouvement d'un nœud suivant le modèle Gauss-Markov	71
Figure 44	Modèle de mobilité Markovian Random Path.....	72
Figure 45	Trace du mouvement d'un nœud suivant le modèle MRP	72
Figure 46	Graphique de fonctionnement de IMPORTANT	76
Figure 47	Traces d'une heure de mouvement d'un nœud suivant le modèle RW.....	79
Figure 48	Vitesses et angles de mouvement d'un nœud suivant le modèle RW.....	80
Figure 49	Gestion des bords	82
Figure 50	Cas problématiques dans la gestion de bord.....	83

Figure 51	Trace d'une heure de mouvement d'un nœud suivant le modèle TD.....	85
Figure 52	Vitesse et angle de mouvement d'un nœud suivant le modèle TD pour $\Delta t = 50 s$	86
Figure 53	Vitesse et angle de mouvement d'un nœud suivant le modèle TD pour $\Delta t = 10 s$	87
Figure 54	Décomposition temporelle du TDPD	89
Figure 55	Temps de pause possibles pour $\xi = 0.5$	91
Figure 56	Trace d'une heure de mouvement d'un nœud suivant le modèle TDPD.....	92
Figure 57	Vitesse et angle de mouvement d'un nœud suivant le modèle TDPD.....	93
Figure 58	Valeurs possibles de $v(t + \Delta I)$ pour $\tau = 0.2$	97
Figure 59	Valeurs possibles de $\Delta\theta(t + \Delta I)$ pour $\lambda = 0.2$	97
Figure 60	Trace d'une heure de mouvement d'un nœud suivant le modèle TDMD	99
Figure 61	Vitesse et angle de mouvement d'un nœud suivant le modèle TDMD	100
Figure 62	Histogrammes des distributions de vitesse du modèle TD et TDMD	101
Figure 63	Division en zones de l'espace entourant un nœud.....	105
Figure 64	Schéma du modèle d'analyse et de comparaison	106
Figure 65	Exemple avec trois nœuds.....	108
Figure 68	Nombre de connexion de chaque type au cours du temps.....	111
Figure 69	Nombre de variations de connexions au cours du temps – Éloignement.....	112
Figure 70	Nombre de connexions de chaque type au cours du temps	113
Figure 71	Durée de connexion de chaque type en fonction des liens.....	114
Figure 72	Nombre de changements des types de connexion en fonction des liens – Éloignement	115
Figure 73	Trace d'une heure de mouvement de deux nœuds suivant les modèles : RW, TD, TDPD et TDMD.....	117
Figure 74	Classification des modèles de prédiction	124

Figure 75	Illustration de la zone de sécurité	128
Figure 76	Évolution du débit lors d'un déplacement.....	130
Figure 77	Mouvement réel et estimé	131
Figure 78	Prédiction de la rupture d'un lien	136
Figure 79	Différentes courbes des coefficients fonction de α	140
Figure 80	Simple et double exponential smoothing	141
Figure 81	Simple et double exponential smoothing dans le cas de bruit.....	142
Figure 82	Premier scénario de test.....	146
Figure 83	Second scénario de test.....	146
Figure 84	Variation de distance et de puissance lors du premier scénario de test.....	147
Figure 85	Variation de distance et de puissance lors du second scénario de test.....	147
Figure 86	Troisième scénario de test	148
Figure 87	Variation de distance et de puissance lors du troisième scénario de test.....	148
Figure 88	Quatrième scénario de test.....	149
Figure 89	Variation de distance et de puissance lors du quatrième scénario de test.....	149
Figure 90	Puissance dans le cas du premier scénario et un faible niveau d'erreur	151
Figure 91	Estimation pour $\sigma = 0.05$ et les cas $\alpha = 0.1$ et $\alpha = 0.2$	151
Figure 92	Puissance dans le cas du premier scénario et un niveau d'erreur important.....	152
Figure 93	Estimation pour $\sigma = 4$ et les cas $\alpha = 0.05$ et $\alpha = 0.1$	153
Figure 94	Puissance dans le cas du premier scénario et un niveau d'erreur moyen	154
Figure 95	Estimation pour $\sigma = 2$ et $\alpha = 0.05$	154
Figure 96	Estimation pour $\sigma = 2$ et $\alpha = 0.2$	155
Figure 97	Estimation dans le cas d'un niveau d'erreur moyen ($\sigma = 2$) et le premier scénario de mouvement.....	156
Figure 98	Estimation dans le cas d'un niveau d'erreur élevé ($\sigma = 4$) et le premier scénario de mouvement.....	157

Figure 99	Estimation dans le cas d'un niveau d'erreur moyen ($\sigma = 2$) et le deuxième scénario de mouvement.....	158
Figure 100	Estimation dans le cas d'un niveau d'erreur élevé ($\sigma = 4$) et le deuxième scénario de mouvement.....	159
Figure 101	Estimation dans le cas d'un niveau d'erreur moyen ($\sigma = 2$) et le troisième scénario de mouvement	160
Figure 102	Estimation dans le cas d'un niveau d'erreur élevé ($\sigma = 4$) et le troisième scénario de mouvement	160
Figure 103	Estimation dans le cas d'un niveau d'erreur moyen ($\sigma = 2$) et le quatrième scénario de mouvement	161
Figure 104	Estimation dans le cas d'un niveau d'erreur élevé ($\sigma = 4$) et le quatrième scénario de mouvement	161
Figure 105	Prédiction dans le cas d'un niveau d'erreur moyen ($\sigma = 2$) et le premier scénario de mouvement.....	165
Figure 106	Prédiction dans le cas d'un niveau d'erreur élevé ($\sigma = 4$) et le premier scénario de mouvement.....	165
Figure 107	Prédiction dans le cas d'un niveau d'erreur ($\sigma = 2$) moyen et le deuxième scénario de mouvement.....	166
Figure 108	Prédiction dans le cas d'un niveau d'erreur élevé ($\sigma = 4$) et le deuxième scénario de mouvement.....	166
Figure 109	Prédiction dans le cas d'un niveau d'erreur moyen ($\sigma = 2$) et le troisième scénario de mouvement	168
Figure 110	Prédiction dans le cas d'un niveau d'erreur élevé ($\sigma = 4$) et le troisième scénario de mouvement	169
Figure 111	Prédiction dans le cas d'un niveau d'erreur moyen ($\sigma = 2$) et le quatrième scénario de mouvement	169
Figure 112	Prédiction dans le cas d'un niveau d'erreur élevé ($\sigma = 4$) et le quatrième scénario de mouvement	170
Figure 113	Premier cas de mouvement.....	172
Figure 114	Puissance avec erreur dans le premier cas de mouvement.....	172
Figure 115	Deuxième cas de mouvement.....	173
Figure 116	Puissance avec erreur dans le deuxième cas de mouvement.....	173
Figure 117	Premier cas de mouvement, prédiction à 2s avec un niveau d'erreur moyen ($\sigma = 2$)	176

Figure 118	Premier cas de mouvement, prédiction à 2s avec un niveau d'erreur important ($\sigma = 4$).....	177
Figure 119	Deuxième cas de mouvement, prédiction à 2s avec un niveau d'erreur moyen ($\sigma = 2$)	178
Figure 120	Deuxième cas de mouvement, prédiction à 2s avec un niveau d'erreur important ($\sigma = 4$).....	179
Figure 121	Premier cas de mouvement, prédiction 10s, niveau d'erreur moyen ($\sigma = 2$).....	180
Figure 122	Premier cas de mouvement, prédiction 10s, niveau d'erreur important ($\sigma = 4$)	180
Figure 123	Deuxième cas de mouvement, prédiction 10s, niveau d'erreur moyen ($\sigma = 2$).....	181
Figure 124	Deuxième cas de mouvement, prédiction 10s, niveau d'erreur important ($\sigma = 4$)	181

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

2G	Réseaux de mobile de seconde Génération
3G	Réseaux de mobile de troisième Génération
4G	Réseaux de mobile de quatrième Génération
ABR	Associativity Based Routing
AP	Access Point
BER	Bit Error Rate
BSA	Boundless Simulation Area mobility model
BSS	Basic Service Set
CDMA	Code Division Multiple Access
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CPU	Central Processing Unit, Unité Centrale de Traitement
CTS	Clear To Send
DCF	Distributed Coordination Function
DHSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DSR	Dynamic Source Routing protocol
DV-MP	Distance Vector with Mobility Prediction
ES	Simple <i>exponential smoothing</i>
ESES	Double <i>exponential smoothing</i>
ESS	Extended Service Set
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FORP	Flow Oriented Routing Protocol
GSM	Global System for Mobile communication
IBSS	Independent Basic Service Set
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force

IS95	Interim Standard 95
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISM	Industriel-Scientifique-Médical
ISO	International Standards Organization
LAN	Local Area Network
LET	Link Expiration Time
LOS	Line Of Sight
MAN	Metropolitan Area Network
MANET	Mobile Ad-hoc NETwork, (pluriel « MANETs » dans la littérature)
NGN	Next Generation Networks
NLOS	No Line Of Sight
ODMRP-MP	On-Demand Multicast Routing Protocol with Mobility Prediction
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSI	Open Systems Interconnection reference model
PCF	Point Coordination Function
PLR	Packet Loss Rate
PSTN	Public Switched Telephone Network
QoS	Quality of service
RET	Route Expiration Time
RNIS	Réseau Numérique et Intégration de Services
RTC	Réseau Téléphonique Commuté
RTS	Request to Send
RW	Random Waypoint mobility model
SNR	Signal to Noise Ratio
TD	Temporal Dependency mobility model
TDL	Tap Delay Lines
TDMA	Time Division Multiple Access
TDMD	Temporal Dependency and Movement Dependency mobility model
TDPD	Temporal Dependency with Pause time Dependency mobility model

WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network

À travers ce document, par clarté et pour éviter les fausses traductions, les termes en anglais ont souvent été utilisés, ils sont alors en *caractères italiques*.

INTRODUCTION

« Sur la terre, deux choses sont simples : raconter le passé et prédire l'avenir. Y voir clair au jour le jour est une autre entreprise », Armand Salacrou¹.

L'utilisation accrue du sans fil comme moyen de communication est déjà une réalité. La libéralisation d'équipements performants, de petite taille et de fonctionnement simple amplifiera ce phénomène au cours des prochaines années. Ce développement pose toutefois de nouveaux défis en termes, de gestion de la qualité des services offerts aux utilisateurs, d'interopérabilités de système hétérogènes, de dimensionnement et gestion des réseaux, ainsi que d'allocation de bandes de fréquences adéquates par les organismes publics et par les administrateurs de réseaux.

De ces aspects ont émergé de nouveaux concepts parmi lesquels celui des réseaux ad-hoc. Bien que leur utilisation ait, dans un premier temps, été envisagée sur des terrains militaires, des sites de catastrophes ou des situations de rassemblement important et dense de population, ou encore dans le cadre d'une utilisation à grande échelle de réseaux de senseurs (*sensor networks*), il ne fait nul doute que les applications futures de ces systèmes autonomes seront largement plus vastes.

La particularité première d'un réseau ad-hoc est l'absence d'infrastructure dédiée à l'acheminement du trafic des usagers. Dans un réseau classique, les équipements peuvent être considérés, soit comme des équipements terminaux, clients du réseau et utilisés par les usagers; soit comme des équipements de cœur du réseau, qui le supportent et sont dédiés à l'acheminement du trafic de ces premiers. Un réseau ad-hoc est dépourvu d'équipement de cœur. Ainsi, un équipement terminal (généralement

¹ Auteur dramatique français (1899-1989).

appelé nœud) est utilisé comme relais pour acheminer le trafic des autres équipements terminaux. Ces nœuds sont par ailleurs généralement considérés identiques et donc interchangeables du point de vu du réseau.

Dans le cas des *Mobile Ad-hoc NETWORKS* (MANETs), le mouvement des nœuds ajoute aux problèmes naturels des réseaux ad-hoc, notamment de *scheduling* et de routage, celui de l'instabilité des liens entre les paires de nœuds du réseau. Ces instabilités sont sources de variations intempestives de la qualité des connexions, allant jusqu'au bris, et entraînant des dénis de services momentanées. Les mesures de rétablissement du service en question, notamment au niveau du routage, ne s'opèrent qu'une fois le problème constaté et le service effectivement rompu. De la nécessité d'éviter ce temps de rupture est née l'idée de prédire la qualité des liens. Ceci peut de surcroît faciliter l'intégration de la QoS (*Quality of Service*) nécessaire à certaines applications multimédia et améliorer les performances globales de divers protocoles et algorithmes, notamment dans la construction et la maintenance de *clusters* et de *backbones*.

L'apport principal de notre travail est une méthode d'estimation et de prédiction de qualité de lien basée sur un modèle simple donc peu gourmand en ressources et en temps de calcul et utilisant la puissance du signal reçu comme base du système. Le but étant de fournir un outil de prédiction fiable à horizon assez court (quelques secondes), permettant de suivre et de prédire les variations de la puissance de réception sur la base de données historiques récentes et à travers l'utilisation de *time series*. Notre outil, le *Time Series Received Power Prediction* (TSRPP), est utilisable par des protocoles diversifiés et hétérogènes couvrant le *scheduling*, le routage, la construction d'une dorsale ou d'un *cluster* et, plus largement, tout protocole ou outil qui utilise le niveau de puissance reçue, ou la qualité de lien, comme base décisionnelle.

Les réseaux ad-hoc étant pour le moment très peu déployés, les outils de simulation restent le principal moyen d'étude, de test et de comparaison des protocoles et

technologies développées. Notre méthode d'estimation et de prédiction étant basé sur une approche d'extrapolation historique, les données que nous utilisons doivent refléter au mieux la réalité. La variation du niveau de puissance du signal entre émetteur et récepteur dépend des propriétés d'atténuation du canal radio (effets à grande et à petite échelle) ainsi que de la variation de distance (dû au mouvement des nœuds). Nous avons donc étudié ces deux aspects préalablement à l'élaboration de notre modèle d'estimation et de prédiction.

Au cours de la transmission radio, le signal radioélectrique est atténué, distordu et retardé. Dans un premier temps, nous avons donc effectué l'étude du canal radio et avons utilisé des modélisations de canal généralement admises dans la littérature. Après avoir envisagé les perturbations dues entre autre au *shadowing*, au *multipaths* et à l'effet doppler, nous avons retenu un modèle de canal de propagation cohérent avec nos environnements d'étude.

Le mouvement est un des aspects les plus complexes et les plus problématiques dans la modélisation des MANETs. La multiplication des utilisateurs potentiels des réseaux ad-hoc et l'hétérogénéité de leurs caractéristiques et milieux d'évolution complexifient la modélisation de leur mouvement et multiplient les approches possibles. Après avoir effectué l'étude des modèles de mouvements existants. Il est apparu que les modèles proposés sont soit très simplistes et ne reflètent pas la réalité, soit très complexes et surtout très spécifiques à des scénarios déterminés. Nous proposons donc deux modèles de mouvements : Le *Temporal Dependency with Pause time Dependency mobility model* (TDPD) et le *Temporal Dependency and Movement Dependency mobility model* (TDMD). Ces modèles de mouvements sont facile à paramétrer et intègrent les caractéristiques des mouvements avec but (*task based movement*).

Nous limitons notre cas d'étude aux utilisateurs humains, à pied, dans une zone fermée de type salle de conférence. L'espace est considéré sans sectorisations, murs ou

partitions importantes. De plus, notre approche se veut avec un minimum de contraintes et d'a priori sur le mouvement. Enfin, nous nous posons dans le cas où les nœuds sont, du point de vue du réseau, identiques et interchangeable.

Dans le prochain chapitre, nous commencerons par une mise en contexte et introduction des réseaux ad-hoc, de leurs caractéristiques et de la spécificité des problèmes qu'ils posent. Nous exposerons dans le second chapitre notre problématique et notre méthodologie. Le troisième chapitre sera consacré à l'étude du canal radio et au modèle que nous utilisons. Le quatrième chapitre traite du mouvement, nous y exposerons les approches existantes et nous décrirons les modèles que nous avons implémentés et développés. Dans la dernière partie du chapitre, nous ferons une comparaison des différents modèles et étudierons leurs influences sur la connectivité des MANETs. Le dernier chapitre traitera de la prédiction. Dans un premier temps, nous y exposerons les modèles et approches de prédictions existantes. Nous effectuerons ensuite une description de notre approche de prédiction et détaillerons les tests effectués pour l'évaluation de la précision de notre modèle. Nous terminerons par une conclusion générale et quelques recommandations.

CHAPITRE 1

SURVOL DES RÉSEAUX AD-HOC

1.1 Introduction

Depuis leur émergence dans les années 1970, la popularité des réseaux sans fil a été en constante augmentation. Cet engouement est principalement dû à leur capacité à fournir aux usagers une connexion constante et fiable indépendamment de leur localisation et mouvement. L'utilisation du sans fil a pris un essor important durant les années 1990 avec la diffusion à travers le monde du 2G (GSM et IS95) ainsi que des technologies 802.11. À partir de ces réseaux à architectures hiérarchisées et connectés aux réseaux filaires (RNIS²/ISDN³ et RTC⁴/PSTN⁵), ont émergés des architectures horizontales basées sur un relais sans fil (*radio-to-radio*) et multi-sauts (*multihop*), du trafic.

Dans certains environnements, tel que sur les champs de bataille ou sur les sites de catastrophes et plus généralement sur des terrains dépourvus de toute infrastructure de communication classique, les réseaux sans fil multi-sauts peuvent être facilement et rapidement déployés. Il en est de même pour des applications grand public tel que sur des campus universitaires, dans des salles de conférences, et plus généralement en tout lieu où la variation importante de la densité et du mouvement des utilisateurs rend trop coûteuse la mise en place d'infrastructures de communications fixes et performantes. Cette technologie permet en effet à la capacité d'un réseau de s'adapter et d'être en phase avec ses besoins et ce, en tout temps et sans que la taille du réseau n'entraîne de coût additionnel. Il reste cependant plus probable que la première utilisation large public

² Réseau Numérique et Intégration de Services

³ Integrated Services Digital Network

⁴ Réseau Téléphonique Commuté

⁵ Public Switched Telephone Network

de cette technologie soit son intégration à des réseaux de téléphonie cellulaire 4G ou *Next Generation Networks* (NGN), dans le but de leur fournir une extension et une flexibilité plus importante, nous parlons alors de réseaux hybrides.

La description la plus générale que nous pourrions faire d'un réseau ad-hoc serait de le considérer comme un ensemble de nœuds terminaux qui s'utilisent les uns les autres comme relais pour l'acheminement de leur trafics respectif. Il y a donc une absence totale d'équipement dédié à cette tâche. La communication entre deux nœuds du réseau se fait soit directement lorsque ces nœuds sont en visibilité directe (*Line Of Sight*, LOS) ou alors à travers des nœuds intermédiaires lorsque ces nœuds ne sont pas en visibilité directe (*No Line Of Sight*, NLOS). Dans ce second cas, le trafic entre deux nœuds sera relayé par plusieurs nœuds intermédiaires. De plus, il est généralement admis que les équipements sont, vus du réseau, identiques et interchangeable. Nous entendons par ces deux termes que, pour ce qui est des capacités de communication, tous les nœuds sont considérés identiques et peuvent donc effectuer les mêmes tâches de relais.

Ces dernières années ont vu un intérêt grandissant pour les réseaux ad-hoc mobiles (MANETs) essentiellement dû à la maturité des technologies sans fil. C'est ce type de réseau, strictement sans fil, auxquels nous nous intéressons. La figure 1 présente des exemples d'architecture de réseaux classiques à infrastructure et MANETs.

Dans le cas d'un MANET, le caractère dynamique de la topologie, ajouté à l'absence d'administration centralisée et d'infrastructure dédiée à l'acheminement du trafic, engendre des problèmes supplémentaires à ceux des réseaux classiques, qu'ils soient filaires ou sans fil. De plus comme nous l'avons déjà évoqué, les nœuds du réseau devront relayer la communication des couples de nœuds NLOS, tel que représenté sur la figure 2. Pour que ces nœuds intermédiaires, sorte de routeurs mobiles, puissent relayer efficacement le trafic, il faut qu'un chemin (généralement bidirectionnel et choisi selon des métriques données) entre la source et la destination leur soit connues. Le choix des

nœuds relayeurs sera en constante évolution au fur et à mesure que le mouvement des nœuds engendre des variations dans la qualité des liens⁶ constituant le chemin, jusqu'à parfois la rupture. Le *scheduling* et les protocoles de routage devront alors continuellement s'adapter aux coupures des liens et donc à la topologie du MANET. De plus, le maintien à l'échelle d'informations à jour sur la topologie peut facilement surcharger le réseau et engendrer des instabilités (Broch et al., 1998), une approche similaire au réseau classique n'est donc pas efficace.

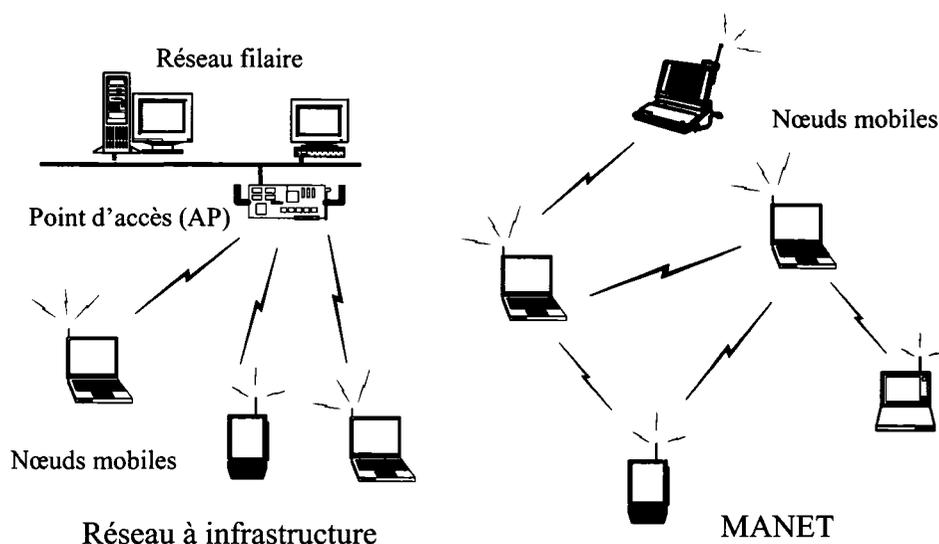


Figure 1 Topologies d'un réseau à infrastructure et d'un MANET

Avant de revenir, dans les prochaines sections, sur les réseaux sans fils classiques, nous détaillerons ici les particularités et les problèmes spécifiques des réseaux ad-hoc. Commençons par tracer de façon générale les principaux éléments qui caractérisent les MANETs :

- Nœuds mobiles
 - Variation de la connectivité.

⁶ Connexions entre deux nœuds voisins

- Changements « aléatoires » et « imprévisibles » de la topologie.
- Limitation de l'énergie disponible (batterie).
- Limitation des capacités de calcul (CPU et quantité de mémoire).
- Propagation sans fil
 - Limitation de la bande passante.
 - Complexité du *scheduling*.
 - Complexité de la mise en place de la sécurité.
- Système décentralisé
 - Problèmes particuliers (stations cachées et exposées).
 - Complexité du routage.
 - Impossibilité de mettre en place un plan local d'allocation des fréquences, problèmes de réutilisation spatiale.
 - Interchangeabilité des nœuds et absence d'équipement dédié au routage.
 - Faible sécurité globale.

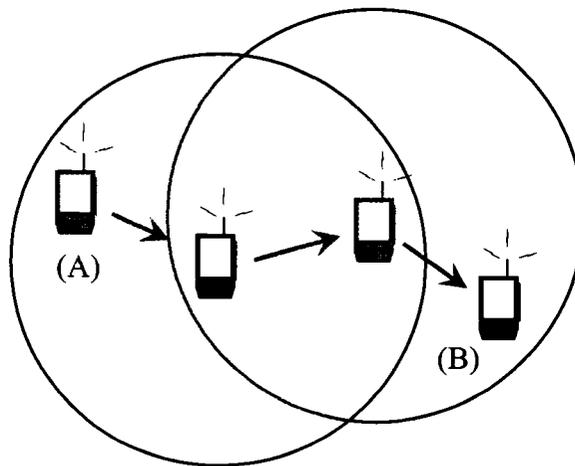


Figure 2 Exemple de relais de trafic entre deux nœuds (A) et (B)

Il est à noter que les réseaux ad-hoc sont décrits et étudiés par le groupe de travail MANET de l'*Internet Engineering Task Force* (IETF). Une définition formelle de ces réseaux est donnée dans la RFC 2501 (Corson).

Le plus souvent, nous n'aborderons les technologies, protocoles et concepts, que de façon générale et très incomplète, en nous focalisant principalement sur les aspects qui nous intéressent. Le lecteur pourra se référer aux ouvrages suivants pour compléter toute lacune de notre part (AlAgha et al., 2001; Tanenbaum, 2003; Yazbeck, 2003; Kadoch, 2004; Murthy et al., 2004).

1.2 Retour sur les réseaux sans fils

Le domaine de développement des sans fils est très actif, il en résulte des technologies hétérogènes et très diversifiées. Dans cette section, nous survolerons les principales technologies de communication sans fil ; nous nous concentrerons sur celles permettant un mode ad-hoc.

Le développement des 3G permet une connexion grand public à haut débit avec les WAN (*Wide Area Network*) à travers l'infrastructure MAN (*Metropolitan Area Network*) et WMAN (*Wireless MAN*) d'un opérateur sans fil. Les technologies 802.11 permettent la création de WLAN à haut débit et une connexion avec les services des WAN et d'Internet. Pour des utilisations à plus courte portée, des technologies tel que Bluetooth, peu gourmandes en énergie, permettent de remplacer les connexions filaires et donner ainsi plus de flexibilité et d'interconnexion entre des équipements personnels (PDA, ordinateurs, cellulaire, imprimante, souris, etc ...).

L'utilisation de fréquences libres (sans besoin d'autorisation) dans le cas de 802.11 et du Bluetooth a été un élément déterminant dans la diffusion des réseaux WLAN et WPAN (*Wireless Personal Area Networks*). Les fréquences dites Industriel-Scientifique-

Médical (ISM) dans la bande des 2.4GHz et 5GHz sont, libres, ou en voie de libéralisation, dans la plupart des pays.

La convergence de l'informatique mobile et de la téléphonie dans les technologies cellulaires de quatrième génération permettront une grande flexibilité et une utilisation très facile. Les réseaux cellulaires de quatrième génération (4G), sont pressentis pour être une convergence entre les réseaux de troisième génération (3G) (CDMA2000 et UMTS) et certaine technologie radio avec pour objectif de fournir un service sans interruption de haute qualité et proposant un débit important. Une de ces intégrations est de fournir des capacités de communication ad-hoc comme le montre la figure 3. Un grand nombre de publications traitent de ce sujet (Gavrilovska, 2005; Meraihi, 2005).

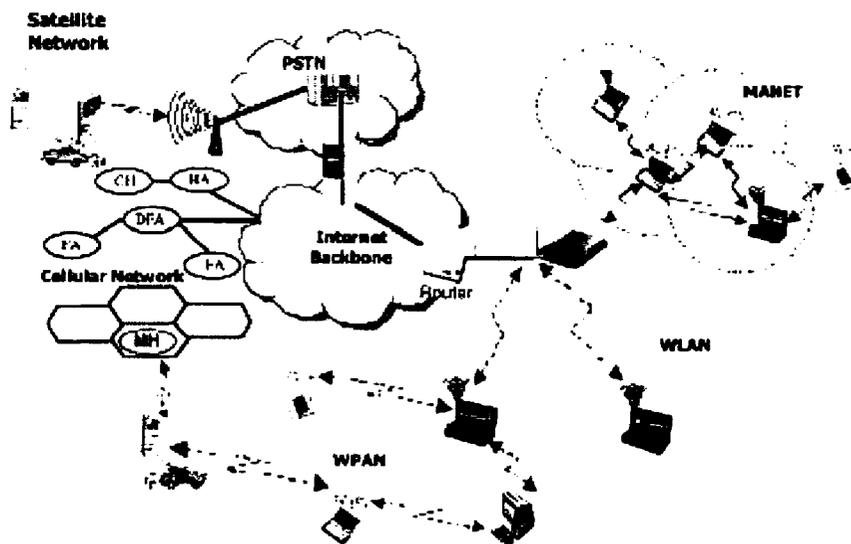


Figure 3 Réseau 4G
(Meraihi, 2005)

Les principaux groupes de travail sur les WLAN et WPAN sont, aux Etats-Unis, les groupes 802.11 et 802.15, et en Europe, le groupe HyperLAN. HyperLAN 1 et

HyperLAN 2, pendant européen de la norme 802.11 n'ont jamais dépassé l'étape de prototypes et n'ont jamais été commercialisés à grande échelle.

Dans les prochaines sections nous présenterons les technologies 802.11 et Bluetooth.

1.2.1 La norme 802.11

L'architecture classique d'un réseau 802.11, illustrée dans la figure 4, est articulée autour du BSS (*Basic Service Set*), correspondant à la cellule, contrôlée par un point d'accès (*Access Point*, AP). Tout trafic de la cellule transite par le AP qui sert, dans le BSS, d'unique relais du trafic de tout nœud de la cellule. Un IBSS (*Independent Basic Service Set*) est une cellule en mode ad-hoc, elle est dépourvue de point d'accès et donc de gestion centralisée. Plusieurs BSS et/ou IBSS forment un ESS (*Extended Service Set*)

Deux méthodes d'accès fondamentalement différentes sont disponibles : les modes PCF (*Point Coordination Function*) et DCF (*Distributed Coordination Function*). La première méthode permet une certaine QoS, compatible avec les applications de types temps réel, puisqu'elle est basée sur une interrogation périodique des nœuds par le AP, donc une gestion centralisée de l'accès au medium. La seconde méthode, plutôt de type *best effort*, est basée sur une chance égale à tous les nœuds d'accéder au AP, et permet surtout un meilleur taux d'utilisation du canal.

Un réseau classique IEEE 802.11 utilise généralement à la fois les modes DCF et PCF tandis que le DCF doit être utilisé dans un IBSS. Dans le mode DCF, l'accès au canal est régulé par le protocole CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) dont certains aspects de fonctionnement seront détaillés dans la section 1.3.2.1.

Une explication détaillée des couches physiques et MAC des différentes technologies 802.11 (802.11a, 802.11b, 802.11g, etc...) est disponible dans la spécification ANSI/IEEE (2003) et dans AlAgha et al. (2001) et Tanenbaum (2003).

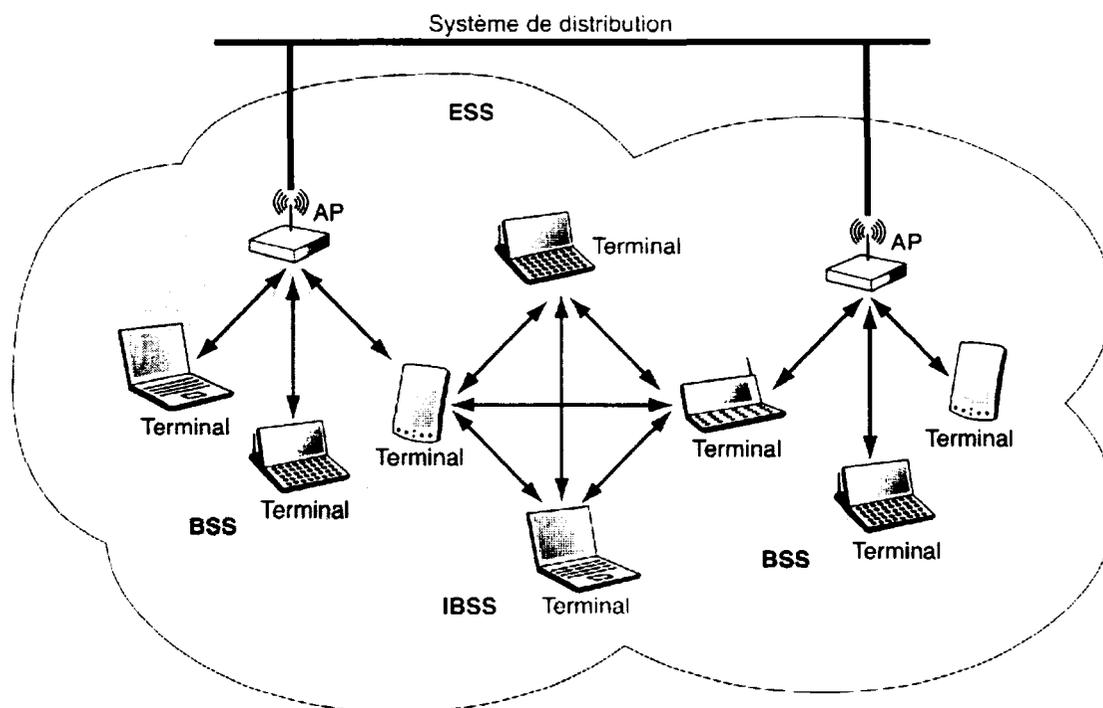


Figure 4 Exemple d'un ESS
(AlAgha et al., 2001)

1.2.2 Le Bluetooth

Le standard Bluetooth a d'abord été initié par Ericsson, en 1994, puis poursuivi par le groupe de travail Bluetooth SIG (*Bluetooth Special Interest Group*) en 1998. Le Bluetooth SIG réunit plusieurs industriels de premier plan⁷ et a publié la première spécification de Bluetooth, version 1.0, en 1999. Le groupe de travail IEEE 802.15 a pris

⁷ Ericsson, IBM, Intel, Nokia, Toshiba, ...

en considération les spécifications de Bluetooth pour les rendre compatibles avec le standard WPAN (*Wireless Personal Area Network*).

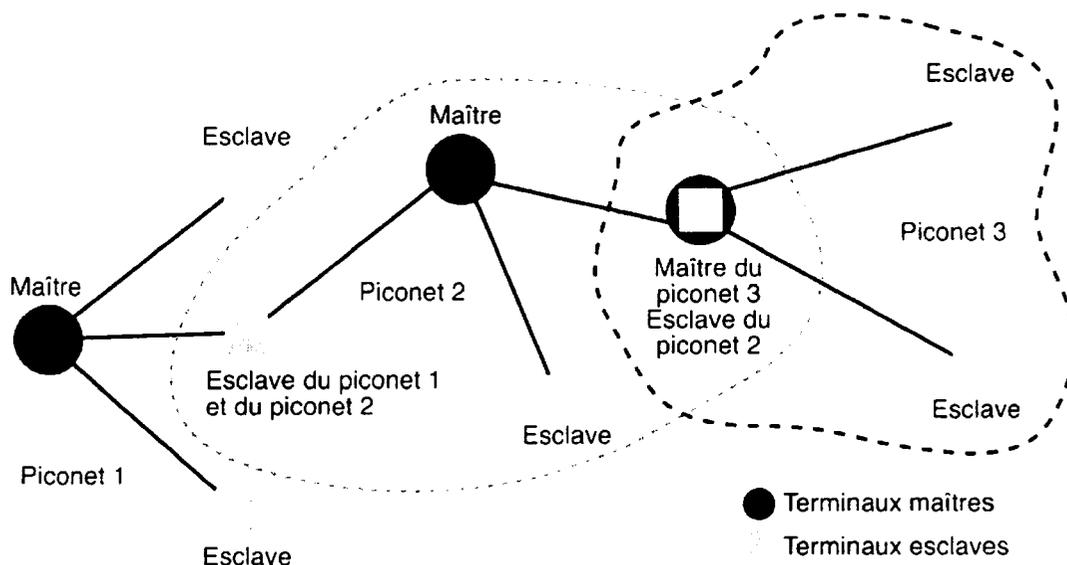


Figure 5 Exemple d'un scatternet
(AlAgha et al., 2001)

Les équipements Bluetooth peuvent former des micro-réseaux, sur quelques dizaines de mètres, appelés « piconet » et constitués d'un « maître » et d'un maximum de sept « esclaves ». Ces réseaux font partie des PAN (*Personal Area Network*). Chaque équipement Bluetooth détient une adresse Bluetooth unique et une horloge interne. Un équipement peut être soit maître (*master*), soit esclave (*slave*). Un piconet est construit autour d'un maître et peut contenir jusqu'à sept esclaves qui communiquent à travers un lien *full-duplex* avec le maître. Le maître permet un contrôle canalisé du piconet et a en charge la répartition des fréquences et des temps. Il sert aussi de relais pour le trafic entre deux esclaves, ceux-ci n'ont donc pas de lien direct. Tous les équipements d'un piconet adhèrent au même *frequency hopping* et *timing* fournis par le maître. Plusieurs piconets peuvent être reliés pour former un « scatternet », dans ce cas, un nœud

appartiendra à plusieurs piconets, figure 5. Pour cela, le maître ou l'esclave d'un piconet doit être esclave d'un ou plusieurs autres piconets, un équipement ne pouvant pas être maître dans deux piconets.

Une description plus détaillée est disponible dans AlAgha et al. (2001) et Tanenbaum (2003).

1.3 Particularités des couches dans les réseaux ad-hoc

Dans cette section, nous présenterons les spécificités et particularités des différentes couches de communication dans un environnement ad-hoc.

1.3.1 La couche physique

Il n'est pas question ici d'effectuer une étude approfondie de la couche physique, d'autant plus qu'une variété de technologies différentes ont été proposées pour les ad-hoc. Une présentation plus détaillée se trouve dans Karnik et al. (2000), Takai et al. (2001), Bradic et al. (2003), Boulmalf et al. (2004) et Murthy et al. (2004).

Le canal de transmission peut être modélisé par le schéma de la figure 6. Le codage de source correspond à la numérisation et compression. Le codage de canal inclut le codage, le transcodage, le cryptage et le brouillage.

Le canal de propagation peut être modélisé par le schéma de la figure 7. Le bruit peut être soit externe soit interne. Le premier cas correspond aux perturbations électromagnétiques soit causées par des dispositifs créés par l'homme, soit naturel (bruit atmosphérique, bruit cosmique, etc.). Le bruit interne correspond aux bruits thermiques, de grenaille et de quantification. Le bruit interne étant dû à de nombreuses sources indépendantes, il est généralement considéré additif, blanc et gaussien. Une explication

plus détaillé de ces éléments peut être consultée dans (CNAM). Les distorsions sont principalement dues à des non linéarités d'amplification, à l'intermodulation entre signaux et co-canal ainsi qu'aux effets de la propagation (atténuations grande et petite échelle). La puissance du signal reçu, le rapport signal à bruit (*Signal to Noise Ratio*, SNR) et le taux d'erreur binaire (*Bit Error Rate*, BER) sont souvent considérés comme étant de bons indicateurs de la qualité d'une connexion. Le choix de la modulation et du codage canal ont une influence considérable sur le débit admissible pour un niveau de bruit donné, comme le montre le Tableau I, qui illustre le débit théorique et le taux de codage pour les modulations les plus répandues. Sur la figure 8, nous pouvons voir que lorsque la couche physique le permet, différentes modulations peuvent être utilisées à travers un *Link Adaptation* (LA) ce qui permet d'utiliser, à chaque instant, la modulation la plus performante pour maximiser le débit.

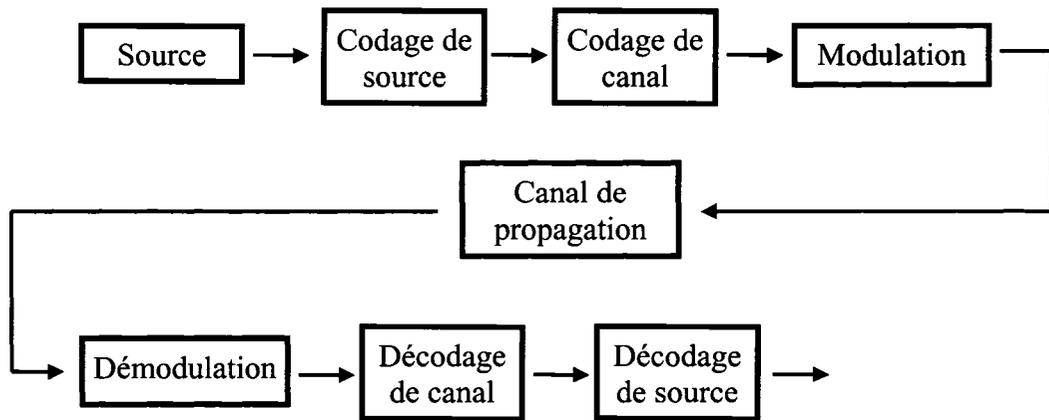


Figure 6 Modèle de canal de transmission

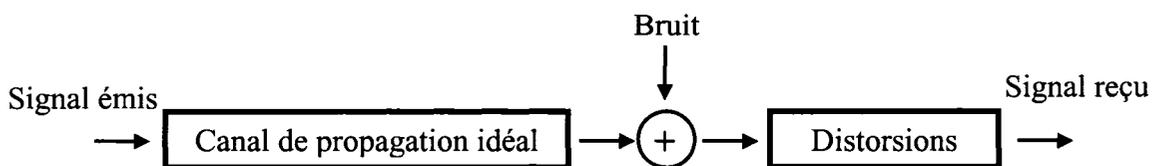


Figure 7 Modèle de canal de propagation

Tableau I

Débit théorique et taux de codage pour différentes modulations d'un système IEEE 802.11x
(Weiss et al., 2003)

Data rate (Mbit/s)	Modulation	Coding rate (R)	Data Bits per Symbol
6	BPSK	1/2	24
9	BPSK	3/4	36
12	QPSK	1/2	48
18	QPSK	3/4	72
24	16-QAM	1/2	96
36	16-QAM	3/4	144
48	64-QAM	2/3	192
54	64-QAM	3/4	216

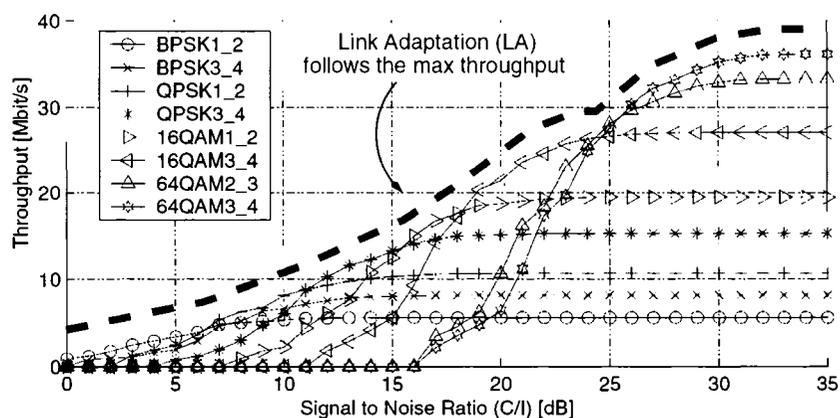


Figure 8 Débit admissible de différentes modulations en fonction du SNR
(Weiss et al., 2003)

De nombreuses technologies et optimisations de couche physique existent et leurs performances sont variables en fonction du lien radio. Les paramètres de certaines couches physiques peuvent être adaptés suivant les conditions estimées du canal radio. Le standard IEEE 802.11x possède une couche physique de ce type. En revanche, comme l'illustre la figure 9, deux types de cartes 802.11 testés dans des conditions similaires présentent des performances très différentes (puissance du signal reçu en

fonction de la distance). La figure 10 illustre le débit en fonction de la distance pour plusieurs routeurs 802.11. Ces tests ont été menés par Martin Gauthier à l'ÉTS en 2005.

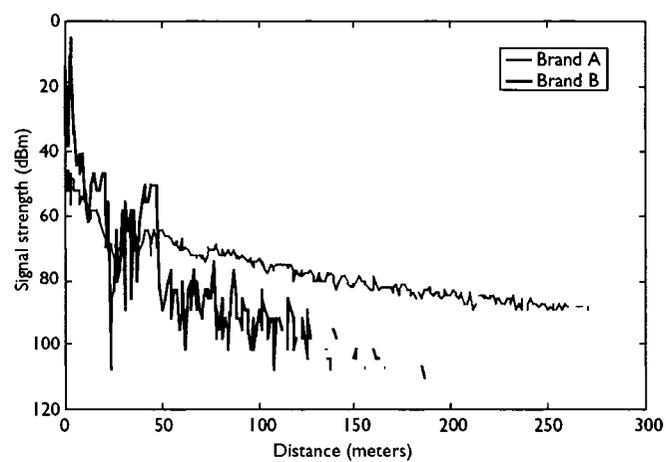


Figure 9 Puissance du signal reçu fonction de la distance pour deux types de carte sans fil IEEE 802.11 (Gaertner et al., 2004)

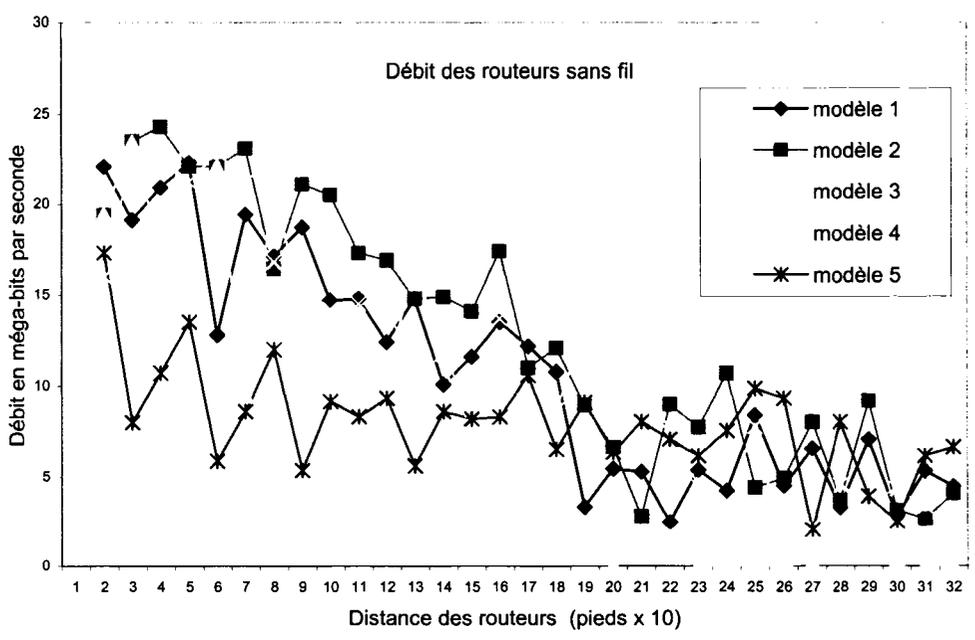


Figure 10 Débit fonction de la distance pour plusieurs types de routeurs 802.11

La communication entre deux équipements n'est pas binaire (possible/impossible). Elle varie, en terme de débit, graduellement avec la distance entre une communication excellente à une communication impossible, illustrée sur la figure 11 pour les standards IEEE 802.11a et IEEE 802.11b. Une communication est considérée impossible si le plus faible débit correspondant à la plus simple modulation ne permet pas la transmission de donnée. Cependant, dans cette situation, la porteuse reste détectable sur une certaine distance qu'on appelle zone grise, figure 12. Dans cette zone, des nœuds utilisant les mêmes canaux logiques vont plus ou moins interférer, entraînant des erreurs de réception.

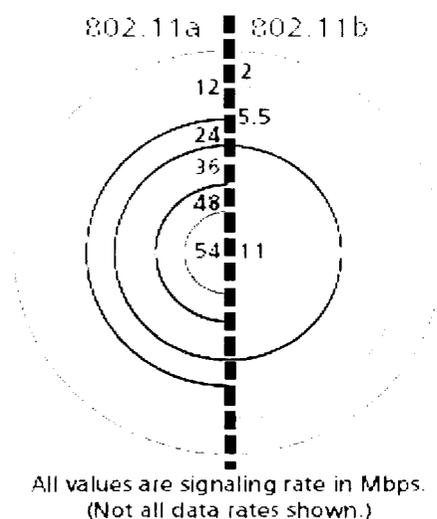


Figure 11 Variation du débit avec la distance
(Proxim, 2003)

A partir de ces éléments, nous ne considérerons pas dans notre approche les caractéristiques de la couche physique ni l'effet du bruit sur la puissance du signal reçu, d'autant plus que certaines technologies permettent d'estimer le niveau de bruit, d'en compenser l'effet et ainsi d'augmenter la robustesse du système .



Figure 12 Zone de communication et zone grise

1.3.2 La couche MAC et le scheduling

Dans les réseaux MANET, l'accès au médium et la problématique du *scheduling* dont s'occupe la couche MAC est le premier trait d'union entre la couche physique et les couches supérieures. Dans cette section, nous aborderons les principaux problèmes qui se posent dans le cas des réseaux ad-hoc et exposerons les points à considérer lors du développement des protocoles de la couche MAC ainsi que les contraintes auxquelles sont exposés ces protocoles.

1.3.2.1 Problèmes particuliers de la couche Mac dans le cas des MANETs

Dans un réseau sans fil, l'atténuation importante du signal avec la distance empêche la détection des collisions lors de l'émission (mécanisme *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*, CSMA/CD). Le mécanisme le plus utilisé, notamment dans le 802.11, est donc basé sur le CSMA/CA. Dans ce mécanisme, une station évite les collisions en s'assurant que le canal est libre avant de commencer d'émettre. Si le canal est libre, la station attend un intervalle de temps aléatoire avant de commencer la transmission. Sur réception d'une communication réussie, un nœud envoie un

acquiescement. La non réception d'un acquiescement permet donc à la station émettrice de détecter toute collision. Les fonctionnements que nous décrivons ici et que nous détaillerons dans les prochains paragraphes correspondent aux protocoles MACA⁸, MACAW⁹ et FAMA¹⁰.

Les réseaux ad-hoc mobiles sont caractérisés par deux problèmes très spécifiques : les stations cachées et les stations exposées. Dans certains cas et suivant le protocole utilisé, les problèmes des stations cachées et stations exposées peuvent générer des situations de *false blocking* ou des situations de *temporary deadlock*.

Sur la figure 13, A et C sont des stations cachées l'une de l'autre. La transmission de A à B d'une part et de C à D d'autre part provoque des collisions sur B et D. Les stations A et C n'ont aucun moyen de les anticiper puisqu'elles sont trop éloignées pour recevoir le signal l'une de l'autre.

Sur la figure 14, C est une station *sender-exposed* et D est une station *receiver-exposed*. Les transmissions de B à A d'une part et de C à D d'autre part, n'entraîneraient aucune collision. Pour autant, C voyant que B est en transmission va choisir de ne pas émettre vers D. C n'a en effet aucun moyen de savoir que la transmission qu'il veut engager avec D n'entraînerait pas de collision.

⁸ *Medium Access Collision Avoidance* (Karn, 1990)

⁹ *Multiple Access Collision Avoidance protocol for Wireless LANs* (Bharghavan et al., 1994)

¹⁰ *Floor Acquisition Multiple Access* (Garcia-Luna-Aceves et al., 1999)

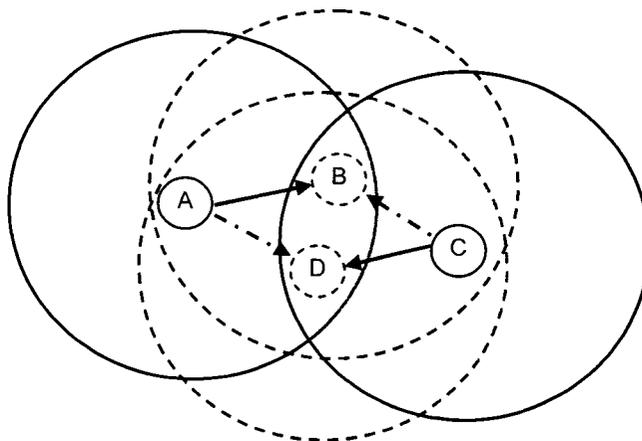


Figure 13 Problème des stations cachées

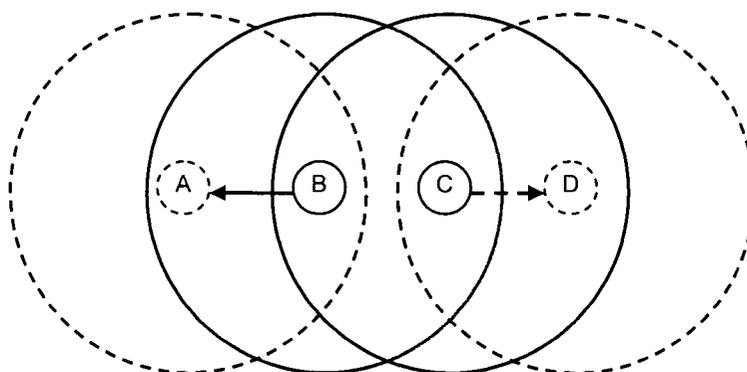


Figure 14 Problème des stations exposées

La méthode la plus répandue pour résoudre le problème des stations cachées, utilisée notamment dans le 802.11, est l'utilisation des RTS/CTS (*Request to Send/Clear To Send*), illustrée sur la figure 15. Dans ces conditions, le nœud A envoie un CTS au nœud B lui demandant la permission d'émettre, si aucune transmission n'est en cours dans le voisinage de B, celui-ci répondra par un CTS vers A, l'invitant à commencer la transmission. La non réception d'un CTS informera la station A de l'impossibilité d'une communication avec B. Le RTS de A est reçu par D, et le CTS de B est reçu par C et D, ces deux stations alors informées de la communication entre A et B attendront qu'elle

soit finie avant de commencer leur transmission. Il est à noter que les RTS et CTS sont des trames de petites tailles (respectivement 20 et 14 octets) alors qu'une trame de données peut avoir une longueur de 2300 octets, la probabilité d'une collision est donc largement plus faible sur un RTS ou un CTS que sur un paquet de donnée. L'utilisation de RTS/CTS introduit cependant de la congestion dans les réseaux ad-hoc comme l'ont montré Ray et al. (Ray et al., 2003).

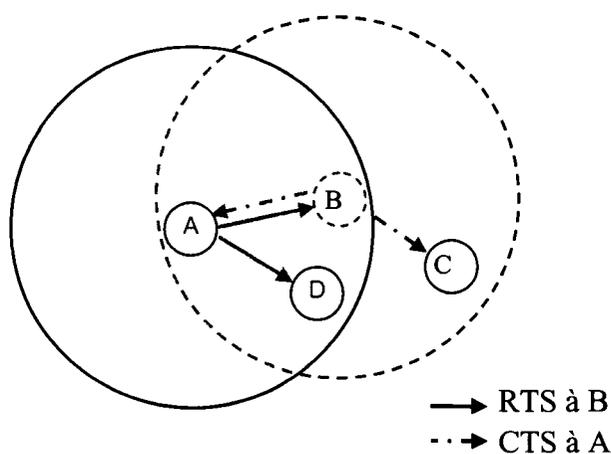


Figure 15 Utilisation du RTS/CTS

Sur la figure 16, E est une station *falsely blocked*. Cette situation découle de l'utilisation de RTS/CTS et du problème des stations cachés (D est caché de E) et de celui des stations exposées (F est *sender-exposed* et E est *receiver-exposed* de C). La transmission de A à B empêche D de transmettre un CTS à C et l'envoi du RTS de C empêche E d'envoyer un CTS à F puisqu'il ne sait pas si D a envoyé un CTS à C. Cette situation de blocage ne durera pas longtemps mais entraînera une sous utilisation du réseau.

La situation de *temporary dead lock*, qu'illustre la figure 17, survient lorsque les stations cachées et les stations exposées entraînent momentanément une boucle de blocage. La transmission (1) empêche E d'envoyer un CTS à D. La transmission (2) empêche G d'envoyer un CTS à F. La transmission (3) empêche C d'envoyer un CTS à B. La

situation se déblocuera après avoir engendré un ou plusieurs retards. La probabilité que de telle situation surviennent augmente avec le mouvement des nœuds.

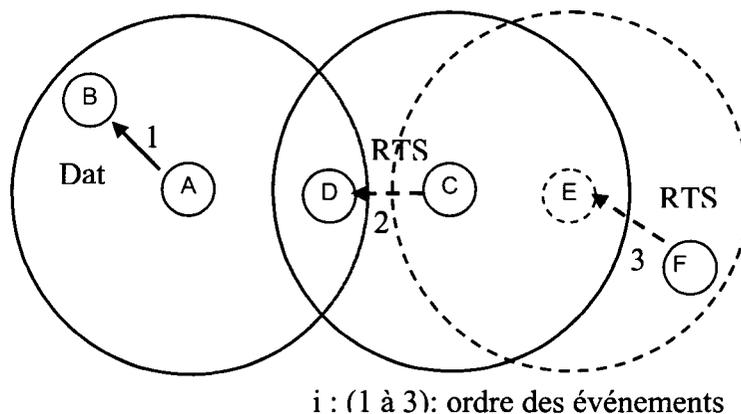


Figure 16 Exemple de false blocking

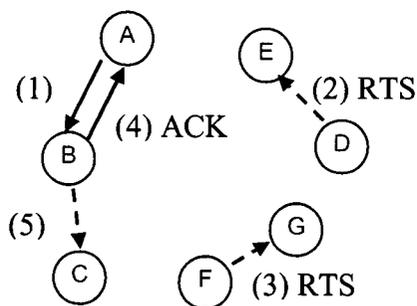


Figure 17 Exemple de temporary dead lock

Les cas précédents ne sont que des exemples de ces différents types de problèmes, de nombreuses autres situations semblables auraient pu être utilisées pour les illustrer.

Les problèmes que nous avons cités jusqu'à présent concernent le cas dans lequel un seul canal physique est disponible pour tous les nœuds ou lorsque des canaux logiques différents sont partagés par différents nœuds. Dans les réseaux sans fils modernes, le canal physique, qui correspond à la bande passante totale disponible est séparé en

différents canaux logiques, qui sont virtuellement créés en découpant, au cours du temps, la bande passante en différentes parties indépendantes.

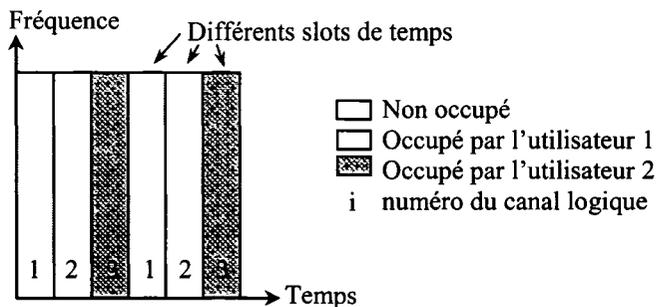


Figure 18 Le TDMA

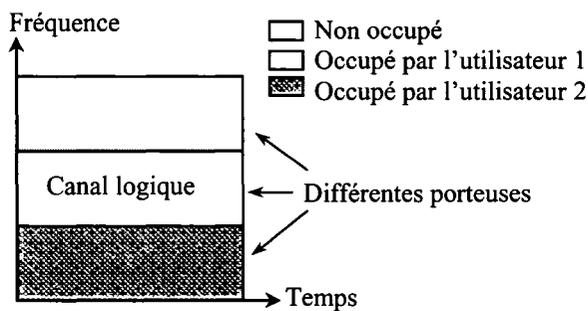


Figure 19 Le FDMA

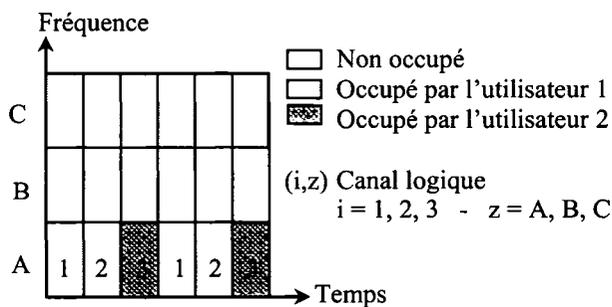


Figure 20 Combinaison des modes FDMA et TDMA

En effet, le canal physique peut être séparé en plusieurs canaux logiques (mediums), à travers plusieurs mécanismes qui divisent l'espace temps-fréquences en différentes parties. Dans le mode *Time Division Multiple Access* (TDMA), figure 18, le temps est divisé en unités temporelles (*slots*) que se répartissent les utilisateurs. Chaque utilisateur utilise donc la totalité de la bande passante pendant un certain temps. Dans le mode *Frequency Division Multiple Access* (FDMA), figure 19, la bande passante est divisée en plusieurs intervalles de fréquence que se répartissent les utilisateurs. Chaque utilisateur utilise alors une de ces bandes durant la totalité de sa transmission. Sur la figure 20, les modes FDMA et TDMA ont été combinés, ce qui offre une plus grande souplesse d'utilisation. Un *slot* temps-fréquence est alors alloué à chaque utilisateur.

Les perturbations et interférences sont généralement concentrées sur certaines bandes étroites de fréquences. A partir de ce constat, plusieurs approches sont possibles pour diminuer l'effet des perturbations sur le signal :

Dans le mode *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), figure 21, un utilisateur répartit sa transmission sur différentes bandes de fréquences couvrant la totalité de la bande passante pendant un certain laps de temps. En répartissant la transmission d'une communication sur plusieurs bandes de fréquences différentes, l'effet de ces perturbations sur le signal est amoindri, ce qui diminue le nombre d'erreurs de transmission.

Dans les modes *Code Division Multiple Access* (CDMA) et *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS), figure 22, un utilisateur encode son trafic et le transmet sur la totalité de la bande passante. Si les codes utilisés sont orthogonaux, les différents trafics ne seront pas affectés par les autres utilisateurs. Dans le mode *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS), figure 23, la transmission entre deux utilisateurs passe d'une bande de fréquence à l'autre suivant une suite pseudo-aléatoire connue de l'émetteur et du récepteur.

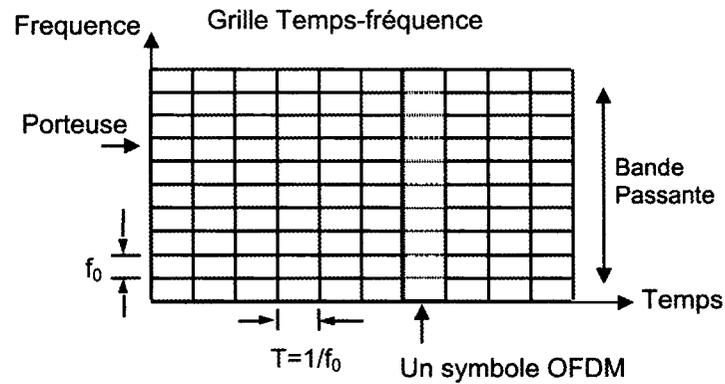
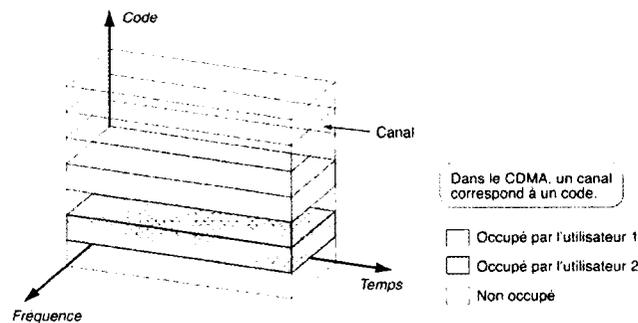


Figure 21 L'OFDM

Si plusieurs nœuds peuvent transmettre sur un même canal logique, celui-ci présentera les mêmes problèmes, de station cachée et station exposée, que nous avons abordés au début de cette section.

Figure 22 Le CDMA
(AlAgha et al., 2001)

Lorsqu'un nœud peut simultanément transmettre sur plusieurs canaux logiques et qu'il a plusieurs trames à émettre, un *scheduling* est nécessaire. Le *scheduling* est le choix d'un

couple trame-canal, qui correspond à un choix dans l'ordre de transmission des trames ainsi que la sélection du canal à utiliser pour chaque transmission.

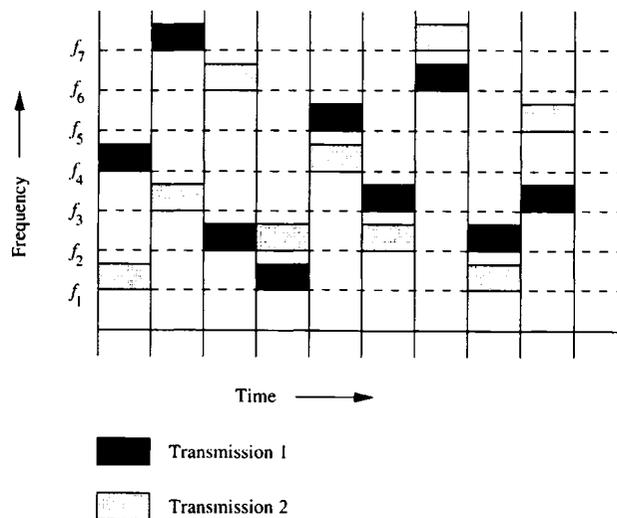


Figure 23 Le FHSS
(Murthy et al., 2004)

Le *scheduling* dans les réseaux ad-hoc est d'autant plus important qu'il est complexe à mettre en œuvre dans un environnement décentralisé dans lequel la connectivité entre les nœuds est en constante variation.

Il serait possible, à travers une approche cross layer, de contourner les différents problèmes posés. Dans ces conditions, des informations disponibles au niveau de la couche physique seront utilisées par la couche MAC pour améliorer le *scheduling* et diminuer les risques de collisions. Les décisions prises seront alors plus en phase avec l'état du réseau.

1.3.2.2 Protocoles de la couche MAC pour les MANETs

Le rôle premier de la couche MAC est la distribution (équitable) de l'accès au canal. Plus encore que pour tout autre type de réseaux, la performance d'un MANET repose, avant tout, sur celles de la couche MAC.

Dans le cas de MANETs, les éléments à considérer pour la couche MAC peuvent être résumés comme suit :

- Système totalement décentralisé :
 - Problème de stations cachées (*Hidden terminals*).
 - Problème de stations exposées (*Exposed terminals*).
- Synchronisation dans l'utilisation des ressources :
 - Limiter les collisions.
 - Maximiser le débit sur un lien.
 - Minimiser les délais de transmission.
- Mesure de la disponibilité des ressources pour une utilisation équitable de ces dernières en terme de :
 - Bande passante.
 - Temps d'accès.
 - QoS.
- Contrôle de la puissance d'émission.
 - Limiter la consommation.
 - Diminuer les interférences inter-nœud.

A partir de ces considérations générales découlent des contraintes lors de l'élaboration d'un protocole de la couche MAC. Chaque protocole entend répondre à un certain

nombre d'entre elles. Il est généralement admis dans la littérature que ces contraintes peuvent être résumées comme suit :

- Fonctionnement distribué et possibilité de mise à l'échelle (*scalability*).
- Possibilité d'offrir la QoS nécessaire.
- Temps d'accès raisonnable.
- Bande passante utilisée de manière optimale.
- Partage équitable d'un canal logique entre les différents nœuds qui l'utilisent.
- Trafic de contrôle minimum.
- Impact limité des stations cachées et exposées.
- Mécanismes de contrôle d'énergie.
- Taux de transmission adaptable à la configuration du réseau à proximité d'un nœud émetteur.
- Mécanisme de synchronisation pour la réservation des canaux logiques.

Deux approches différentes pour les protocoles d'accès au medium peuvent être utilisées :

- *Schedule-based*, dans lesquelles une réservation, statique ou dynamique, est effectuée pour les transmissions de chaque utilisateur.
- *Contention-based*, dans lesquelles les stations sont en concurrence pour prendre possession du medium. La plupart des protocoles proposés tombent dans cette catégorie.

Des analyses détaillées de la trentaine de protocoles de la couche MAC existant pour les réseaux ad-hoc sont données dans Jurdak et al. (2004), Murthy et al. (2004), Zielinski (2005) et Wu (2006).

1.3.3 La couche réseau et le routage

Dans le cas de réseaux multi-sauts (cas NLOS), le trafic entre source et destination a besoin d'être relayé, retransmis de proche en proche ou « routé », par des nœuds intermédiaires.

Le routage dans les réseaux ad-hoc peut avoir une signification légèrement différente de celle des réseaux classiques. Dans un réseau classique, un routeur compare l'adresse de destination d'un paquet avec sa table de routage et détermine ainsi le prochain nœud à qui il doit « router » le paquet en question. La table de routage est construite grâce à un algorithme qui minimise un ensemble de métriques à partir d'informations qu'il possède du réseau. Un protocole de routage dépend donc du fonctionnement de l'algorithme et des métriques considérées. Dans un réseau ad-hoc, le routage peut être proactif, ayant alors un fonctionnement semblable au cas des réseaux classiques, ou réactif et englobe alors une étape de recherche de chemin, comme nous le verrons par la suite. Il est donc important de garder à l'esprit que la définition du routage dans un réseau ad-hoc est, à cause de la nature même de ces réseaux, plus souple que dans un réseau classique. Nous détaillerons dans les sections qui suivent certains aspects importants du routage dans le cadre des réseaux ad-hoc et MANET.

1.3.3.1 Problèmes particuliers du routage dans le cas des MANETs

Le routage dans le cadre des MANETs présente certaines particularités et doit faire face à des problèmes spécifiques qui rendent leur élaboration plus problématique que dans le cas de réseaux classiques :

- La mobilité des nœuds entraîne :
 - Une variation constante de la connectivité et donc de la topologie du réseau.

- Des contraintes physiques (en taille et poids) des équipements. Ceci a pour effet une limitation de certaines ressources telle que l'énergie (durée de vie de la batterie), la capacité de calcul, la taille de mémoire, etc.
- L'utilisation exclusive des liens sans fil induit une limitation de la bande passante sur l'ensemble du réseau ce qui ajoute une contrainte supplémentaire pour le maintien d'informations topologiques à jour. Ce trafic de contrôle devra utiliser au minimum la bande passante.
- La variation au cours du temps des caractéristiques des liens, tel que leur capacité (débit maximal) ou leur taux de perte de paquets (*Packet Loss Rate* PLR), engendre une modification constante de la meilleure route pour les mêmes métriques.
- La qualité de la connexion, et même dans une certaine mesure, la possibilité de maintenir la connexion, entre deux nœuds dépend non seulement des caractéristiques du canal radio entre eux, mais aussi de la présence ou non d'émissions par les nœuds voisins (problèmes de stations cachées et stations exposés). L'incapacité d'un nœud exposé à transmettre est en effet uniquement due à une transmission en cours d'un autre nœud et ceci indépendamment des caractéristiques du lien radio qu'il possède avec ses nœuds voisins. La valeur de certaines métriques d'un lien entre deux nœuds dépend donc non seulement des caractéristiques du canal radio qui les relie, mais aussi des transmissions qui se produisent dans le voisinage. On voit donc que quelque soit le protocole considéré, celui-ci peut avoir des résultats différents pour la même matrice de connectivité dépendamment du moment auquel telle ou telle transmission est effectuée. Ce problème s'aggrave dans le cas des réseaux à forte densité en nœuds et en trafic.
- Des informations globales sur le réseau peuvent être nécessaires pour une utilisation efficace du protocole de routage, ce qui est fondamentalement peu compatible avec une approche ad-hoc.

1.3.3.2 Protocoles de routage pour les MANETs

De nombreuses techniques de routage existent qui peuvent être classées suivant plusieurs critères. Un protocole de routage donné présente une caractéristique particulière pour un critère donné. L'efficacité d'un protocole dans des conditions données et l'impact que peuvent avoir des choix particuliers au niveau des couches inférieures sur le routage varient d'un protocole de routage à l'autre. Tous les protocoles de routages ad-hoc sont compatibles et souvent même basés sur le protocole IP qui présente l'avantage de faciliter l'interconnexion avec les réseaux classiques.

Un protocole de routage ad-hoc devrait donc avoir les caractéristiques suivantes :

- Être totalement distribué et faire en sorte qu'un nombre minimum de nœuds soient impliqués dans le processus de choix et de maintenance des routes.
- Avoir une capacité d'adaptation aux changements fréquents de topologie.
- Pouvoir rapidement converger vers des routes optimales lorsque le système est stable et transite une charge de trafic raisonnable.
- Respecter les contraintes de différents nœuds (puissance de calcul et niveau de batterie).
- Assurer un certain niveau de QoS en fonction de l'application considérée.

Plusieurs critères peuvent être considérés pour la classification des quelques 80 protocoles de routage proposés (Wikipedia, 2006), les différents protocoles ainsi que les critères de classifications sont largement exposés dans de nombreuses publications (Corson, ; Rajaraman et al., ; Johansson et al., 1999; Mauve et al., 2001; Safwat et al., 2002; Xiaoyan et al., 2002; Sheltami, 2003; Li et al., 2004; Murthy et al., 2004; Yih-Chun et al., 2004; Adibi et al., 2006).

Les protocoles de routages sont globalement classifiés d'après les critères suivants :

- Méthode de routage
 - Proactif (*proactive* ou *Table driven*) : Chaque nœud maintient une table de routage à jour à travers le traitement d'information sur la topologie reçue périodiquement.
 - Réactif (*reactive* ou *On-demand*) : Au lieu d'échanges périodiques d'informations sur la topologie, le chemin vers un nœud destinataire est obtenu, lorsque nécessaire, à travers une recherche de chemin.
 - Hybride (*hybrid*) : Les méthodes proactives sont généralement plus rapides que les méthodes réactives mais ont besoin de l'échange de plus d'informations de routage. Pour combiner les qualités de ces deux méthodes, une approche proactive est utilisée dans le voisinage de chaque nœud et une méthode réactive est utilisée pour l'acheminement du trafic vers les nœuds distants.
- Type d'information utilisée pour le choix du chemin
 - Informations actuelles et/ou passées : dans ce cas, l'état actuel des liens est utilisé pour le choix des chemins.
 - Information prédites : dans ce cas, l'état des liens est prédit et cette information est utilisées pour la sélection des chemins. Il peut y avoir combinaison d'informations passées, présentes et prédites pour le choix.
- D'après une organisation topologique
 - Routage plat (*flat topology routing*) : pour lequel tous les nœuds sont égaux. L'adressage des nœuds est alors unique et global (ex. un LAN).
 - Routage hiérarchique (*hierarchical topology routing*) : Les nœuds peuvent avoir des rôles variables. Il en découle un adressage logique qui dépend de la position dans le réseau (ex. plusieurs LANs interconnectés).
- Avec l'utilisation d'informations particulières

- Économie de batterie (*power-aware routing*) : vise globalement à minimiser la consommation d'énergie sur le réseau.
- Information géographique (*geographical information assisted routing*) : Des informations géographiques sont utilisés pour améliorer le routage et diminuer le trafic de contrôle.
- Information de relais des paquets
 - Chaque nœud n'a connaissance que du prochain saut (*Next hop routing*)
 - Le paquet contient le chemin entier (*Source routing*)
- Méthode de maintenance des routes
 - Après ou avant que le bris ne survienne (modèles classiques et prédictifs).
 - Local à la zone de bris ou de bout en bout entre émetteur et récepteur.

1.4 Approches particulières des réseaux ad-hoc

Dans les sections qui suivent, nous aborderons des thèmes et des architectures de grand intérêt dans le cas des réseaux ad-hoc. Ces sujets sont au cœur d'un important travail de recherche actuel et sont la source de nombreuses publications.

1.4.1 La notion de cluster

La notion de *cluster* correspond à la répartition des nœuds du réseau en plusieurs groupes (appelés *clusters*) et ayant chacun un nœud privilégié (un *clusterhead*). Sur la figure 24, nous pouvons voir une représentation d'une telle architecture. Le nœud dominant d'un *cluster* (le *clusterhead*) est en charge du fonctionnement du *cluster*, ses fonctions et le mode de son élection peuvent varier à travers les nombreuses propositions dans la littérature. Les nœuds réguliers d'un *cluster* (*clustermember*) n'ont pas de propriétés ou de fonctions particulières sauf s'il sont à la jonction de plusieurs *clusters*, auquel cas, nous parlons de *clustergateways*.

Trois éléments sont importants lorsqu'il est question de *clusters* :

- Le mode d'élection du *clusterhead* qui est effectué par un algorithme d'élection et qui dépend de certaines métriques, tel que le niveau de batterie, la position, la vitesse, le nombre de connexions d'un noeud.
- Les responsabilités et le fonctionnement du *clusterhead*. Les responsabilités de ce nœud très particulier peuvent être très limitées (simple détermination du *cluster*) ou très étendues (centralisation des informations sur le *cluster*). Dans certains cas, le trafic de tout nœud à destination d'un autre *cluster* que le sien doit transiter par le *clusterhead*.
- L'éloignement possible, en nombre de sauts, d'un *clustermember* de son *clusterhead*. L'étendu d'un *cluster* dépend du nombre admis de nœuds intermédiaires pouvant relayer le trafic entre un *clusterhead* et un des ses *clustermembers*.

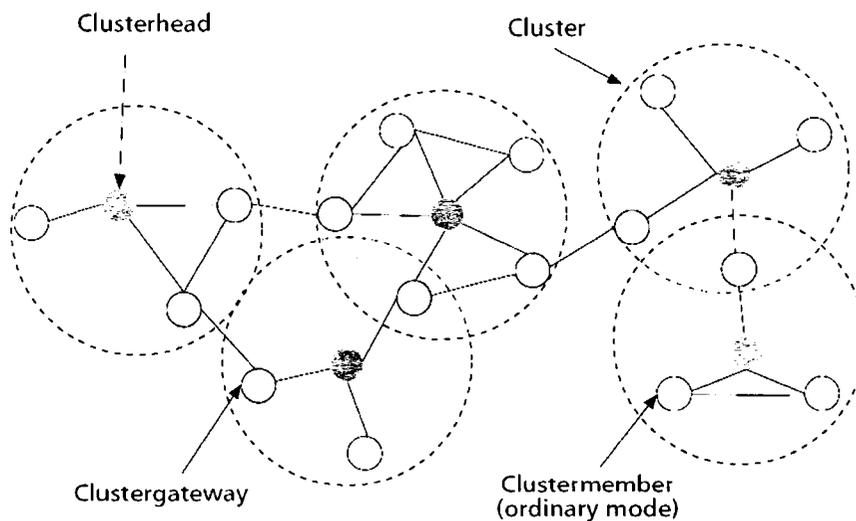


Figure 24 Structure d'un cluster
(Yu et al., 2005)

Les publications (Wei et al., 2005; Yu et al., 2005) présentent le résumé d'un grand nombre de propositions et apportent des éclairages très intéressants sur leurs fonctionnements.

Un élément très important dans le cas des *clusters* est la maintenance de l'architecture. Cette maintenance concerne les *clusterheads*, à travers un suivi continu et l'élection de nouveaux *clusterheads* qu'ils soient associés à de nouveaux *clusters* ou qu'ils viennent remplacer d'anciens *clusterheads*. L'appartenance des *clustermembers* à un *cluster* peut également changer. La fréquence de ces changements dépend alors surtout de la mobilité et du maintien des connexions entre les nœuds. Dans ce contexte, la possibilité de prédire la qualité des liens entre les nœuds peut être un élément qui améliore et simplifie significativement le processus de maintenance.

1.4.2 Les backbones

Le concept de dorsale (*backbone*) est largement utilisé dans les réseaux filaires, notamment Internet. L'utilisation de *backbone* dans les réseaux ad-hoc présente des complications liées au mouvement des nœuds et à la limitation en bande passante entre les couples de nœuds.

La figure 25 illustre l'utilisation de clusters dans les réseaux ad-hoc, les RN sont des nœuds réguliers (*Regular Nodes*) tandis que les BCN sont des nœuds pouvant appartenir à la dorsale (*Backbone Capable Nodes*). Certains des BCN sont élus pour construire la dorsale, ils sont alors nommés des BN (*Backbone Nodes*). Les publications (Meraihi et al., 2004; Ju et al., 2005; Ju et al., 2005; Theoleyre et al., 2005; Wang et al., 2005; Liang et al., 2006) présentent des sujets, notions et problématiques propres aux *backbones*. Il est à noter, comme on peut le voir sur la figure 25, que les *backbones* utilisent souvent la notion de clusters pour leur construction, la prédiction des qualités des liens présente donc logiquement les mêmes avantages.

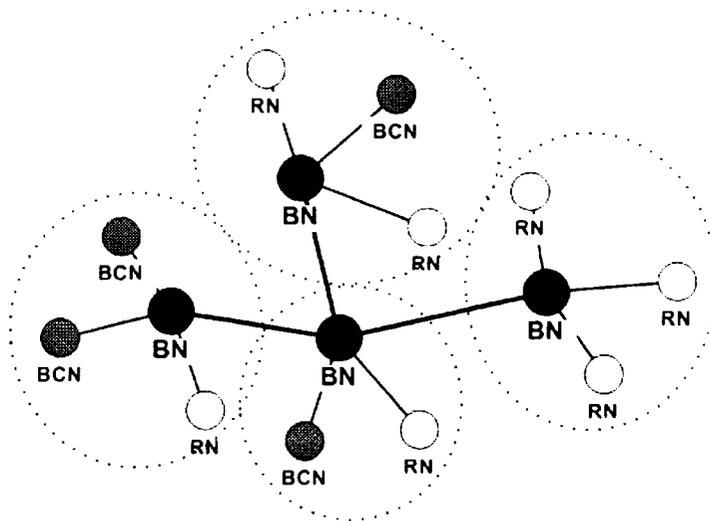


Figure 25 Schéma d'un backbone
(Ju et al., 2005)

1.4.3 Le cross-layer

L'architecture de communication classique répartit les besoins et service à garantir pour l'établissement d'une communication en différentes couches. Le modèle OSI¹¹ en sept couches, proposé par l'ISO¹², en est une très bonne illustration. Bien que cette approche ait été d'une grande utilité dans les réseaux filaires et sans fils classiques en divisant les problèmes rencontrés en plusieurs sous-problèmes et en permettant une évolution graduelle et facilitée des technologies, elle engendre dans le cas des réseaux ad-hoc des complications liées à la nature très particulière de ce type de réseaux.

Dans le cas des réseaux ad-hoc, contrairement aux réseaux classiques, une communication très limitée entre les différentes couches et une élaboration totalement indépendantes des protocoles associés entraînent la limitation des possibilités et diminuent les performances globales. À travers les sections précédentes, nous avons pu

¹¹ *Open Systems Interconnection reference model*

¹² *International Standards Organization*

constater que les problèmes rencontrés aux différentes couches ont les mêmes origines. De plus, une approche et une solution particulière à une couche peuvent être la source de perturbations pour les couches supérieures. De ce constat, il apparaît clairement que l'architecture *cross-layer* peut être une grande source d'amélioration des performances.

La notion de *cross-layer* est très vaste, elle englobe un nombre important de possibilités qui peuvent être réparties en plusieurs catégories illustrées sur la figure 26.

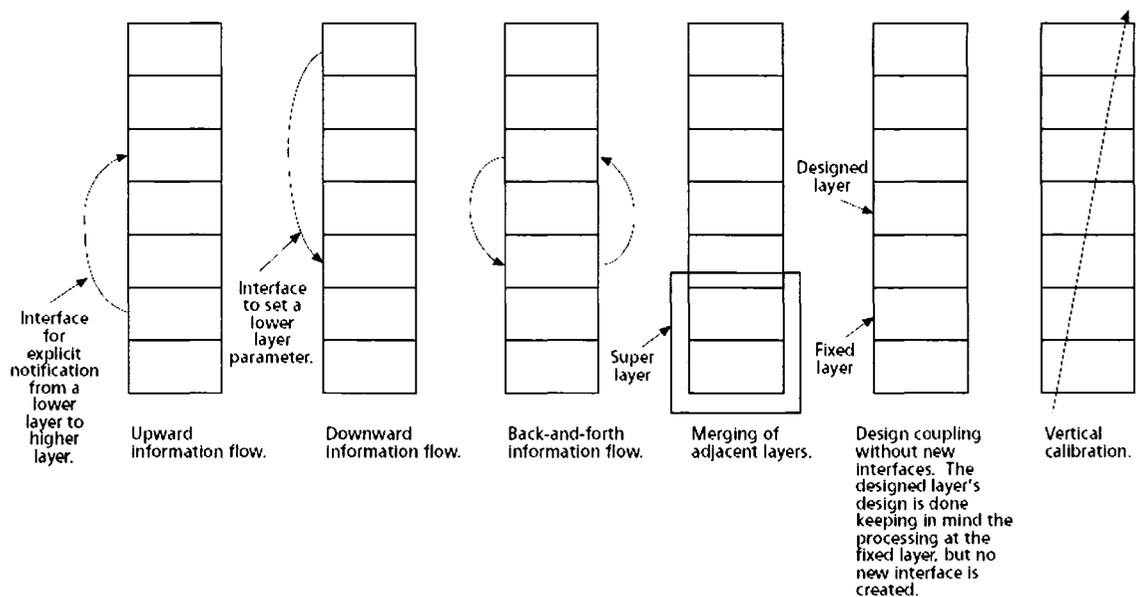


Figure 26 Différentes architectures *cross-layer*
(Srivastava et al., 2005)

Srivastava et al. (2005) font une synthèse de l'état de l'art et posent de manière très claire les possibilités, les contraintes et les problèmes que soulèvent des architectures *cross-layer*. D'autres publications (Butala et al., 2004; Qin et al., 2004; Srivastava et al., 2005; Yang et al., 2005; Raisinghani et al., 2006) proposent des solutions et résument également les possibilités et problèmes rencontrés.

CHAPITRE 2

PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE

Nous nous sommes intéressés à l'estimation et la prédiction de la qualité de liens dans les réseaux MANETs. À partir des spécificités et des contraintes propres aux MANETs que nous avons abordées dans le premier chapitre, la prédiction de la qualité de liens nous a paru être au centre de nombreuses améliorations possibles au niveau de la couche MAC, pour le routage, pour la construction et la maintenance de dorsales et de *clusters*, et plus généralement pour la mise en place de tout type de qualité de service. Nous nous sommes particulièrement intéressés au cas de MANETs constitué d'humains se déplaçant à pied dans un environnement fermé et contenant peu d'obstacles. Les sites de conférence, les colloques et les situations de réunions importantes de personnes en sont de parfaits exemples.

Nous verrons dans le dernier chapitre que de nombreuses approches pour la prédiction de la qualité de lien existent. Ces approches présentent à nos yeux des inconvénients et des limitations qui affecteront sensiblement leurs performances, parmi lesquels :

- Elles considèrent des a priori sur le canal de propagation et/ou le mouvement des nœuds.
- La majorité des approches ne prennent pas en compte les caractéristiques du canal de propagation et le considèrent parfait et sans variations aléatoires (erreurs). De plus, les propriétés du canal sont souvent considérées invariantes dans le temps.
- Un nombre important d'approches utilisent des données de connexion (typiquement la puissance reçue) pour en estimer les propriétés du mouvement (distance, vitesse et angle de déplacement). À partir de ces données, le mouvement peut être prédit, et en considérant une distance de connexion

théorique la prédiction de la connectivité est effectuée. Dans la majorité des cas, la puissance reçue est considérée sans variations (erreurs).

Nous avons pu voir à travers l'étude de la couche physique, que la puissance du signal reçu, le rapport signal à bruit (SNR) et le taux d'erreur binaire (BER) étaient les trois critères principaux qui caractérisent la qualité d'un lien. Nous avons pu constater dans la section 1.3.1 que la modulation et les spécificités de la couche physique affectaient très significativement le SNR et le BER. La puissance de réception dépend elle du modèle de carte utilisée, illustrée sur la figure 9, et ne dépend donc pas uniquement des modèles théoriques de propagation. La prise en compte des caractéristiques de la couche physique étant très complexe, nous avons choisi de nous restreindre à la puissance du signal reçu comme mesure de la qualité de lien.

Notre approche est donc d'utiliser la puissance du signal reçu pour qualifier la qualité de lien. Contrairement aux différentes autres approches, nous ne voulons considérer aucun a priori sur le mouvement ou le canal de propagation. De plus, notre approche consiste à effectuer l'estimation et la prédiction de la puissance reçue directement à partir de son historique. Enfin, l'estimation et la prédiction se font à partir d'outils simples, nécessitant peu de calcul et d'espace mémoire. Bien que nous n'en détaillons pas l'architecture, notre système se base sur une approche *cross-layer* dans laquelle des données de la couche physique sont utilisées pour améliorer les performances de protocoles et d'outils des couches supérieures. Enfin, nous ne voulons pas créer de surcharge de trafic sur le réseau, nous considérons par conséquent le cas où les données récoltées sont raisonnablement espacées. L'obtention des données sur la puissance se fait donc toutes les secondes, par simplification nous considérons la fréquence de ces mises à jour constantes.

À partir de ces éléments, il est important de considérer les éléments qui influencent la puissance reçue. Celle-ci est principalement affectée par la variation de la distance due

au mouvement des nœuds ainsi qu'aux caractéristiques du canal de propagation. Les réseaux ad-hoc étant peu déployés, leur étude se fait principalement à travers des simulations. Pour que l'élaboration et le test de nos modèles d'estimation et de prédiction se fassent dans de bonnes conditions, nous devons donc utiliser des modèles de propagation et de mouvement réalistes.

Dans un premier temps, nous avons effectué l'étude du canal de propagation et avons choisi un modèle qui correspond à notre cas d'étude. La puissance du signal reçu est affectée, d'une part par des variations longue échelle, et d'autre part par des variations courte échelle. Ces dernières induisent des variations aléatoires (erreurs) dans le niveau de puissance du signal reçu. Nous pouvons considérer que, dans le modèle que nous utilisons, la puissance reçue est constante sur une durée de l'ordre de la seconde. La puissance de réception moyenne sur un paquet (qui est l'entrée de notre système d'estimation et de prédiction) peut alors être associée à cette valeur.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés aux modèles de mouvement. Il est apparu à travers cette étude que les modèles proposés sont soit très simplistes et ne reflètent pas la réalité, soit très complexes et surtout très spécifiques à des scénarios déterminés. À partir de ce constat, nous avons développé deux modèles de mouvement *Temporal Dependency with Pause time Dependency mobility model* (TDPD) et *Temporal Dependency and Movement Dependency mobility model* (TDMD). Ces modèles de mouvement, basés sur le *Boundless Simulation Area mobility model*, sont très faciles à paramétrer et procurent des mouvements plus réalistes que le célèbre *Random Waypoint* puisqu'ils intègrent les caractéristiques des comportements des mouvements avec but (*task based movement*). De plus, ces modèles ne nécessitent pas la détermination de scénarios très précis dans lesquels le but de chaque nœud est à définir de manière précise.

Nous avons élaboré un certain nombre de scénarios que nous avons utilisés pour développer nos modèles d'estimation et de prédiction. Ces modèles se basent sur des extrapolations historiques de type *exponential smoothing*. Nous combinons un simple et un double *exponential smoothing* pour l'estimation et utilisons la formulation de Holtz pour en déduire la prédiction à deux secondes. Enfin, nous avons testé les outils d'estimation et de prédiction avec les deux modèles de mouvement développés. Lors de ces tests, la prédiction a été effectuée à horizon de deux et de dix secondes. Notre outil étant simple, la prédiction à dix secondes permet principalement d'en mesurer les limites.

Rappelons enfin que notre travail consiste à proposer un outil d'estimation et de prédiction de la qualité de lien utilisable par des protocoles variés au niveau de la couche MAC, du routage, de la construction et la maintenance de *clusters* et de *backbones*. Cependant, nous ne décrivons pas le mécanisme permettant d'appliquer notre méthode à ces différents cas. Le nombre très important d'approches possibles pour l'intégration de la prédiction dans ces protocoles et les problèmes qui peuvent en découler nous semblent un peu éloignés de nos travaux et sont à eux seuls des sujets de recherches.

Nous limitons notre étude au cas d'utilisateurs humains à pied, dans une zone fermée, de type salle de conférence. L'espace est considéré sans sectorisations (murs ou partitions importantes). De plus, nous nous posons dans le cas où les nœuds sont, du point de vue du réseau, identiques et interchangeables.

CHAPITRE 3

LA PROPAGATION RADIO ET LE MODÈLE UTILISÉ

La propagation radioélectrique est le premier élément qui détermine la puissance reçue et influence sa variation. Dans ce chapitre, nous aborderons les considérations les plus importantes pour nos travaux et détaillerons le modèle de propagation que nous avons retenu. Des études approfondies des différentes notions peuvent être trouvées dans (Katz, 1996; Rappaport, 2002)

3.1 Introduction

L'utilisation d'un support de communication ouvert pour la transmission du signal engendre des problèmes très différents de ceux rencontrés dans les supports filaires (fil métallique, fibre optique, etc.). De plus l'absence de raccord physique (câble) entre l'émetteur et le récepteur favorise la mobilité des noeuds, ce qui ajoute d'autres types de problèmes. Dans le cas qu'une transmission sans fil, le signal subit dans l'atmosphère les distorsions suivantes, représentées sur la figure 27 :

- Atténuation dans l'air et effet d'ombrage (*shadowing*) par des objets de tailles importantes entre l'émetteur et le récepteur.
- Réflexions sur des surfaces de plus grandes dimensions que la longueur d'onde (ex. sol, murs, meubles, immeubles, etc.).
- Diffraction sur les bords d'objets irréguliers (ex. meubles, immeubles, etc.).
- Diffusion (*Scatter*) sur des objets en tout genre (ex. panneaux de signalisation, objets divers).
- Effet Doppler dû au mouvement de l'émetteur et/ou du récepteur.

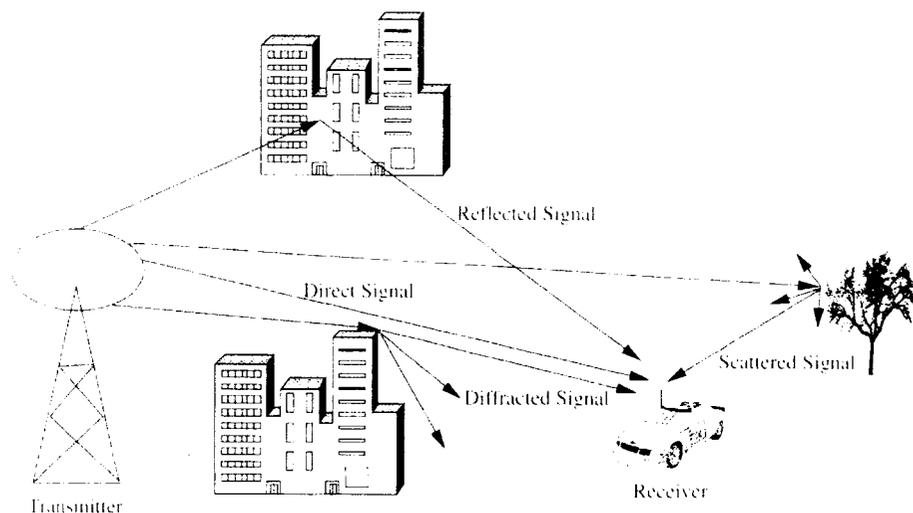


Figure 27 Propagation du signal
(Murthy et al., 2004)

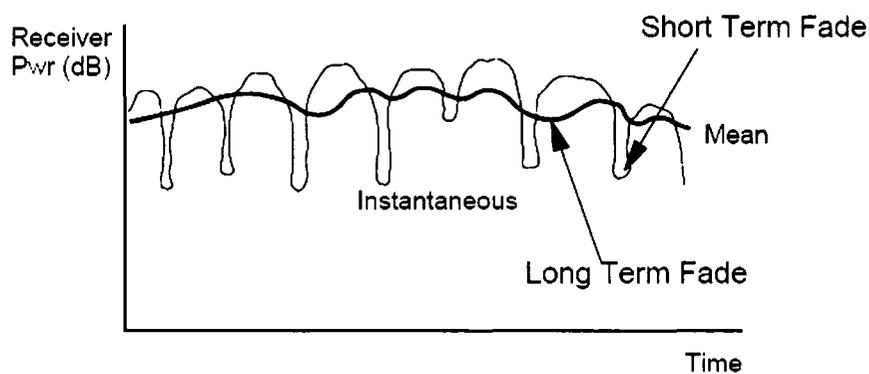


Figure 28 Variations rapides et lentes de la puissance du signal
(Katz, 1996)

Il découle de ces aspects une variation temporelle et spatiale de la qualité du signal reçu ainsi que des fluctuations rapides (*fast fading*) de la puissance reçue comme on peut le voir sur la figure 28. Plusieurs modèles pour représenter le *fast fading* ont été

développés, notamment les modèles de propagation de « Rayleigh » et de « Rice » (Rappaport, 2002), dont un exemple est donné sur la figure 29.

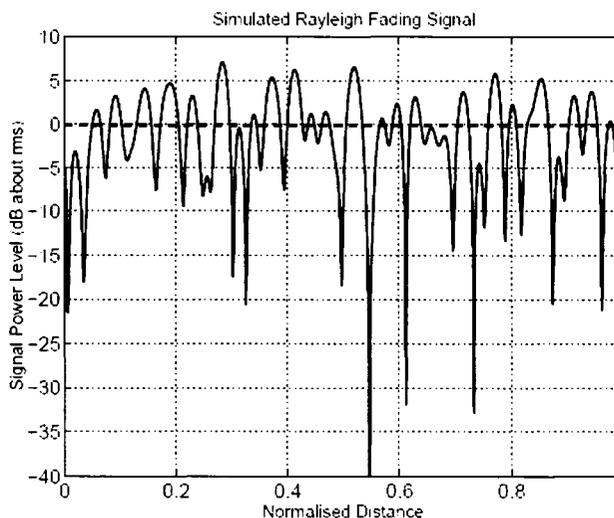


Figure 29 Puissance du signal en fonction de la distance dans le cadre du modèle de Rayleigh (Jones et al., 2005)

Gaertner et al. (2004) ont effectué une série de test, dans un environnement ouvert et dégagé, pour identifier les facteurs qui influencent la qualité des liens. D'après leur étude, deux facteurs de propagation ont une influence significative sur la qualité des liens :

- Le *shadowing* dû à l'orientation de l'utilisateur.
- Le *shadowing* dû aux autres utilisateurs ou aux objets (une voiture dans le cas de l'étude).

La figure 31 illustre l'effet de l'orientation de l'émetteur sur la puissance du signal reçu (*shadowing* de l'émetteur) tandis que la figure 30 illustre l'effet de la présence d'une voiture entre l'émetteur et le récepteur, pour différentes distances émetteur-voiture.

Dans leurs articles, Gaertner et al. font également remarquer que certaines technologies permettent de compenser les effets des *multi-paths* sur la qualité du signal reçu à travers des égalisateurs (*equalizers*).

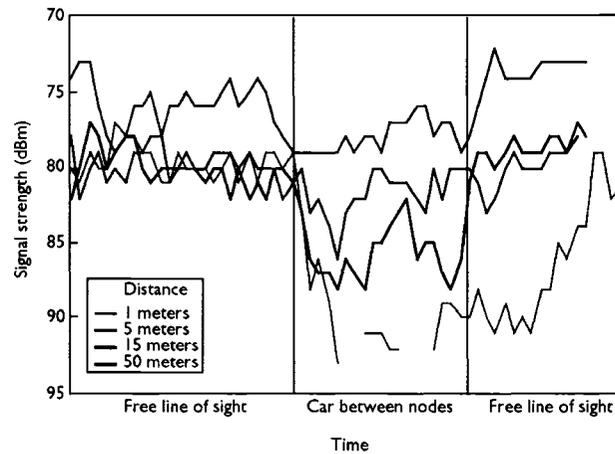


Figure 30 Effet de la présence d'obstacles sur le signal reçu (Gaertner et al., 2004)

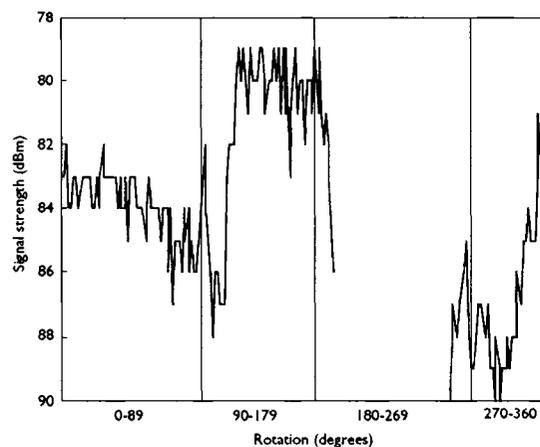


Figure 31 Effet du shadowing dû à l'orientation de l'émetteur sur la puissance du signal reçu (Gaertner et al., 2004)

Les propriétés de la propagation radio peuvent être présentées comme suit :

- Atténuations grandes échelle (*long term fade*) (en $1/dist^\alpha$), dues à :
 - L'atténuation en espace libre, $\alpha = 2$.
 - L'effet d'ombrage (*shadowing*), $\alpha \geq 2$.
- Atténuations petites échelles, phénomènes d'évanescences, (*short term fade*) dues à :
 - La superposition des signaux provenant des chemins multiples, par réflexion et diffraction des ondes radios.
 - L'effet Doppler dû principalement au mouvement des nœuds émetteur et récepteur.
- Déformation du signal due:
 - Au mouvement (Effet doppler).
 - À l'écho due aux multitrajets (*multipaths*).
 - À la variation du signal reçu causé par la présence et le mouvement des objets alentour.
- Les canaux radios étant accessibles à tous, des interférences supplémentaires peuvent s'ajouter, dues à :
 - L'utilisation par des nœuds voisins de fréquences trop proches qui interfèrent entre elles. La taille limitée de la bande passante est un facteur aggravant.
 - La présence de bruits parasites, provenant d'équipements électriques ou électroniques.
 - Les déformations non uniformes du signal par l'environnement (présence de pluie, particules de poussière, etc ...).

De ces caractéristiques découlent des problèmes spécifiques, par rapport au cas filaire :

- Couverture limitée.
- Bande passante étroite et donc débit plus faible. L'économie et la bonne gestion des ressources sont donc primordiales.
- Signal reçu très atténué (atténuation de l'ordre de 10^{-6}). Il devient impossible d'écouter le canal de communication, donc de détecter les collisions, lors d'une émission, contrairement au cas des réseaux filaires. Les réglementations en terme de puissance d'émissions aggravent ces problèmes en limitant les seuils admissibles pour les puissances d'émission maximales.
- Variation constante et rapide de la qualité du signal reçu.
- Variation du débit en fonction de la distance.

Notre intérêt pour la couche physique et le canal de propagation provient de l'impact très important de leurs performances et leurs modélisations sur les systèmes sans fils (Wang et al., 2003). Pour que nous puissions développer et tester notre méthode de prédiction dans de bonnes conditions, nous devons utiliser un modèle largement utilisé et répandu dans la littérature. Nous utilisons la puissance moyenne reçue sur une trame comme entrée de notre système de prédiction, notre modèle de canal doit donc prendre en considération les éléments qui influencent le niveau de puissance reçue au récepteur. Pour cette raison, nous n'avons pas considéré le bruit dû à l'environnement ou aux autres équipements d'émission et de réception qui peut être considéré d'influence limitée pour notre cas.

Nous avons donc étudié l'effet de l'atténuation grande échelle et celui des phénomènes d'évanescences sur la puissance reçue.

3.2 Modélisation de l'atténuation grande échelle

La formule théorique permettant le calcul de la puissance en espace libre dans le cadre d'une atténuation grande échelle est :

$$P_r(d) = \frac{P_e G_t G_r}{L} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.1)$$

avec $P_r(d)$ la puissance reçue à la distance d , P_e la puissance d'émission de l'antenne, G_t le gain de l'antenne en émission, G_r le gain de l'antenne en réception, $L \geq 1$ un facteur de perte (ou d'atténuation) et λ la longueur d'onde.

À l'intérieur d'un bâtiment la formulation suivante est plus appropriée puisqu'elle prend en considération les pertes dues à l'atténuation grande échelle et au *shadowing* (Rappaport, 2002) :

$$PL(d)_{dB} = PL(d_0)_{dB} + 10\beta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{dB} \quad (2.2)$$

avec $PL(d)_{dB}$ la perte de puissance, en dB, subie par le signal à la distance d , $PL(d_0)_{dB}$ la perte de puissance, en dB, subie par le signal à la distance d_0 , $\beta \geq 2$ le facteur d'atténuation, et X_{dB} une variable aléatoire gaussienne de moyenne zéro et d'écart type σ_{dB} . Les valeurs typiques de β et σ_{dB} , prises du livre de Rappaport (2002) et de la thèse de Dhoutaut (2003), sont donnés dans Tableau II. Le cas $\beta = 2$ correspond au cas de la propagation en espace libre.

Dans le cas d'environnements de propagation de type bureaux, le *Ericsson radio system model* considère une atténuation de 30dB sur une distance d'un mètre, ceci pour une fréquence de 900MHz et des gains d'antenne unité (Rappaport, 2002), cette valeur est obtenue en appliquant l'équation (2.1). À partir de la même formulation, nous avons

calculé l'atténuation correspondante à une fréquence 2.4GHZ, soit 40dB. Nous utiliserons cette valeur dans le reste de notre étude.

Tableau II

Valeurs typiques de β et σ_{dB}

Environnement	β	σ_{dB}
Intérieur dégagé	1.6 à 3	2 à 5
Intérieur obstrué	4 à 6	7 à 9.6

D'après tous les éléments précédents, nous pouvons considérer la formule suivante, pour le calcul de la puissance reçue à une distance d , dans le cas d'une atténuation longue distance :

$$P_r(d)_{dB} = P_e_{dB} - (40 + 10\beta \log(d) + X_{dB}) \quad (2.3)$$

avec $P_r(d)_{dB}$ la puissance du signal reçu (en dB) à la distance d (en mètre), P_e_{dB} la puissance du signal émis par la source (en dB), β le facteur d'atténuation et X_{dB} une variable aléatoire gaussienne de moyenne zéro et d'écart type σ_{dB} , les valeurs considérées pour σ_{dB} et β sont données dans le Tableau III.

Vu les vitesses de déplacement que nous utilisons, nous pouvons considérer que ces caractéristiques sont stables sur une seconde. La puissance reçue sur un paquet (quelques centaines de millisecondes), qui est l'entrée de notre système d'estimation et de prédiction, peut donc être considéré constante.

Tableau III

Valeurs considéré pour β et σ_{dB}

Environnement	β	σ_{dB}
Intérieur, variations (erreurs) très faibles	2.5	0.5
Intérieur, variations (erreurs) moyennes	2.5	2
Intérieur, variations (erreurs) importantes	2.5	4

Les valeurs du tableau précédent découle de notre environnement général, que nous considérons plutôt ouvert (ex. salle de conférence, etc.) et contient peu de séparations (partitions, meubles, murs, etc.), mais un grand nombres d'obstacles mobiles (humains).

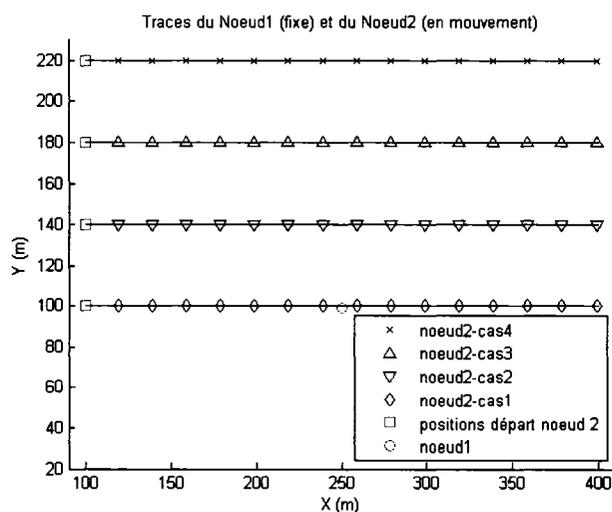


Figure 32 Scénario de test avec quatre cas de mouvement

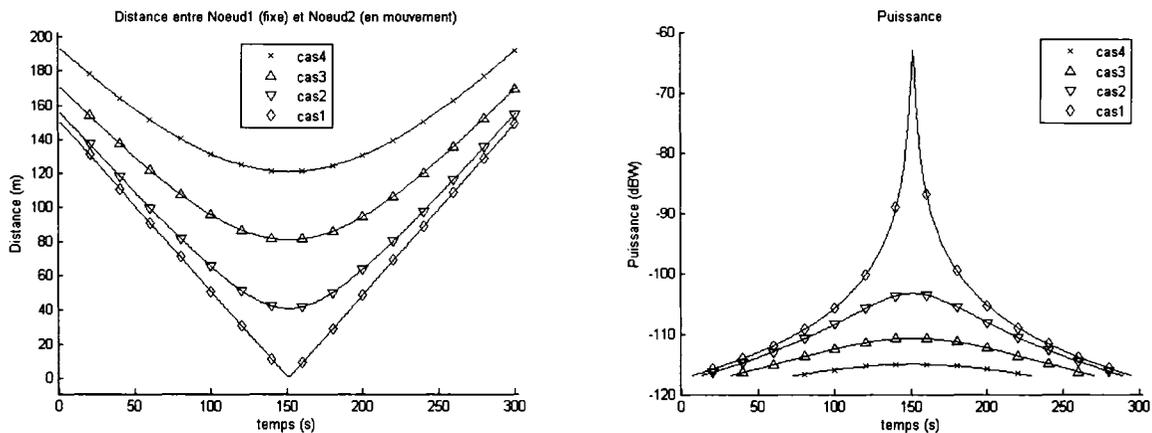


Figure 33 Variation de la distance et de la puissance de réception théorique pour les quatre cas de mouvement

Nous avons effectué des tests avec des scénarios simples, illustrés sur la figure 32. Dans ces scénarios, le nœud 1 est fixe et le nœud 2 se déplace à une vitesse de 1m/s à différentes distances du premier. Le seuil de détection est de -87dB et la puissance d'émission est ajusté à 5mW. Sur la figure 33 sont représentées les variations de distance et de puissance pour les différents cas. La figure 34 illustre la puissance reçue en fonction de la distance pour les valeurs du Tableau III et dans le cas2 de mouvement.

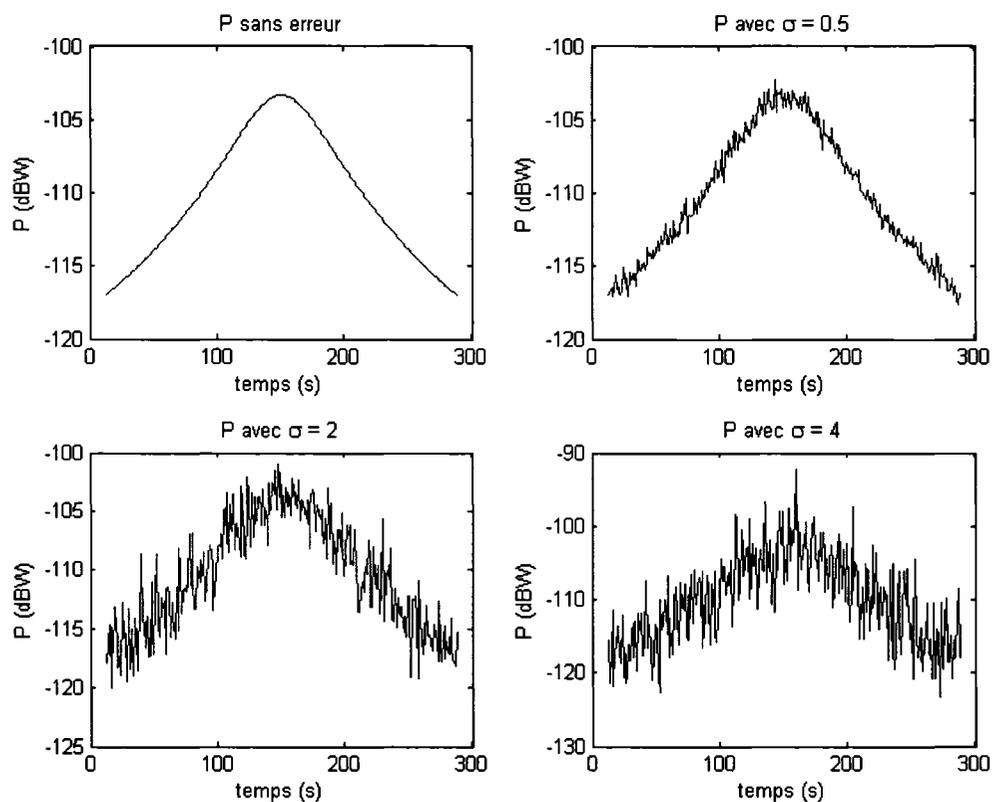


Figure 34 Effet du shadowing sur la puissance de réception pour le cas2 de mouvement et pour différentes valeurs de σ_{dB}

Nous utiliserons à travers se documents les termes « variations » ou « erreurs » pour désigner les écarts entre la courbe théorique de la puissance à variations lente (cas $\sigma = 0$) et celle ayant également des variations rapides (cas $\sigma \neq 0$).

3.3 Modélisation des phénomènes d'évanescences

Pour le calcul des phénomènes d'évanouissement, nous utilisons la méthode présentée par Agba et al. (2006). La modélisation du canal se fait à l'aide de *Tap Delay Lines* (TDL), représenté sur la figure 35, combiné avec le modèle ITU-RM.1225. Une explication détaillée des TDL peut être trouvée dans Rappaport (2002) et Agba et al. (2006).

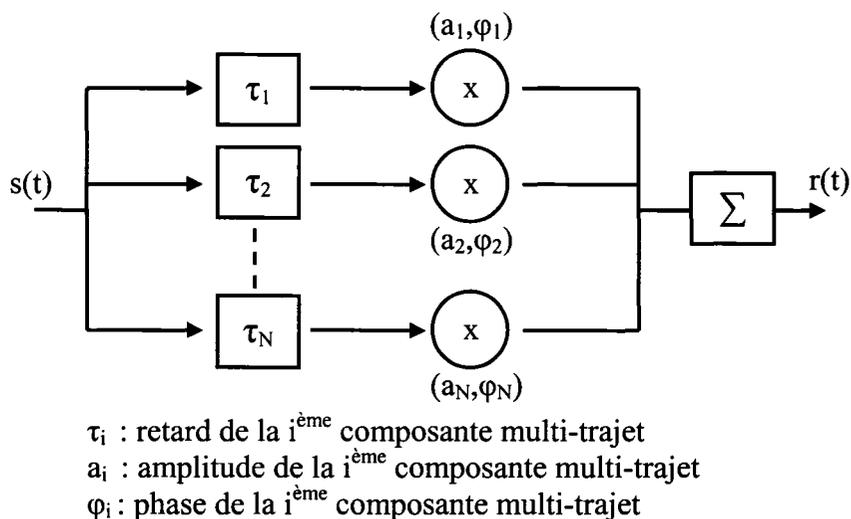


Figure 35 Principe de la méthode des TDL

Le standard ITU-RM.1225 est très adapté au cas des MANETs, il est basé sur une étude effectuée pour les systèmes 3G et définit plusieurs cas types d'environnements de test : « extérieur-véhicule », « extérieur-piéton » et « intérieur ». Pour chaque environnement, deux canaux sont caractérisés : A et B. La vitesse de déplacement est prise en compte pour considérer l'effet Doppler. Le premier canal correspond au cas de faible étalement de retard, le second au cas d'étalement de retard important. Pour chacun des TDL de chacun de canaux le constituant, les paramètres τ_i , a_i et φ_i sont particuliers. Dans le cas « intérieur », quatre à six lignes sont considérées ($N = 4$ ou $N = 6$).

Pour modéliser le canal sur un certain laps de temps, le standard stipule que les cas A et B doivent être pris avec les probabilités respectives 50% et 45%. Les 5% restant ne sont pas explicités dans le standard et sont souvent considérés comme ayant un étalement de retard moyen (i.e. effet combiné des deux canaux).

Un exemple de résultats obtenus avec les canaux A et B est donné sur la figure 37. Sur cette figure, nous pouvons voir l'amplitude de l'effet combiné (la sommation) de l'ensemble des trajets utilisés dans le TDL, le calcul est effectué chaque seconde sur le

mouvement de la figure 36. Dans ce scénario, le nœud 1 est fixe tandis que le nœud 2 est en mouvement à une vitesse de 1m/s.

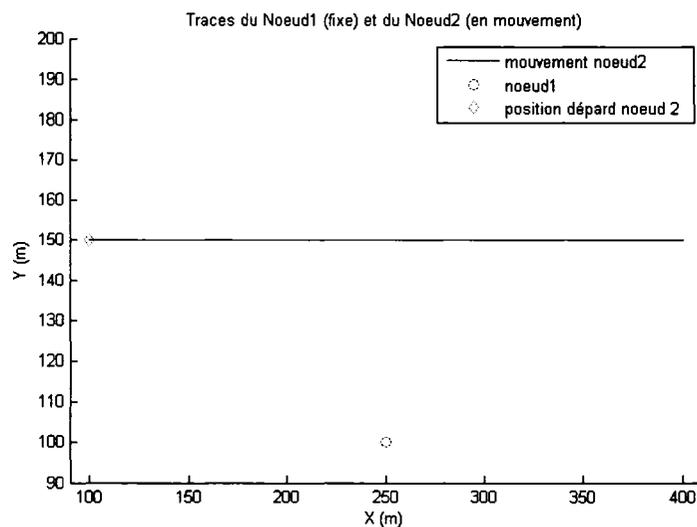


Figure 36 Scénario de mouvement

Sur la figure 34, nous pouvons constater que les variations d'amplitude dues aux évanouissements sont assez faibles. Ceci provient du fait que les vitesses engagées sont faibles. Lors de déplacements à grandes vitesses, les variations sont en effet importantes à cause de l'effet Doppler.

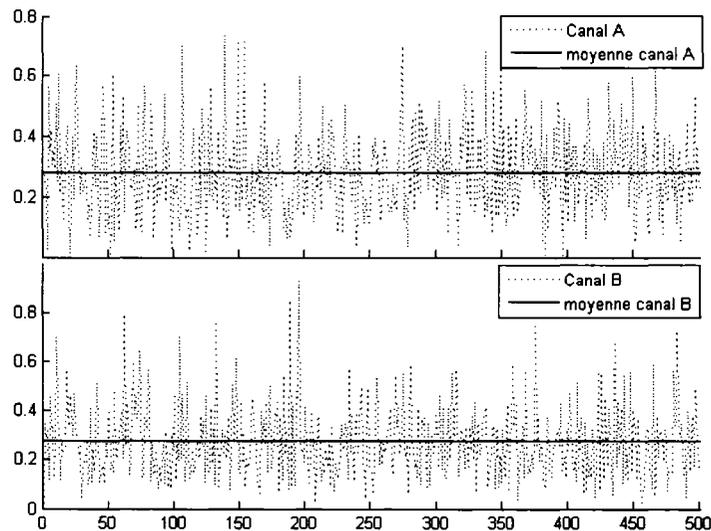


Figure 37 Amplitude (en dB) des évanouissements des canaux A et B

Nous pouvons constater sur la figure 34 et la figure 37 que dans notre cas, l'effet des phénomènes d'évanescences peut être négligé en comparaison avec les effets de *shadowing*. Les variations dues au *shadowing* sont de l'ordre de plusieurs dB dans les cas de variations moyenne ($\sigma = 2$) et dans le cas de variations importantes ($\sigma = 4$) alors que les variations dues aux évanescences n'est que de l'ordre de quelques dixième de dB. Dans le cas de variations très faibles ($\sigma = 0.5$), nous pourrions prendre en considération les phénomènes d'évanescences, cependant, ce cas d'étude n'est pas le plus intéressant (vu le faible niveau de variations), il nous paraît donc raisonnable de ne prendre en compte les phénomènes d'évanouissements dans aucun des trois cas.

Dans le reste de notre étude, nous utiliserons donc le modèle de *shadowing* (section 3.2) sans prendre en compte les effets dus aux évanescences.

CHAPITRE 4

LE MOUVEMENT DES MANET

Le mouvement est le deuxième élément qui influence la variation du niveau de puissance reçue, nous avons donc, dans ce chapitre, déterminé les caractéristiques d'un mouvement réaliste. De plus, comme nous le verrons par la suite, nous nous sommes aperçus lors de l'étude que les modèles de mouvement les plus utilisés (notamment *Random Waypoint*) étaient très peu réalistes. De ce constat, et du besoin d'avoir un modèle de mouvement proche de la réalité pour l'élaboration et le test de notre modèle d'estimation et de prédiction, nous proposons deux modèles de mouvement : *Temporal Dependency with Pause Time Dependency Mobility Model* (TDPD) et *Temporal Dependency and Movement Dependency Mobility Model* (TDMD). Ces modèles ont la propriété d'être simples d'utilisation tout en reflétant des caractéristiques complexes.

4.1 Introduction

Depuis l'émergence des réseaux ad-hoc et l'augmentation significative de l'intérêt que porte la communauté scientifique aux MANETs, une attention toute particulière a été apportée à l'étude et à la modélisation de leurs mouvements.

Gardons à l'esprit que la différence notable entre un nœud mobile appartenant à un réseau sans fil classique et celui d'un MANET, est le fait que ce dernier est à la fois un terminal et un équipement de relais (de type routeur). Dans un réseau, le mouvement d'un nœud terminal affecte ses propres capacités de transmissions et, dans une certaine mesure, celles des autres terminaux voisins. Le mouvement d'un élément de relais affecte, quant à lui, de manière très importante, tous les équipements, qu'ils soient proches ou distants, qui l'utilisent pour acheminer leurs trafics.

Pour évaluer efficacement les performances des protocoles et solutions développés pour les MANETs, il est important de pouvoir les tester dans des conditions réalistes, notamment en terme de mobilité. Il est donc nécessaire d'utiliser des mouvements qui modélisent la réalité de façon assez précise et fiable. Le développement de modèles de mobilité, leur comparaison et l'étude de leurs influences sur des solutions et des protocoles ad-hoc est un thème d'actualité qui a engendré, ces dernières années, un nombre important de publications dont Camp et al. (2002) et Bai et al (2004) font une synthèse partielle.

Pour rendre compte de l'hétérogénéité de la nature des réseaux ad-hoc, un grand nombre de modèles de mouvement ont été proposés. En considérant la diversité des cas et des applications possibles, un modèle donné ne peut prétendre rendre compte de tous les mouvements possibles d'un réseau ad-hoc. Les nœuds peuvent par exemple être soit à l'intérieur de bâtiments, comme dans le cas de sites de conférences, soit dans un environnement extérieur structuré, comme dans les rues d'une ville ou sur le site d'une catastrophe, ou encore dans un espace ouvert, comme celui d'un champ de bataille. De plus, les caractéristiques des nœuds eux-mêmes, en terme de vitesse par exemple, peuvent varier allant du conférencier au véhicule militaire tout terrain.

La complexité et la richesse du mouvement réel ont pour corollaire l'incapacité des modèles de mobilité existants de les représenter de façon totalement fiable. Le modèle de mobilité le plus répandu, *Random Waypoint*, présente en effet des lacunes évidentes et un faible niveau de réalisme. Il faut cependant prendre en considération que l'élaboration d'un modèle de mobilité n'est pas chose aisée et que la caractérisation du mouvement et la variété des situations ne facilitent pas la conception de modèles réalistes.

Les modèles de mobilité existants présentent toutefois l'avantage d'être assez généraux pour couvrir une variété de cas même avec peu de précision. Les protocoles ad-hoc étant

rarement élaborés pour une application très précise, cette approche permet de couvrir lors des tests une vaste gamme de scénarios différents.

Du grand nombre de critères et d'approches utilisés pour caractériser le mouvement découle une variété de modèles de mouvement comme le présente la figure 38. Il n'est pas question ici de faire état de toutes les approches qui participent à l'élaboration des différents modèles, une grande partie de celles-ci sont décrites dans Bettstetter (2001), Camp et al. (2002) et Ilyas et al. (2005). Nous allons toutefois tracer un schéma général et aborder certains points clés, en nous intéressant principalement aux mouvements individuels, qui correspondent plus à notre environnement d'étude. Nous ne couvrirons donc pas les mouvements de groupes, d'autant plus qu'il est à noter que dans une certaine mesure et dans le référentiel du groupe, le mouvement des nœuds peut être assimilé à des mouvements individuels si ces derniers sont associés à des vitesses et à des zones de déplacement limitées.

Dans la prochaine section, les caractéristiques des différents modèles de mobilité seront abordées. Suivra une description plus détaillée de quelques modèles particulièrement utilisés : *Random Walk*, *Random Waypoint*, *Gauss Markov*, *Boundless Simulation Area* et *Markovian Random Path*. L'étude du *steady state* et l'influence du mouvement sur les performances des MANETs seront par la suite évoquées. Nous aborderons par la suite l'implémentation du *Random Waypoint Mobility Model* (RW) et du *Boundless Simulation Area Mobility Model* à travers la version modifiée qu'est le *Temporal Dependency Mobility Model* (TD). Nous exposerons également deux modèles de mobilité que nous avons développés : *Temporal Dependency with Pause Time Dependency Mobility Model* (TDPD) et *Temporal Dependency and Movement Dependency Mobility Model* (TDMD). Pour finir, nous exposerons notre choix pour les différents paramètres de réglage des modèles de mobilité développés et en effectuerons une comparaison.

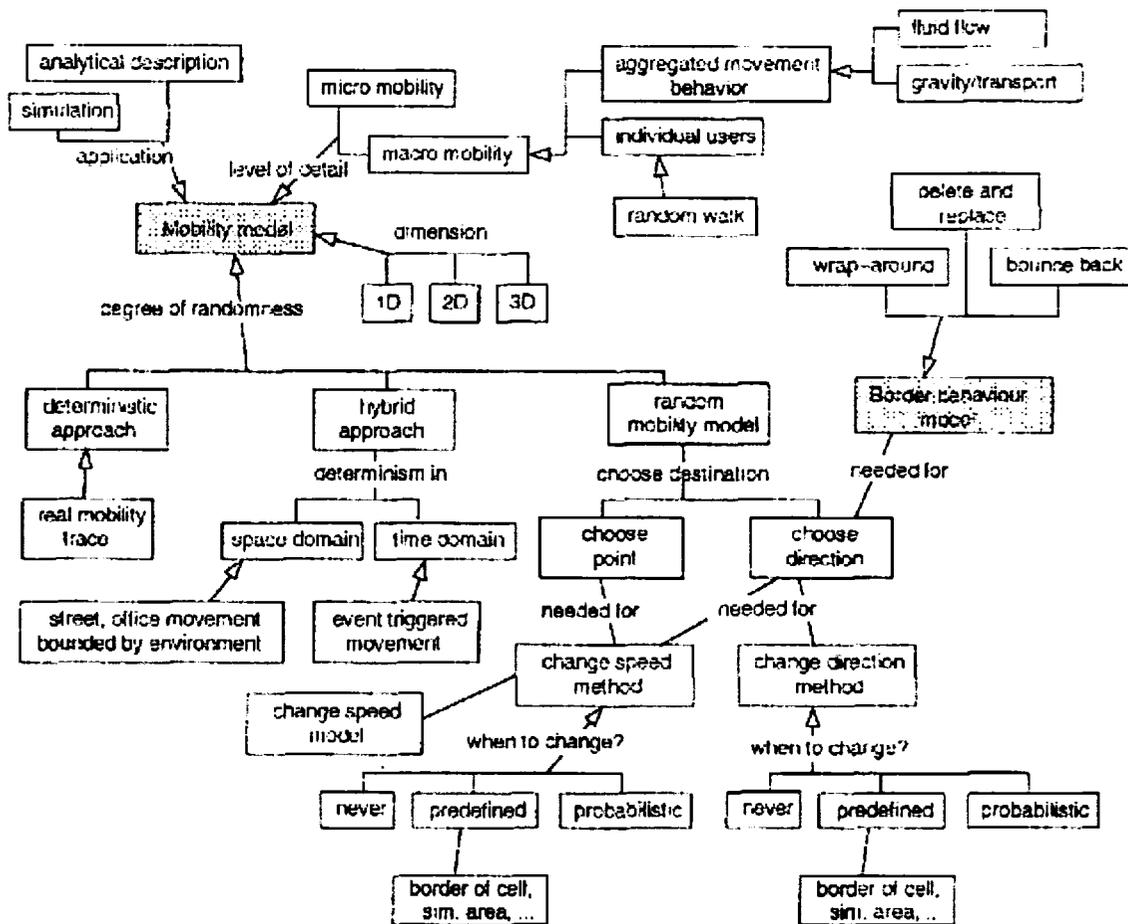


Figure 38 Diagramme conceptuel des caractéristiques des modèles de mobilité [Bettstetter, 2001]

4.2 État de l'art

4.2.1 Caractéristiques des différents modèles de mobilité

La première approche pour déterminer le mouvement à utiliser lors de simulations est d'utiliser des tracés de déplacement observés dans la réalité, sous forme de parcours (*traces*). Lorsque le nombre de participants est assez grand et que l'horizon d'observation est assez long, les parcours sont des sources d'informations très précises

puisque totalement réelles. L'inconvénient majeur de cette méthode est la difficulté de sa mise en place et la nécessité de définir des modèles très précis (des scénarios particuliers), ce qui est complexe dans le cas des réseaux ad-hoc et induit une restriction par rapport à la diversité des cas possibles. De plus, ces données sont généralement confidentielles, donc très rares.

La deuxième approche, que représentent les modèles synthétiques (*synthetic models*), consiste en la modélisation du mouvement des nœuds sous forme d'équations mathématiques avec l'utilisation des processus aléatoires. La troisième approche est une méthode hybride dans laquelle les deux précédentes structures sont combinées, des données réelles (tel que le plan d'une ville) sont jumelées à un modèle statistique (tel que le mouvement des nœuds).

Deux niveaux de détails peuvent être considérés pour modéliser le mouvement : microscopique et macroscopique. Dans le premier, le mouvement des nœuds est considéré en détails et individuellement. Dans le second, le mouvement est considéré par rapport à une zone géographique (ex. une cellule) et des caractéristiques macroscopiques, telles que le taux de changement de cellules, sont utilisées pour caractériser le mouvement.

Un certain nombre de points reviennent souvent dans la littérature pour caractériser les modèles de mobilité :

- Choix des données

Le plus souvent, un modèle de mobilité définit soit un point de la zone de simulation vers lequel un nœud doit se déplacer, soit sa vitesse et son angle de déplacement sur un intervalle donné. Les intervalles de calcul et de mise à jour peuvent être fixes ou variables, déterministes ou aléatoires. De plus, des mouvements individuels ou en groupes peuvent être considérés.

- Gestion des contours

Le mouvement des nœuds s'effectue généralement dans un espace de simulation donné. Les modèles de mouvement basés sur un choix de vitesse et d'angle ont plusieurs approches pour la gestion des contours. La plus répandue est de définir une largeur de sécurité le long de la limite de la zone de mouvement, lorsqu'un nœud pénètre cette zone, son angle de déplacement est modifié pour qu'il reparte vers le centre de la zone de mouvement. Plusieurs possibilités sont exposées dans PalChaudhuri et al. (2005).

- **Modèle de calcul et dépendance**

Il existe une grande variété d'algorithmes pour le calcul des données de mouvement à chaque intervalle de temps. De plus, il peut y avoir une dépendance spatiale et/ou temporelle dans le calcul du mouvement. Les données à un instant donné dépendent alors de celles de l'instant précédent comme dans les modèles Gauss-Markov et *Boundless Area*.

- **Dépendance inter-nœud (*Group Dependency*)**

Le mouvement d'un nœud peut également dépendre de celui d'un ou plusieurs autres nœuds. Notre intérêt pour les mouvements individuels ne doit pas occulter la diversité des modèles de mouvement collectifs existants. Camp et al. (2002) décrivent les modèles les plus importants (*Exponential Correlated Random Mobility Model*, *Column Mobility Model*, *Nomadic Community Mobility Model*, *Pursue Mobility Model* et *Reference Point Group Mobility Model*). Notons que dans certains cas et avec des réglages particuliers (ex. faibles vitesses), des mouvements individuels peuvent modéliser le mouvement relatif des membres d'un groupe.

- **Restriction géographique et modélisation des obstacles :**

Le mouvement suit généralement des chemins bien définis, en évitant des obstacles qui s'y trouvent (ex. rues) (Tian et al., 2002; Bai et al., 2003; Jardosh et al., 2003).

- **Choix du chemin (*Path Selection*)**

Les restrictions géographiques induisent un choix de chemin. Les critères de choix peuvent être la distance à parcourir, le temps de déplacement, le coût (ex. la dépense d'énergie associée au chemin) et les caractéristiques du chemin en question (ex. congestion, vitesse maximale et minimale possibles).

- Classification des nœuds (*Mobile Node Classification*)

La classification sert à répartir les nœuds en différents groupes suivant certaines caractéristiques (Ilyas et al., 2005). La vitesse de déplacement ou les métriques de choix de chemin sont des exemples des critères de classification (ex. chaussée pour une voiture et trottoir pour un piéton). Il peut arriver qu'un nœud change de classe (*Class Transition*). Cela se produit par exemple lorsqu'un piéton monte dans un véhicule et vice versa. La présence simultanée de plusieurs classes de nœuds (ex. piétons et véhicules,) peut influencer le mouvement des uns et des autres. L'interdépendance du mouvement de ces classes de nœuds et leurs interactions avec l'environnement sont des éléments supplémentaires qui peuvent être pris en considération (*Class Dependence*).

- Mouvement avec but (*Task Based Movement*)

Le mouvement des personnes ne s'effectue généralement pas de façon totalement aléatoire mais plutôt dans un but précis et dans une zone très particulière. Une fois rendue à destination, une personne va y passer un certain temps avant de se déplacer de nouveau. Aussi, plus le trajet pour y arriver a été long, plus longue sera la halte. Une personne peut aller en quelques dizaines de secondes au bureau, voisin, de son collègue et n'y rester que quelques instants. Par contre, s'il s'agit de descendre plusieurs étages ou se déplacer sur quelques centaines de mètres, cette personne restera plus volontiers dans cette nouvelle localité pendant un temps plus important. La modélisation de ces mouvements est ardue, elle nécessite de définir des objectifs aux différents nœuds basés sur leurs particularités. Kumar et al. (2000) ont proposé un modèle pour le GSM qui décrit les échanges de populations entre zones (ex. résidentielles, centre-ville) connectées par des routes (ex. voies rapides, autoroutes) suivant les

heures de la journée correspondant aux mouvements vers les lieux de travail ou de résidence.

- **Intégration du comportement (*Behavioral Model*)**

De nombreux travaux tentent d'intégrer des composantes naturelles dans le mouvement en se basant sur des éléments de sociologie et de comportement humain à grande échelle (Herrmann, 2003; Borrel et al., 2005). Il existe entre les humains des liens sociaux qui influencent leurs déplacements. Ces liens sociaux en tous genres, que ce soit un site de travail commun, une relation de travail ou sociale particulière (ex. secrétaire, amitié), peuvent être caractérisés sous forme matricielle et être pris en compte et ainsi influencer le mouvement des mobiles (Musolesi et al., 2004). Ce genre de modélisation reste cependant complexe à mettre en place et nécessite la définition de scénarios très précis.

- **Approches réalistes**

Certains articles modélisent le mouvement des nœuds dans des conditions très précises. Aschenbruck et al. (2004) font l'étude et la modélisation pour le cas de sites de catastrophes naturelles. Johansson et al. (1999) ont développé trois scénarios très particuliers, le premier pour le cas d'une conférence, le second pour le cas d'un évènement et le troisième pour le cas d'un site d'une catastrophe.

De ces critères découlent un grand nombre de propositions de modèles de mouvements. Cependant, la majorité de ces modèles ne sont pas repris par d'autres équipes de recherche que celles qui les ont mis au point. Les modèles ci-dessous représentent les sept modèles de mouvements individuels les plus répandus, certains seront développés ultérieurement.

- *Random Walk Mobility Model* : basé sur des variations aléatoires de vitesse et de direction de mouvement.

- *Random Waypoint Mobility Model* : Semblable au *Random Walk Mobility*, mais intègre des temps de pause entre les instants de changements d'angle et de vitesse.
- *Random Direction Mobility Model* : Les changements de direction et de vitesse ne se produisent que lorsque les nœuds atteignent les limites de la zone de mouvement.
- *Boundless Simulation Area Mobility Model* : Le mouvement à un instant donné dépend de celui des instants précédents dans un espace replié sur lui même (prenant ainsi la forme d'un tore).
- *Gauss-Markov Mobility Model* : la vitesse et l'angle de déplacement d'un nœud à un instant donné dépendent de leurs valeurs à l'instant précédent suivant des distributions gaussiennes. La vitesse est assimilée à un processus de *Gauss-Markov*.
- *Probabilistic Version of the Random Walk Mobility Model* : la position d'un nœud à un instant donné dépend de sa position à l'instant précédent et d'une distribution de probabilité particulière.
- *City Section Mobility Model* : modèle intégrant la modélisation des rues d'une ville.

4.2.2 Quelques modèles de mobilité

4.2.2.1 Random Walk Mobility Model

Le modèle *Random Walk* correspond au modèle proposé par Einstein en 1926 pour caractériser le mouvement brownien. Il est très largement utilisé dans divers domaines. Dans ce modèle de mouvement décrit par Camp et al (2002), un nœud se meut vers une position de destination avec un angle et une vitesse prises équiprobablement entre des valeurs minimales et maximales. Chaque mouvement s'effectue sur un intervalle de

temps constant. Lorsque le nœud arrive à la limite de la zone de mouvement, il s'en éloigne avec un angle semblable à celui de la réflexion lumineuse comme le montre la figure 39. Les valeurs d'angle et de vitesse sur un intervalle de temps étant totalement indépendantes de celles de l'intervalle précédent, ce mouvement est caractérisé par des changements brutaux d'angle et de vitesse, ce qui est peu réaliste.

Ce modèle est simpliste et facile à utiliser puisqu'il n'y a qu'un seul paramètre à définir : soit le temps de déplacement. Il est adapté si aucune donnée a priori sur le mouvement ne peut être considérée.

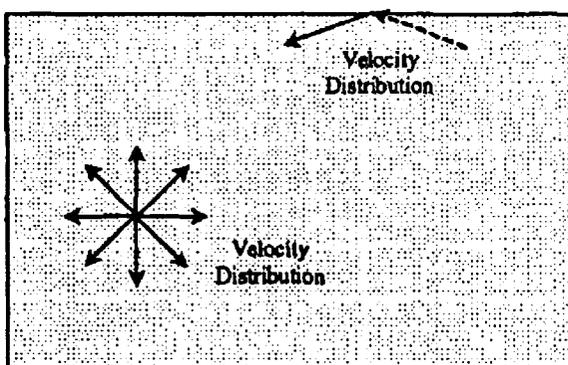


Figure 39 Traitement des bords dans le modèle Random walk (Yu et al., 2003)

4.2.2.2 Random Waypoint Mobility Model

Dans ce modèle de mouvement, les changements de vitesse et/ou d'angle sont espacés de moments de pause. Borch et al.(1998) en détaillent le fonctionnement. Après une pause, le nœud choisit une destination dans l'espace de mouvement et une vitesse uniformément distribuée entre une vitesse maximale et une vitesse minimale de déplacement. Après s'être déplacé à la nouvelle localité, le nœud observe un temps de pause déterminé et constant, puis se déplace comme dans le cas de *Random Walk*. Dans

la plupart des cas, la distribution des positions de départ est choisie de façon aléatoire et uniforme dans l'espace de mouvement. Ce modèle est le plus utilisé lors des simulations bien qu'il ne caractérise que des mouvements simplistes. Certaines publications décrivent le *Random Waypoint* avec des temps de pause aléatoires.

Il est à noter que dans plusieurs publications, le mécanisme de *Random Walk* est utilisé dans *Random Waypoint* (choix de la vitesse et de l'angle de déplacement au lieu d'un point destination). D'autres publications confondent *Random Walk* et *Random Waypoint*, considérant les deux sans temps de pause.

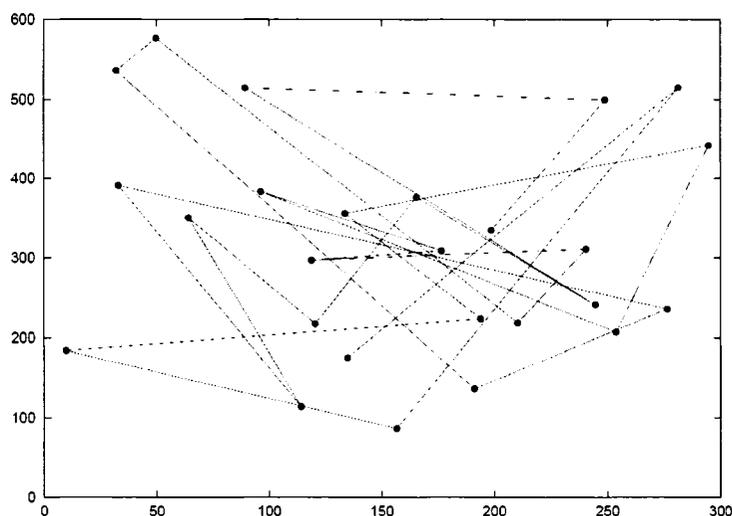


Figure 40 Trace du mouvement d'un nœud suivant le modèle Random Waypoint (Camp et al., 2002)

La figure 40 illustre un cas de mouvement. Les points correspondent aux localités visées par les lignes de déplacements successifs.

4.2.2.3 Boundless Simulation Area Mobility Model

Dans ce modèle, proposé par Haas (1997), les vitesses et angles de mouvement sont déterminés à des intervalles de temps réguliers. Leurs valeurs dans un intervalle de temps donné sont définies par :

$$\begin{aligned} v(t + \Delta t) &= \min \left[\max \left[v(t) + \Delta v, 0 \right], V_{\max} \right] \\ \theta(t + \Delta t) &= \theta(t) + \Delta \theta \end{aligned} \quad (3.1)$$

où $v(t + \Delta t)$ et $\theta(t + \Delta t)$ sont les valeurs de vitesse et d'angle dans l'intervalle de temps $[t, t + \Delta t[$, V_{\max} est la vitesse maximale admissible, Δv et $\Delta \theta$ sont les variations de vitesse et d'angle prenant des valeurs aléatoires uniformément distribués dans des intervalles, $[-\Delta v_{\max}, \Delta v_{\max}[$ et $[-\Delta \theta_{\max}, \Delta \theta_{\max}[$. Les fonctions $\min[]$ et $\max[]$ sont respectivement les fonctions minimum et maximum.

La gestion des contours est résolue en considérant que les contours opposés sont repliés sur eux-mêmes comme dans un tore illustré à la figure 41. Ainsi, un nœud qui disparaît à travers un bord apparaît instantanément sur le bord opposé.

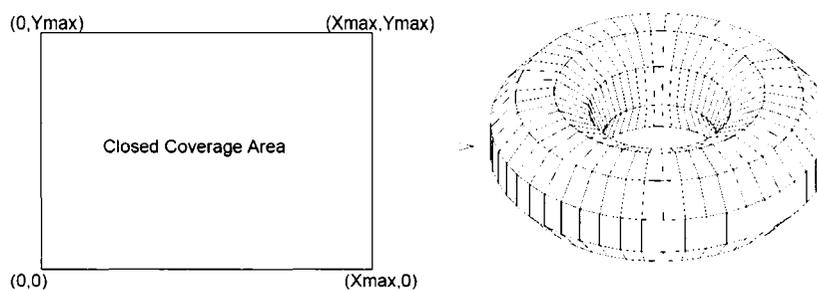


Figure 41 Représentation des bords dans le modèle Boundless Simulation Area (Camp et al., 2002)

Ce modèle de mouvement se caractérise par l'absence de temps de pause, sauf pour le cas d'une vitesse nulle. De plus, la dépendance des valeurs de vitesse et d'angle avec les valeurs précédentes prévient des changements brusques de vitesse et d'angle, figure 42, ce qui tend à rendre le mouvement plus réaliste que dans le cas de *Random Walk* ou de *Random Waypoint*.

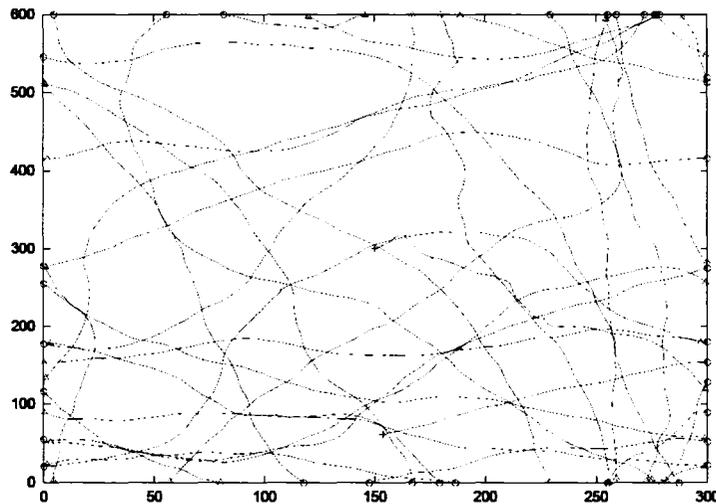


Figure 42 Trace du mouvement d'un nœud suivant le modèle Boundless Simulation Area (Camp et al., 2002)

4.2.2.4 Gauss-Markov Mobility Model

Haas et al. (2003) proposent ce modèle dans lequel les vitesses sont déterminées à des intervalles de temps réguliers. Le modèle part des postulats que le mouvement suit un processus gaussien et qu'il peut être décrit par un processus de Gauss-Markov.

En temps continu, un processus stationnaire gaussien est un processus de Gauss-Markov si sa fonction d'autocorrélation vérifie :

$$R_v(\tau) = E[v(t)v(t+\tau)] = \sigma^2 e^{-\beta|\tau|} + \mu^2 \quad (3.2)$$

Avec σ^2 la variance de $v(t)$, μ sa moyenne et $\beta \geq 0$ le facteur de mémoire.

À temps discret, les valeurs sur une étape des vitesses sont alors définies par :

$$\begin{aligned} v_x(t) &= \alpha_x v_x(t-dt) + (1-\alpha_x) \bar{v}_x + \sigma_x \sqrt{(1-\alpha_x^2)} g_x(t) \\ v_y(t) &= \alpha_y v_y(t-dt) + (1-\alpha_y) \bar{v}_y + \sigma_y \sqrt{(1-\alpha_y^2)} g_y(t) \end{aligned} \quad (3.3)$$

où $v_x(t)$ et $v_y(t)$ sont les valeurs des vitesses sur l'axe des abscisses et des ordonnées pour l'intervalle de temps $[t, t+dt[$, α est un paramètre dans $[0,1]$ qui caractérise la dépendance entre les instants consécutifs de calcul, \bar{v} est la valeur moyenne de la vitesse sur un horizon d'observation très long, $g(t)$ est une variable aléatoire d'une distribution normale d'écart type 1 et de moyenne nulle. Si $\alpha = 0$, la vitesse à un instant donné est alors indépendante de l'instant précédent et l'équation (3.3) devient :

$$\begin{aligned} v_x(t) &= \bar{v}_x + \sigma_x g_x(t) \\ v_y(t) &= \bar{v}_y + \sigma_y g_y(t) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Ce modèle de mouvement se caractérise par l'absence de temps de pause ou de changement brusque d'angle et de vitesse comme le montre la figure 43. De plus, l'introduction du facteur de pondération avec les valeurs précédentes tend à rendre le mouvement plus réaliste que dans le cas de *Random Walk* ou de *Random Waypoint*.

Dans un certain nombre de publications (notamment (Kwak et al., 2003)), le mouvement de Gauss-Markov est associé aux équations (3.1). Bien que les équations (3.1) et (3.3) aient le point commun d'intégrer une dépendance entre les différents instants de calcul, il est à noter qu'elles sont structurellement très différentes. Dans le premier cas, une distribution autour d'une vitesse moyenne est utilisée alors que dans le second cas, des vitesses minimales et maximales sont définies. De plus, le premier modèle est plus facile à paramétrer et les valeurs prises par la vitesse et l'angle de déplacement sont plus prédictibles.

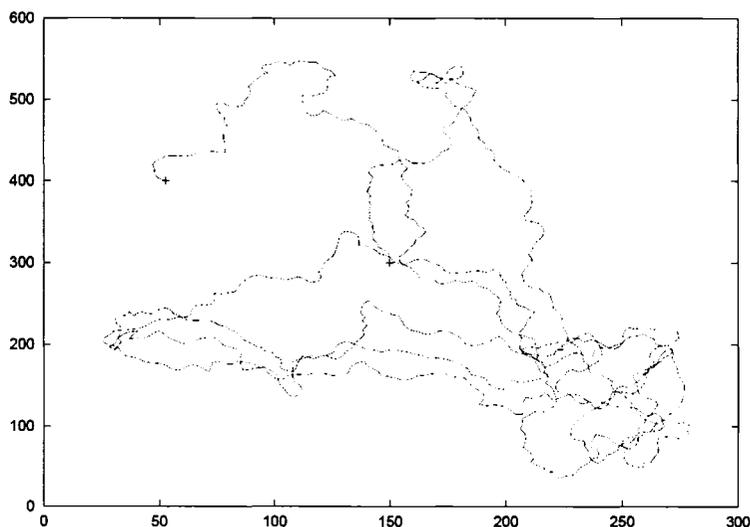


Figure 43 Trace du mouvement d'un nœud suivant le modèle Gauss-Markov (Camp et al., 2002)

4.2.2.5 Markovian Random Path Model

Ce modèle de mouvement décrit par Chiang (1998) utilise les chaînes de Markov pour modéliser le mouvement des nœuds. Trois états sont utilisés pour représenter chacune des positions x et y que prend un nœud lors de son déplacement. Sur la figure 44, les états (1) représentent une diminution des valeurs de x et/ou y . Les états (2) représentent quant à eux une augmentation de ces valeurs et les états (0) une pause dans ces directions. Sur l'exemple de la figure 44, on voit que la probabilité qu'un nœud reste en mouvement dans une certaine direction est plus grande que la probabilité que le nœud change de direction. De plus, les changements de direction rapides sont impossibles puisque qu'il ne peut y avoir qu'une transition dans une direction (x ou y) et que toute transition de l'état (1) à l'état (2), et vice versa, doit passer par l'état (0).

Le déplacement ainsi décrit est plus lisse que dans le cas de Gauss-Markov, comme on peut le voir sur la figure 45. Le choix des paramètres de transition peut être un élément

délicat. Campos et al. (2004) font des propositions de modèles plus complexes basées sur ce schéma.

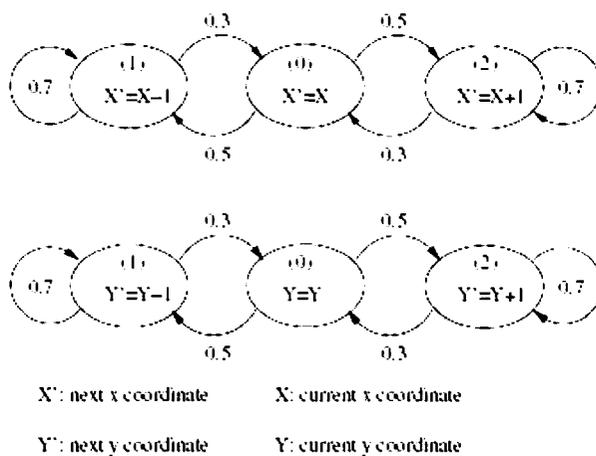


Figure 44 Modèle de mobilité Markovian Random Path (Chiang, 1998)

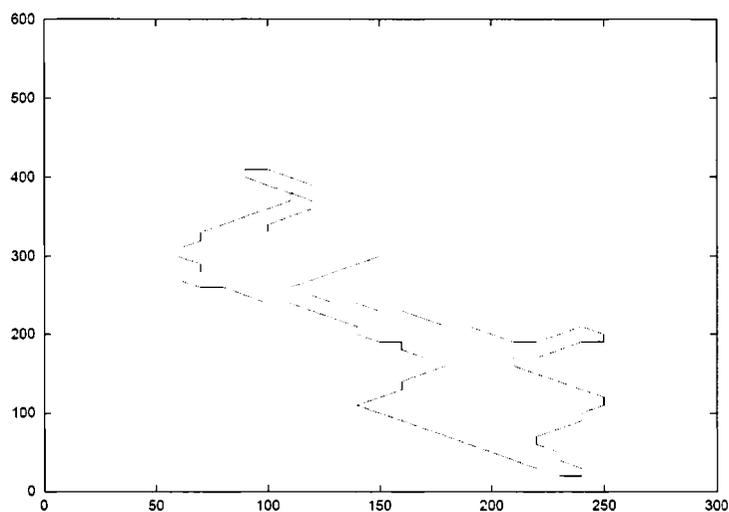


Figure 45 Trace du mouvement d'un nœud suivant le modèle MRP (Camp et al., 2002)

4.2.3 Le steady state

Lors des simulations, les distributions des positions, vitesses et angles de déplacement des nœuds MANETs varient avec le temps pour finalement converger vers un *steady state distribution*, ou *stationary distribution*, après quoi la distribution des positions reste stable sur la zone de simulation. Le temps de convergence vers cet état est plus ou moins long suivant le modèle de mouvement considéré. Tant que cette stationnarité n'est pas atteinte, le mouvement des nœuds affecte la performance du réseau de façon inhabituelle, c'est pourquoi un certain nombre de travaux tendent à vouloir caractériser le *steady state* et à proposer des solutions pour déterminer des distributions de positions et de mouvements initiaux proches de leur forme stationnaire. Les articles : (Bettstetter et al., 2003; Yu et al., 2003; Navidi et al., 2004; PalChaudhuri et al., 2005), présentent des études théoriques et des résultats intéressants sur ce sujet pour un certain nombre de modèles de mobilité.

La méthode la plus simple et la plus répandue pour remédier à ce problème et ainsi garantir que les résultats obtenus ne soient pas influencés par des états transitoires consiste à ignorer la première série de résultats obtenus par le modèle. Nous avons utilisé cette méthode lors des tests.

4.2.4 Influence du mouvement sur les performances des MANETs

Il paraît clair que des mouvements aussi différents que ceux des militaires sur un champ de bataille ou des citoyens dans les rues d'une ville auront des effets distincts sur les performances des protocoles de routage de MANETs.

Il n'est pas question ici de faire une synthèse de tous les travaux qui existent sur le sujet ni d'effectuer une étude approfondie à notre tour. Rappelons que l'intérêt que nous

portons aux modèles de mouvement a principalement pour but de fournir des scénarios de tests fiables à notre modèle de prédiction.

Un grand nombre d'articles décrivent l'influence des modèles de mouvement différents sur les performances des réseaux ad-hoc. Les performances peuvent non seulement considérablement varier d'un modèle à un autre, mais aussi suivant le choix de paramètres pour un modèle donné. Les publications : (Camp et al., 2002; Bhatt et al., 2003; Yu et al., 2003; Madsen et al., 2004; Ravikiran et al., 2004; Xiaolong et al., 2004; Sungsoon et al., 2005), traitent de ces questions.

Il peut être nécessaire de comparer les résultats des publications utilisant des protocoles et des modèles de mobilité différents. Dans ces conditions, il faut pouvoir caractériser chaque modèle de mobilité, les mettre en perspective et ainsi pouvoir effectuer des comparaisons dans de bonnes conditions. Malheureusement, dans les diverses publications, des modèles de mobilité et des choix différents de paramètres sont utilisés. Ces paramètres permettent de quantifier la mobilité d'un réseau particulier, en taille, nombre de nœuds et choix de caractéristiques du mouvement. La comparaison de leurs résultats, et par la même, de l'influence du mouvement sur les MANETs n'est donc pas chose aisée. Kwark et al. (2003), Bai et al. (2003) et Johansson et al. (1999) proposent certaines métriques et quelques outils pour répondre à ce problème.

De par la diversité des caractéristiques disponibles, la prise en compte des éléments de mobilité est assez complexe. Prenons par exemple la vitesse relative des nœuds. Cet élément a une grande influence sur la stabilité des liens. Cependant, une faible vitesse relative moyenne peut décrire un nombre important de situations qui peuvent, suivant les protocoles utilisés, avoir des effets très différents. Citons à titre d'exemple :

- grande mobilité avec d'importants temps de pause. Les liens seraient alors très stables par moment, mais tout aussi instables à d'autres moments.
- Une faible mobilité, donc une stabilité moyenne mais uniforme des liens.

Il découle de cet exemple simple qu'on ne peut inclure des éléments de mobilité dans l'analyse que si un nombre important de paramètres sont pris en compte pour être recoupés, et ainsi donner une information pertinente. Dans notre exemple, la prise en compte du temps de pause permet de dissocier ces deux cas mais serait insuffisante si les nœuds suivaient plusieurs types de mouvements. Bien que ces éléments d'analyse restent simplistes, ils montrent la complexité que peut représenter l'analyse du mouvement.

Kwak et al. (2003) présentent une étude assez détaillée de tous ces problèmes. De plus, ils proposent une approche très intéressante de mesure standard de la mobilité. Ils partent du constat de l'importance que représente le nombre de liens entre les couples de nœuds de MANETs sur les performances de ce dernier. Ils définissent donc une fonction d'éloignement (*remoteness*), comme étant :

$$R_{ij}(t) = F(d_{ij}(t))$$

où $d_{ij}(t)$ est la distance entre les nœuds i et j à un instant particulier t et $F(\)$ est une fonction non linéaire ayant des propriétés particulières. La principale caractéristique est le fait que la variation du *remoteness* est plus importante à la limite de la distance de portée radio qu'à des distances largement inférieures ou largement supérieures. Ceci correspond à la situation réelle dans laquelle la connectivité entre deux nœuds est très affectée lorsque la distance qui les sépare est proche de la distance de portée radio. Dans ce cas, on peut en effet perdre la connexion. En revanche, une variation de la distance dans d'autres situations affectera dans une moindre mesure le lien entre ces deux nœuds. La mesure de la mobilité d'un MANET, *mobility measure*, va donc dépendre de la fonction d'éloignement (*remoteness*) des nœuds le constituant.

Bai et al. (2003) proposent « *Impact of Mobility on Performance of Routing protocols for Ad-hoc Networks* » (IMPORTANT), un outil qui permet de comparer les modèles de mouvement entre eux et de fournir des éléments pour déduire leurs influences sur la

connectivité et le routage. Leurs métriques permettent de déterminer les dépendances temporelles et spatiales et de recouper ces informations avec les durées des liens et les performances des protocoles de routage. La figure 46 illustre ce fonctionnement.

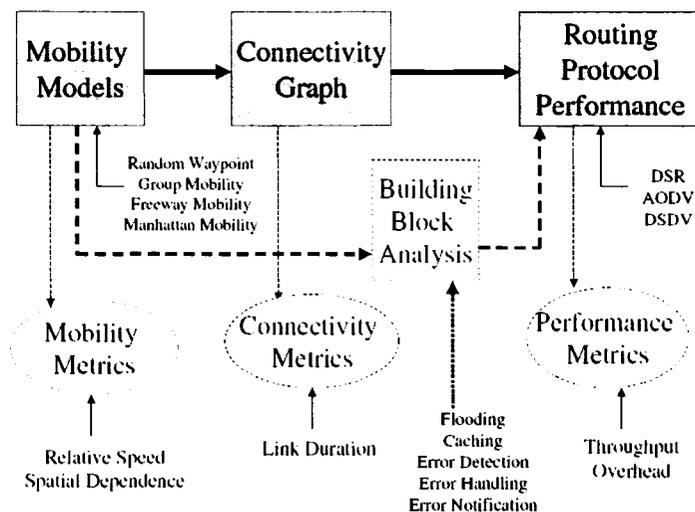


Figure 46 Graphique de fonctionnement de IMPORTANT (Bai et al., 2003)

4.3 Modèles de mobilité implémentés et développés

Comme présenté dans les section précédentes, les modèles de mouvement sont soit très simplistes soit très complexes à mettre en oeuvre et à paramétrer. L'idée ici est donc de concevoir des modèles de mouvement couvrant des caractéristiques et des cas complexes sans pour autant devoir représenter des scénarios particuliers ou très précis. Ils restent ainsi assez généraux et gardent leur programmation et leur utilisation simples. Le choix a donc été de partir du modèle *Boundless Simulation Area mobility model* (BSA) et d'y apporter des modifications dans le but d'intégrer les caractéristiques principales du *Task Based Movement*.

L'intérêt du modèle *Boundless Simulation Area* est dans sa propriété de dépendance temporelle (*temporal dependency*) entre les instants de calcul. Ceci tout en permettant à

l'utilisateur une grande maîtrise sur le mouvement et sans a priori majeur sur celui-ci contrairement au modèle de *Gauss-Markov*.

Plusieurs modifications ont été apportées au BSA regroupées et implémentées dans 3 modèles de mouvement que nous décrirons ultérieurement :

- La modification de la gestion des contours avec la suppression du repliement de l'espace, celui-ci n'est plus considéré comme un tore, peu réaliste.
- La considération d'une vitesse de mouvement minimale non nulle V_{\min} .
- L'intégration de laps de temps, « intervalles », de durées aléatoires entre les mises à jour de vitesse et angle.
- L'ajout de réinitialisations des vitesses et angles de déplacement correspondant à des mouvements avec des buts différents. Le temps est découpé en « périodes » de mouvement et « périodes » de pause, de durées aléatoires. Une période de mouvement est formée d'« intervalles ». Au début de chaque période de mouvement, les valeurs de vitesse et d'angle sont réinitialisées. Durant une période de mouvement, il existe une dépendance entre les valeurs successives des vitesses et des angles.
- L'ajout des temps de pause avant chaque réinitialisation dont la durée dépend du temps de mouvement qui précède. Ces pauses correspondent au cas où le nœud a atteint son but.
- La variation de la vitesse est telle qu'elle tend, avec une certaine probabilité, vers une valeur optimale V_{opt} . Ceci permet de modéliser le fait que lors d'un déplacement donné, une personne tend à maintenir une vitesse uniforme autour d'une vitesse « optimale ».
- La variation angulaire $\Delta\theta$ reste aléatoire mais a tendance à être de signe inverse à la variation précédente. Ceci dans le but d'obtenir des trajectoires

moins courbé. Sur une « période », le mouvement serait alors plus rectiligne comme peut l'être un déplacement avec but.

Tous les modèles ont été implémentés et simulés sous Matlab. Les sections suivantes présentent plus en détail les modifications, leurs intérêts et leurs utilisations.

4.3.1 Random Waypoint mobility model

Random Waypoint mobility model (RW) étant le modèle de référence, nous l'avons implémenté dans Matlab. Pour déterminer le temps de pause sans aucun a priori, un point destination et une vitesse de mouvement sont choisis au hasard, comme dans le cas d'un mouvement normal. Le temps d'arrêt est alors le temps qu'aurait mis le nœud pour se rendre à cette destination avec ce mouvement « fictif ».

Sur la figure 47 sont représentés deux tracés de 60 minutes de mouvement pour un nœud, avec :

$$\begin{aligned} V_{\max} &= 1,6 \text{ m/s} & X_{\min} &= Y_{\min} = 0 \text{ m} \\ V_{\min} &= 1 \text{ m/s} & X_{\max} &= Y_{\max} = \{500, 1000\} \text{ m} \end{aligned}$$

Les valeurs de positions, de vitesses et d'angles sont récoltées toutes les secondes, ce qui correspond à la précision des résultats. Les points de calculs correspondent aux localités visées par les déplacements successifs.

Nous pouvons voir que les mouvements sont rectilignes entre deux points de pause successifs. De plus, en comparant les deux traces, correspondant à deux espaces carrés de côtés respectifs 500m et 1000m, nous voyons que dans le cas de grandes surfaces, le nœud va effectuer des déplacements sur de longues distances et de durées importantes. En effet, puisque les destinations successives sont choisies au hasard dans l'espace de mouvement, elles seront en moyenne plus éloignées les unes des autres que dans le cas de surfaces plus petites.

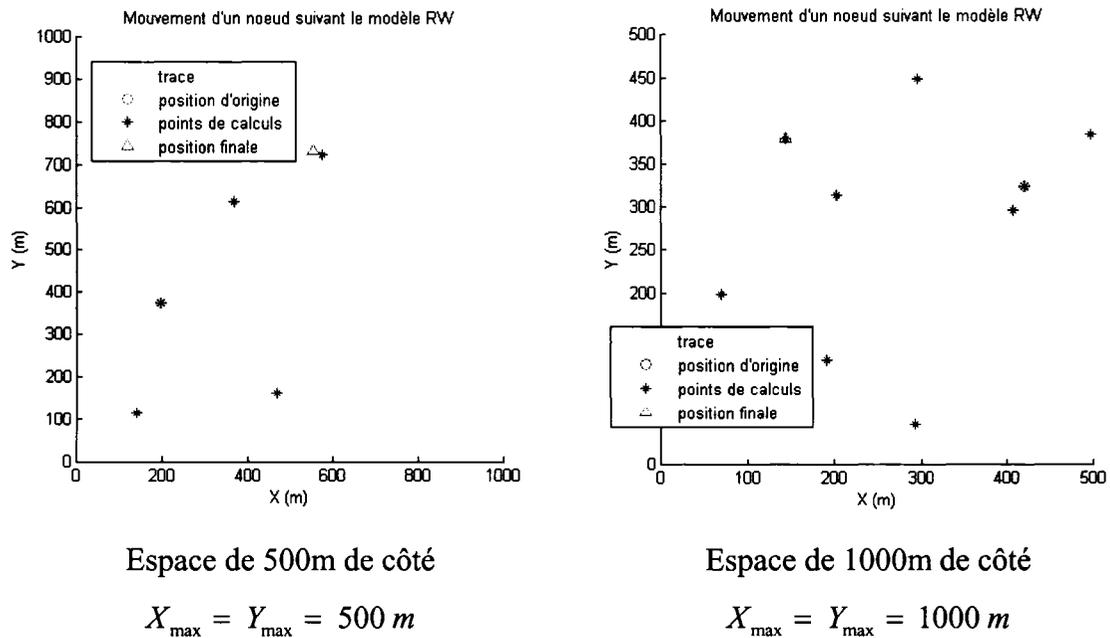


Figure 47 Traces d'une heure de mouvement d'un nœud suivant le modèle RW

Nous avons choisi d'implémenter le fonctionnement que nous avons décrit dans la section 4.2.2.2, car cette implémentation reste la plus répandue¹³. Il est cependant à noter que, si comme dans certaines publications, nous avons considéré le fonctionnement de *Random Walk* avec des temps de pause, un nœud aurait effectué des déplacements indépendants de la taille de l'espace considéré. Nous aurions alors obtenu des traces semblables dans les deux cas. Cette différence de comportement illustre bien l'influence que peut avoir le choix d'une implémentation particulière sur les performances d'un modèle de mouvement.

¹³ L'implémentation de *Random Waypoint* dans Opnet correspond au fonctionnement décrit dans la section 4.2.2.2.

La figure 48, illustre les valeurs obtenues pour les vitesses et les angles de déplacement¹⁴. L'angle est considéré nul lorsque la vitesse est zéro (correspondant à une pause). Nous pouvons constater que les valeurs de vitesse et d'angle sur un intervalle de temps sont indépendantes de celles de l'intervalle précédent. De plus, le temps de pause est indépendant du temps de mouvement.

Nous avons préféré illustrer les vitesses et angles dans le cas de l'espace de 500m de côté, cela n'affecte pas la validité de la comparaison avec les autres modèles de mouvement tout en nous fournissant plus de données.

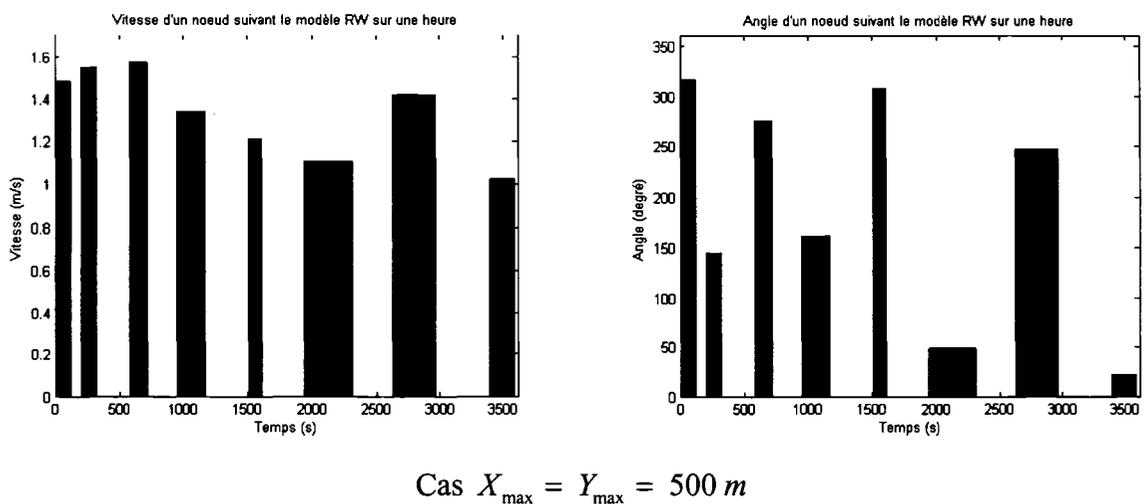


Figure 48 Vitesses et angles de mouvement d'un nœud suivant le modèle RW

4.3.2 Temporal Dependency mobility model

Le modèle *Temporal Dependency mobility model* (TD) est basé sur *Boundless Simulation Area Mobility Model* intègre :

¹⁴ l'angle étant pris avec l'axe $x = 0, y > 0$ et dans le sens trigonométrique indirect, sens des aiguilles d'une montre

- La modification de la gestion des contours avec la suppression du repliement de l'espace, celui-ci n'est plus considéré comme un tore, peu réaliste.
- La considération d'une vitesse de mouvement minimale non nulle V_{\min} .

Les valeurs des vitesses et angles sur une durée de temps fixe Δt , que nous désignerons par « étape », sont définies par :

$$\begin{aligned} v(t + \Delta t) &= \min \left[\max \left[v(t) + \Delta v, V_{\min} \right], V_{\max} \right] \\ \theta(t + \Delta t) &= \theta(t) + \Delta \theta \end{aligned} \quad (3.5)$$

où $v(t + \Delta t)$ et $\theta(t + \Delta t)$ sont les valeurs de vitesse et d'angle sur l'étape $[t, t + \Delta t[$, V_{\max} et V_{\min} sont les vitesses maximales et minimales admissibles, Δv et $\Delta \theta$ sont les variations de vitesse et d'angle prenant des valeurs aléatoires dans des intervalles uniformément distribués $[\Delta v_{\min}, \Delta v_{\max}]$ et $[\Delta \theta_{\min}, \Delta \theta_{\max}]$. Les fonctions $\min[]$ et $\max[]$ sont respectivement les fonctions minimum et maximum.

Vu que l'espace n'est plus replié sur lui-même, quand le mouvement d'un nœud pour l'intervalle $[t, t + \varepsilon[$ le fait sortir de la zone de simulation, $v(t + \varepsilon)$ et $\theta(t + \varepsilon)$ sont considérés de la manière suivante, illustrés sur la figure 49 :

$$\begin{aligned} v(t + \varepsilon) &= v(t) \\ \theta(t + \varepsilon) &= \theta(t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (3.6)$$

ε correspond à la précision de nos résultats, qui est le rythme auquel les valeurs de position et de vitesse sont sauvegardées. Cette valeur est arbitraire mais doit rester petite pour que l'effet de bord reste acceptable.

Après la rotation nécessaire pour ne plus sortir de la zone, il peut y avoir un maximum de 2 rotations successives de 120° , le nœud repartira avec la même vitesse sauf si

l'arrivée à la bordure correspond à un instant de calcul de la vitesse $v(t + \Delta t)$, auquel cas, les équations (3.5) sont utilisées lorsque le nœud repart.

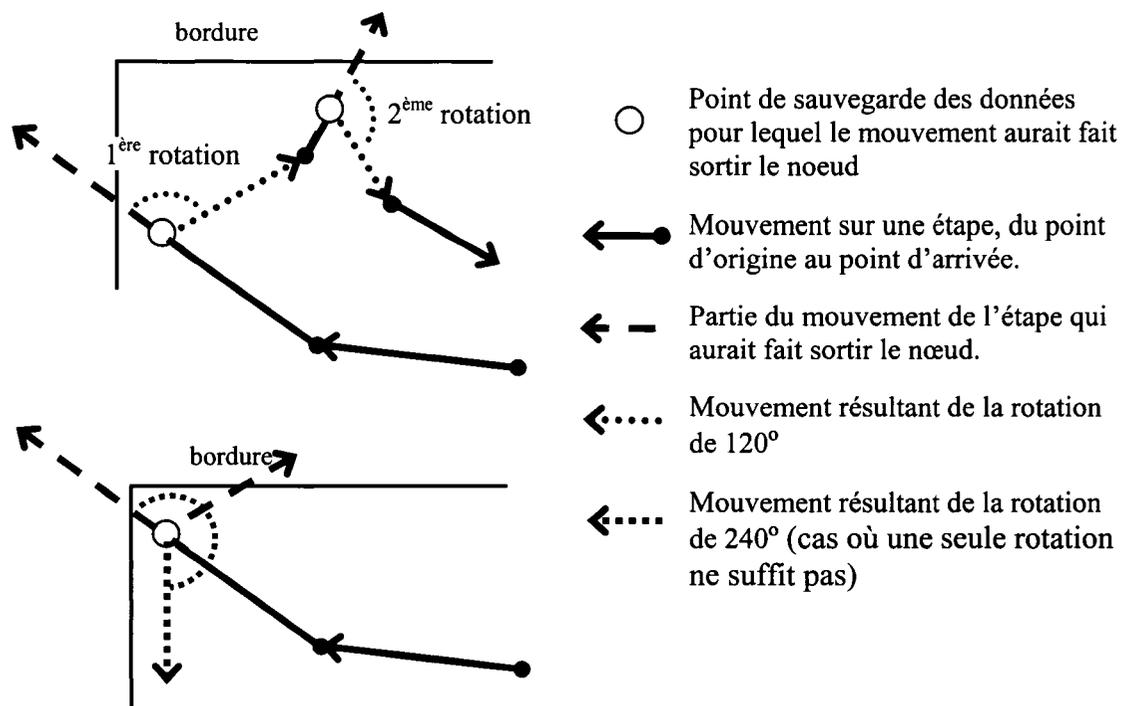


Figure 49 Gestion des bords

Ces choix ont pour but de garantir un éloignement des bords tout en gardant un algorithme et donc une programmation simple. En effet, les gestions des frontières qui consistent à effectuer une réflexion (figure 39) ou un retour en arrière (ajout de 180° à l'angle) ne garantissent pas toujours un éloignement du bord, des exemples de cas problématiques sont représentés sur la figure 50.

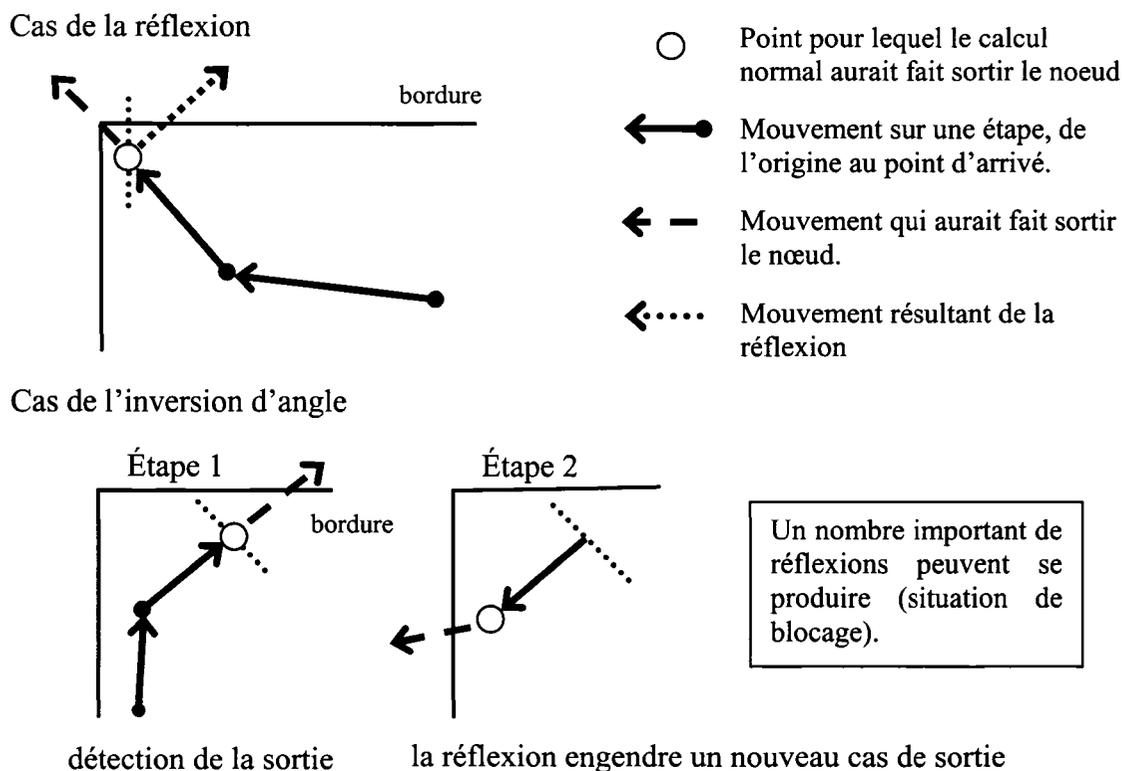


Figure 50 Cas problématiques dans la gestion de bord

La distribution initiale ($t=0$) de la position se fait selon une distribution uniforme des positions x et y entre les valeurs maximales et minimales de sécurité. Ces valeurs sont définies par :

$$\begin{aligned}
 XSecMax &= X_{\max} - V_{\max} \times \varepsilon \\
 XSecMin &= X_{\min} + V_{\max} \times \varepsilon \\
 YSecMax &= Y_{\max} - V_{\max} \times \varepsilon \\
 YSecMin &= Y_{\min} + V_{\max} \times \varepsilon
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

avec $XSecMin$, $XSecMax$, $YSecMin$ et $YSecMax$ les valeurs minimales et maximales de sécurité suivant l'axe des abscisses et celui des ordonnées. V_{\max} représente la vitesse maximale admissible et ε la précision temporelle.

La distribution initiale de la vitesse $v(0)$ est prise selon une distribution uniforme dans $[V_{\min}, V_{\max}]$. L'angle $\theta(0)$ est pris selon une distribution uniforme en degré dans $[0, 360[$.

Sur la figure 51 sont représentées deux tracés de 60 minutes de mouvement pour un nœud, avec :

$$\begin{array}{ll}
 V_{\max} = 1,6 \text{ m/s} & \Delta t = \{10, 50\} \text{ s} \\
 V_{\min} = 1 \text{ m/s} & X_{\min} = 0 \text{ m} \\
 \Delta v_{\max} = 0,2 \text{ m/s} & X_{\max} = 1000 \text{ m} \\
 \Delta v_{\min} = -\Delta v_{\max} & Y_{\min} = 0 \text{ m} \\
 \Delta \theta_{\max} = 20^\circ & Y_{\max} = 1000 \text{ m} \\
 \Delta \theta_{\min} = -\Delta \theta_{\max} &
 \end{array}$$

Les valeurs de positions, de vitesses et d'angles sont récoltées toutes les secondes, ce qui correspond à une précision d'une seconde, $\varepsilon = 1$.

En comparant la figure 42 et la figure 51, nous pouvons constater que, mise à part la gestion des contours, le mouvement des modèles *Boundless Simulation Area* et *Time Dependency* sont très semblables. Pour le second modèle, nous constatons bien que le nœud change de mouvement lorsqu'il s'approche du bord comme expliqué plus haut. De plus, en comparant avec RW, nous pouvons observer, figure 47 et figure 51, que la relation entre les valeurs de vitesse et d'angle sur les intervalles de temps successifs rend le mouvement TD plus lisse et plus courbé que dans le cas de RW. Nous pouvons également remarquer que la figure 51 de droite est très semblable à la figure 43 qui décrit le mouvement de Gauss-Markov.

Globalement, nous pouvons constater qu'en augmentant la fréquence de calcul, donc en diminuant le temps Δt entre les instants de calcul, nous obtenons un mouvement plus « sinueux », qui ressemble plus au déplacement d'un insecte (fourmi ou blatte) qu'à celui d'un humain.

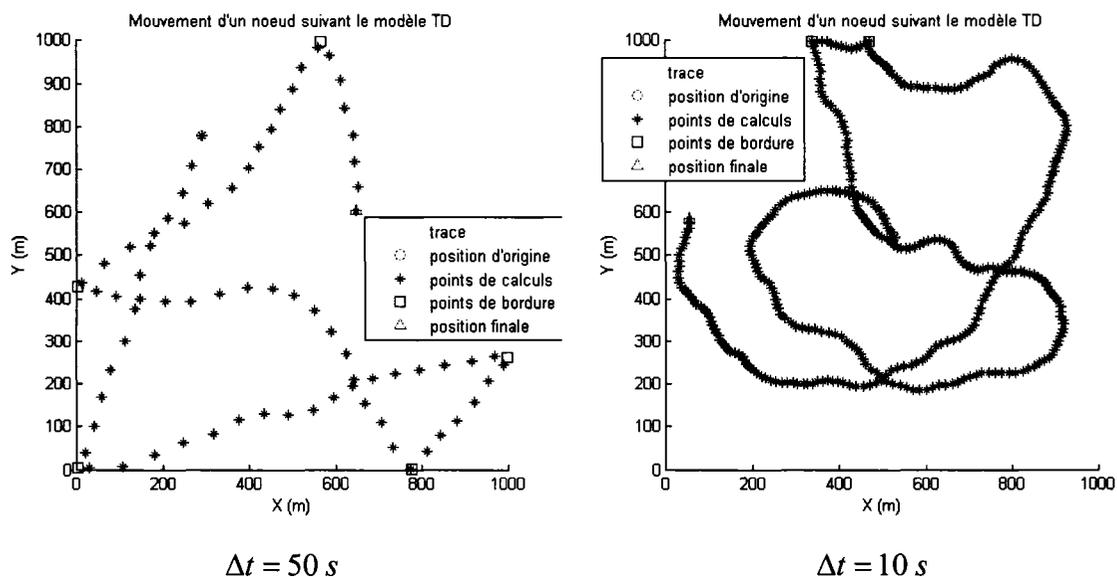


Figure 51 Trace d'une heure de mouvement d'un nœud suivant le modèle TD

Sur la figure 52 et la figure 53 sont illustrées les valeurs obtenues pour les vitesses et les angles de déplacement¹⁵. L'angle est considéré nul lorsque la vitesse est zéro. Nous constatons bien des variations graduelles, positives ou négatives, de la vitesse et de l'angle sauf pour les points de bordures pour lesquelles l'angle change considérablement (de 120° ou de 240°) et la vitesse s'annule momentanément. Nous pouvons également voir l'influence qu'a le choix du pas de calcul Δt sur le mouvement : plus petit est le pas, plus graduel et courbé est le mouvement et moins de chance a-t-il d'arriver à un bord.

¹⁵ l'angle étant pris avec l'axe $x = 0, y > 0$ et dans le sens trigonométrique indirect (sens des aiguilles d'une montre).

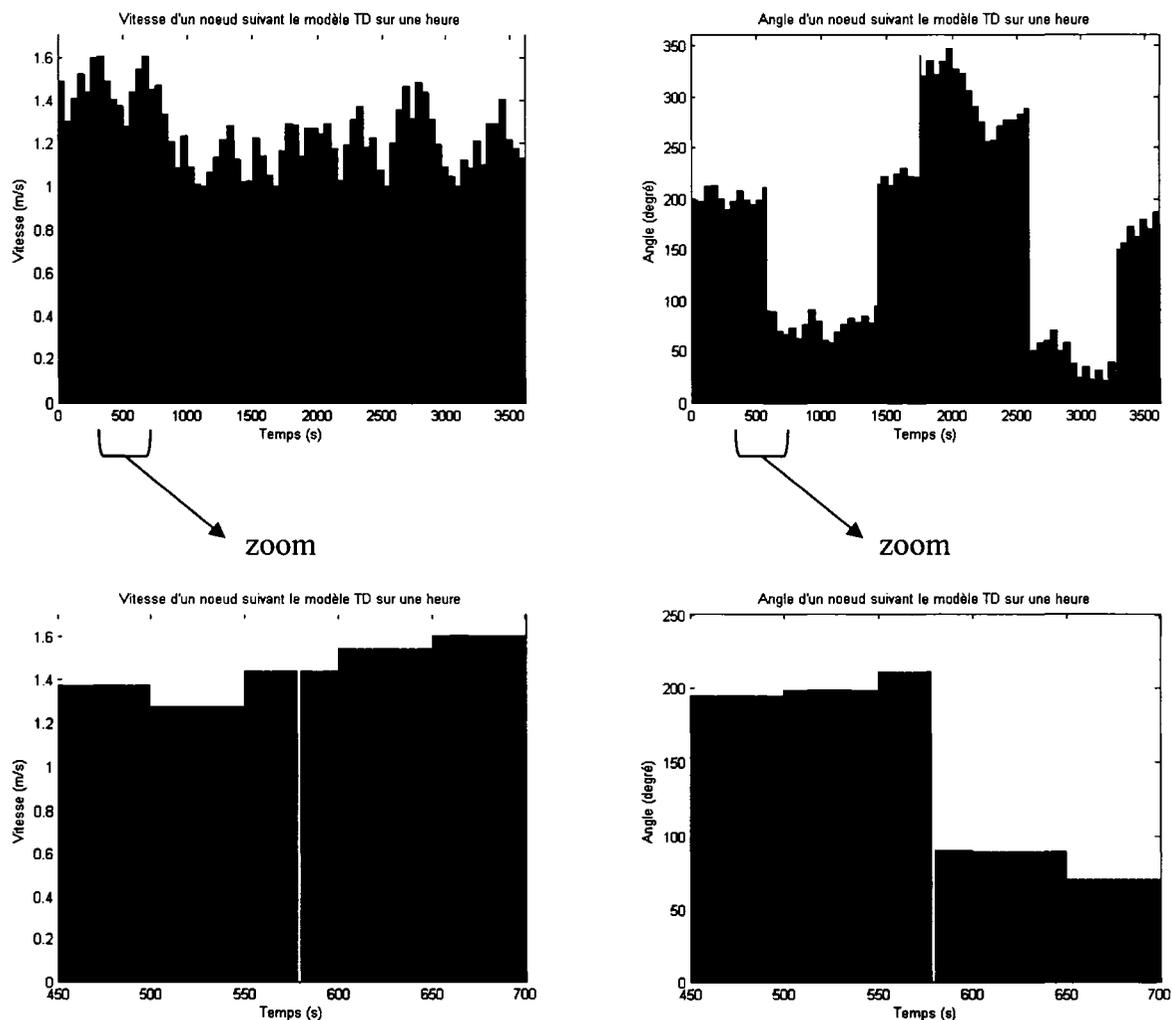


Figure 52 Vitesse et angle de mouvement d'un nœud suivant le modèle TD pour $\Delta t = 50$ s

Notons que le modèle pourrait être amélioré en prenant une distribution non uniforme dans $[\Delta v_{\min}, \Delta v_{\max}]$ et $[\Delta \theta_{\min}, \Delta \theta_{\max}]$, ex. exponentielle. Nous pourrions ainsi considérer des variations importantes, plus ou moins fréquentes que des petites variations. De plus les bornes et la distribution pourraient varier d'un nœud (individu) à l'autre.

Enfin, nous pourrions avoir des proportions de ces différentes valeurs, correspondant à des caractéristiques différentes (ex. tranches d'âges), cohérentes avec les proportions de ces populations dans le réseau considéré.

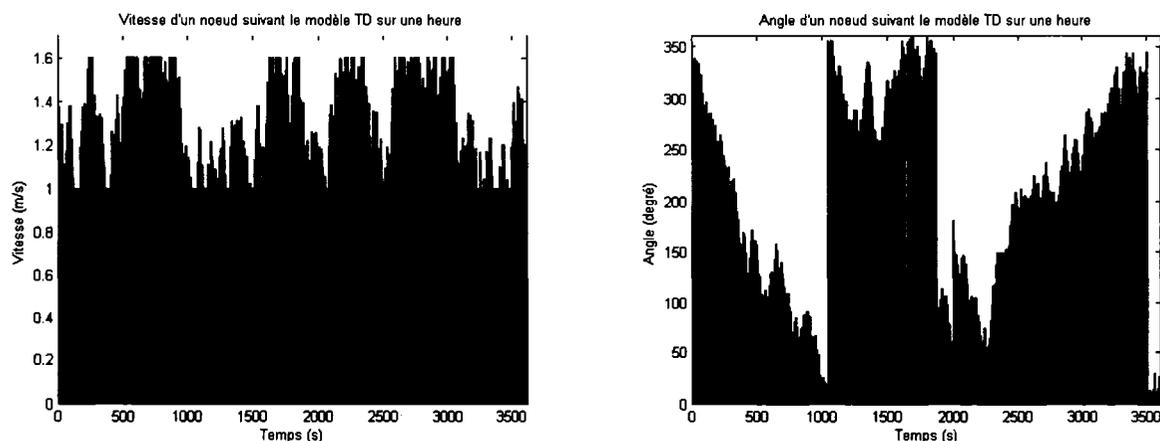


Figure 53 Vitesse et angle de mouvement d'un nœud suivant le modèle TD pour $\Delta t = 10 s$

4.3.3 Temporal Dependency with Pause time Dependency mobility model

Le premier modèle développé, *Temporal Dependency with Pause time Dependency mobility model* (TDPD), est basé sur le modèle TD et intègre les modifications suivantes :

- La substitution des « étapes » de durées fixes, entre les mises à jour de vitesse et d'angle, par des « intervalles » de durées aléatoires.
- L'ajout de réinitialisations des vitesses et angles de déplacement correspondant à des mouvements avec des buts différents. Le temps est découpé en « périodes » de mouvement et « périodes » de pause, de durées aléatoires. Une période de mouvement est formée d'« intervalles ». Au début de chaque

période de mouvement, les valeurs de vitesse et d'angle sont réinitialisées. Durant une période de mouvement, il existe une dépendance entre les valeurs successives des vitesses et des angles.

- L'ajout des temps de pause avant chaque réinitialisation dont la durée dépend du temps de mouvement qui précède. Ces pauses correspondent au cas où le nœud a atteint son but.

Le mouvement est donc réinitialisé au début de chaque période, vitesse et angle pris aléatoirement, ce qui correspond au cas où le nœud atteint le but de son déplacement, un temps de pause lié à la durée du mouvement est alors observé.

Une période est constituée d'un ou de plusieurs intervalles. Sur un intervalle, le mouvement du nœud est inchangé (sauf dans le cas où le nœud atteint la bordure). De plus, ce mouvement dépend de celui de l'intervalle précédent suivant les équations ci-dessous, la figure 54 illustre ces éléments :

$$\begin{aligned} v(t + \Delta I) &= \min \left[\max \left[v(t) + \Delta v, V_{\min} \right], V_{\max} \right] \\ \theta(t + \Delta I) &= \theta(t) + \Delta \theta \end{aligned} \quad (3.8)$$

où $v(t + \Delta I)$ et $\theta(t + \Delta I)$ sont les valeurs de vitesse et d'angle sur l'« intervalle » $[t, t + \Delta I[$, V_{\max} et V_{\min} sont les vitesses maximales et minimales admissibles, Δv et $\Delta \theta$ les variations de vitesse et d'angle prenant des valeurs aléatoires dans des intervalles uniformément distribués, $[\Delta v_{\min}, \Delta v_{\max}]$ et $[\Delta \theta_{\min}, \Delta \theta_{\max}]$. Les fonctions $\min[]$ et $\max[]$ sont respectivement les fonctions minimum et maximum.

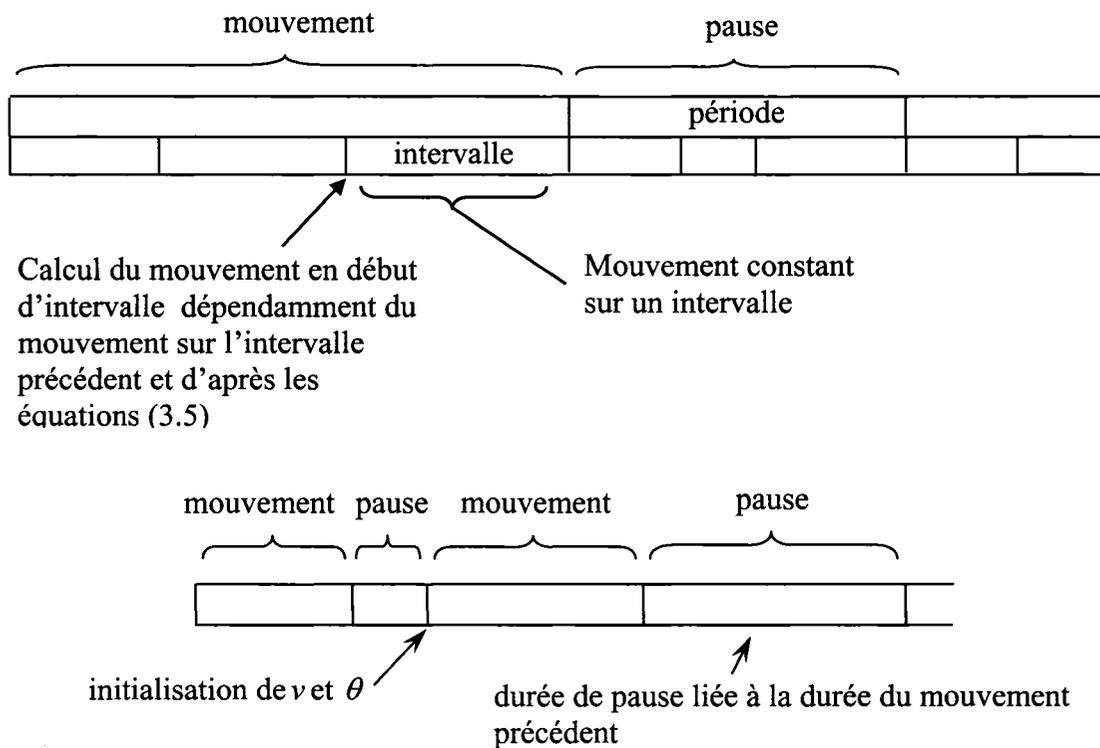


Figure 54 Décomposition temporelle du TDPD

Les points suivants résument le fonctionnement :

- Deux durées sont définies : « intervalle » et « période ».
- Il y a une alternance des mouvements et des pauses, chacun d'une durée aléatoire, ΔP , dite « période ».
- Au début d'une « période » de mouvement, les vitesses et angles sont réinitialisés.
 - La durée d'une période ΔP dans le cas d'un mouvement est prise d'après une distribution uniforme sur $[PerMin, PerMax]$, avec $PerMin$ et $PerMax$ étant respectivement les durées minimales et maximales admissibles. Celle-ci est donc indépendante des mouvements et pauses précédents.

- La durée d'une période ΔP dans le cas d'une pause est prise d'après une distribution uniforme sur :

$$\left[PerMouv - \frac{\xi}{2}(PerMax - PerMin), PerMouv + \frac{\xi}{2}(PerMax - PerMin) \right]$$

Avec $PerMouv$ la durée de la période de mouvement qui précède et ξ un facteur de proportionnalité du temps de pause. La distribution du temps de pause est donc centrée autour de la valeur du temps de mouvement qui précède. Plus ξ est petit, plus le temps de pause sera proche du temps de mouvement. Le cas $\xi = 0$ correspond au cas où la durée de pause est égale à la durée de mouvement.

- Une « période » de mouvement est constituée de plusieurs « intervalles » de durée ΔI aléatoire. Le mouvement est constant sur un « intervalle ». Au début d'un « intervalle », les valeurs de vitesses et angles dépendent de celles de l'intervalle précédent suivant les équations (3.8).

La durée d'un intervalle ΔI est prise d'après une distribution uniforme sur $[IntMin, IntMax]$, avec $IntMin$ et $IntMax$ respectivement les durées minimales et maximales admissibles. Si la fin d'une période ne coïncide pas avec la fin « normale » du dernier intervalle le constituant, celui-ci est coupé avant sa fin « normale », sa durée sera alors moins longue que $IntMin$.

Pour le cas $\xi = 0.5$, la durée d'une période de pause $PerPaus$ sera prise dans la distribution uniforme sur :

$$\left[PerMouv - \frac{PerMax - PerMin}{4}, PerMouv + \frac{PerMax - PerMin}{4} \right]$$

Avec $PerMouv$, la durée de la période de mouvement qui précède, $PerMin$ et $PerMax$ respectivement les durées minimales et maximales admissibles. La figure 55 illustre les valeurs que peut prendre $PerPaus$ dans ce cas.

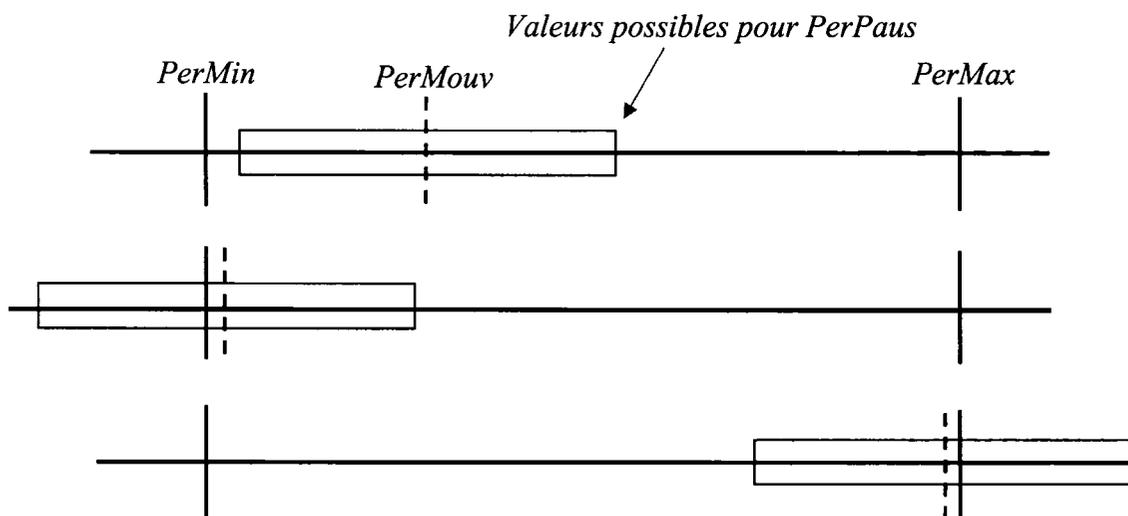


Figure 55 Temps de pause possibles pour $\xi = 0.5$

La gestion des bords est identique à celle de TD, expliquée dans la section 4.3.2, page 81. La distribution initiale (à $t=0$) de la position se fait de la même façon que pour TD, exposé à la page 83. La distribution initiale de la vitesse et de l'angle se fait de la même façon que pour TD présenté à la page 84. À ($t=0$), le nœud commence par une période de mouvement.

La figure 56 représente deux tracés de 60 minutes de mouvement pour un nœud, avec :

$$\begin{array}{lll}
 V_{\max} = 1,6 \text{ m/s} & \Delta t = 1 \text{ s} & IntMin = \{5, 40\} \text{ s} \\
 V_{\min} = 1 \text{ m/s} & X_{\min} = 0 & IntMax = \{15, 60\} \text{ s} \\
 \Delta v_{\max} = 0,2 \text{ m/s} & X_{\max} = 1000 \text{ m} & PerMin = \{300, 180\} \text{ s} \\
 \Delta v_{\min} = -\Delta v_{\max} & Y_{\min} = 0 & PerMax = \{400, 300\} \text{ s} \\
 \Delta \theta_{\max} = 20^\circ & Y_{\max} = 1000 \text{ m} & \xi = 0.5 \\
 \Delta \theta_{\min} = -\Delta \theta_{\max} & &
 \end{array}$$

Les valeurs de positions, de vitesses et d'angles sont récoltées toutes les secondes, ce qui correspond à une précision d'une seconde, $\varepsilon = 1$.

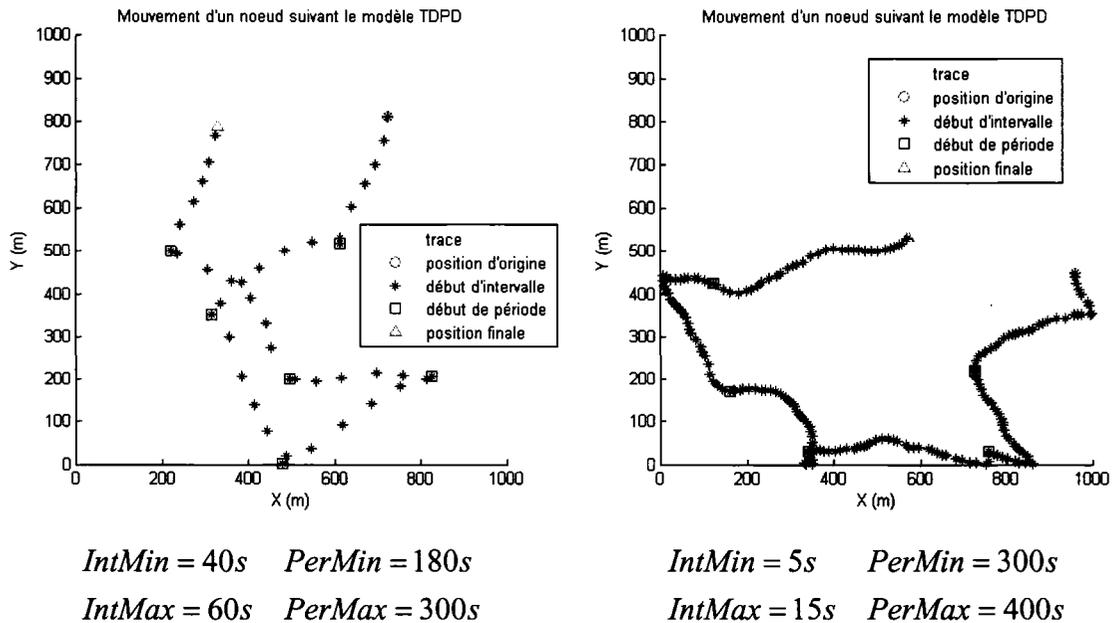


Figure 56 Trace d'une heure de mouvement d'un noeud suivant le modèle TDPD

Nous pouvons constater d'après la figure 51 et la figure 56, que dans le cas de TDPD, contrairement à TD, le noeud n'effectue pas de grand changement de direction uniquement proche du bord mais également au début de chaque période. Entre deux débuts de période consécutifs, le mouvement est identique à TD. Ceci correspond bien à une approximation d'un déplacement intégrant des mouvements avec but. Le mouvement global est moins courbé que dans le cas de TD, ceci est dû à l'indépendance des mouvements entre les périodes successives.

Nous pouvons également observer que l'augmentation de la fréquence de calcul et la durée des périodes, ce qui correspond à de courtes durées d'intervalles et de longues durées de périodes, rend le mouvement moins « sinueux » que dans le cas de TD.

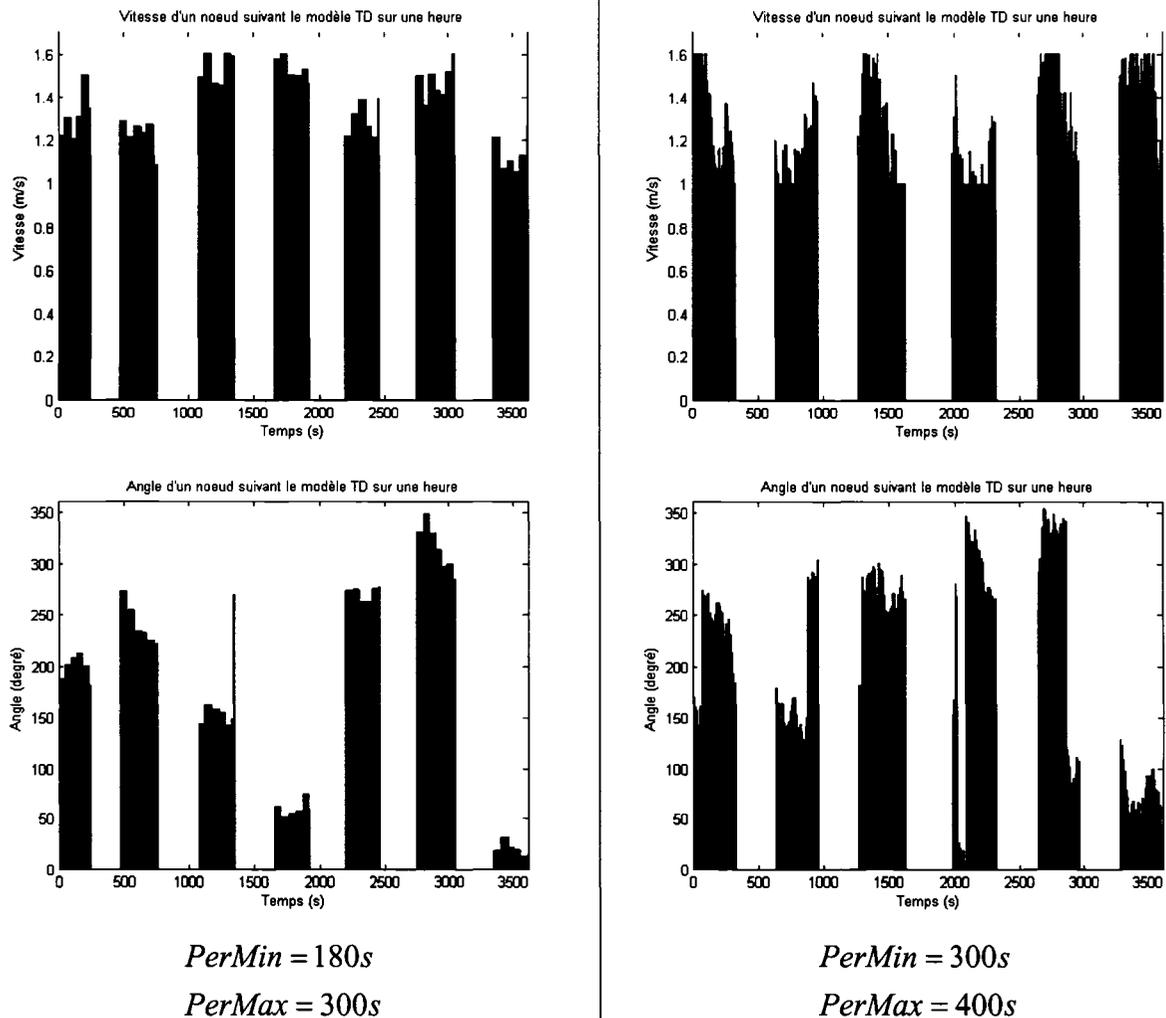


Figure 57 Vitesse et angle de mouvement d'un nœud suivant le modèle TDPD

Sur la figure 57 sont illustrées les valeurs obtenues pour le module de la vitesse et l'angle de déplacement¹⁶. L'angle est considéré nul lorsque la vitesse est zéro. Nous pouvons observer l'existence de temps de pause et la non continuité des valeurs de vitesse et d'angle d'une période à l'autre. En comparant la figure 52 avec la figure 53,

¹⁶ l'angle étant pris avec l'axe $x = 0, y > 0$ et dans le sens trigonométrique indirect (sens des aiguilles d'une montre).

nous pouvons observer que le mouvement est semblable sur une période. En comparant avec la figure 48, nous pouvons constater que dans le cas de TDPD, le temps de pause est lié au temps de mouvement contrairement au cas de RW.

Notons que le modèle pourrait être amélioré en prenant une distribution non uniforme dans $[PerMin, PerMax]$ et dans $\left[-\frac{\xi}{2}(PerMax - PerMin), \frac{\xi}{2}(PerMax - PerMin)\right]$, ex. exponentielle. Nous pourrions ainsi considérer des déplacements avec buts distants, plus ou moins fréquents que des déplacements avec buts proches, et de temps de pause plus ou moins proche du temps de mouvement. De plus, les bornes et la distribution pourraient varier d'un nœud (individu) à l'autre. Enfin, nous pourrions avoir des proportions de ces différentes valeurs, correspondante à des caractéristiques différentes (ex. tranches d'âges), aux proportions de ces populations dans le réseau considéré.

4.3.4 Temporal Dependency and Movement Dependency mobility model

Le deuxième modèle développé, *Temporal Dependency and Movement Dependency Mobility Model* (TDMD), est basé sur le modèle TDPD. Il intègre les modifications suivantes :

- La variation de la vitesse est telle qu'elle tend, avec une certaine probabilité, vers une valeur optimale V_{opt} . Ceci permet de modéliser le fait que lors d'un déplacement donné, une personne tend à maintenir une vitesse uniforme autour d'une vitesse « optimale ».
- La variation angulaire $\Delta\theta$ reste aléatoire mais a tendance à être de signe opposé à la variation précédente. Ceci dans le but d'obtenir des trajectoires moins courbées. Sur une « période », le mouvement serait alors plus rectiligne comme peut l'être un déplacement avec but.

Le but ici est de garder une variation continue de l'angle mais, pour s'approcher encore plus du *Task Based Movement*, les variations d'angles auront tendance à être inverses à la variation précédente. Ainsi, le mouvement global suit une direction donnée et varie autour d'elle. De plus, lors d'un déplacement, le mouvement, d'un humain par exemple, varie généralement autour d'une vitesse donnée (vitesse optimale). Celle-ci est différente d'un individu à l'autre et d'un déplacement à l'autre. Pour intégrer ces éléments, les équations (3.5) ont été modifiées comme suit :

$$\begin{aligned}
 v(t + \Delta I) &= v(t) + \Delta v(t + \Delta I) \\
 \theta(t + \Delta I) &= \theta(t) + \Delta \theta(t + \Delta I)
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta v(t + \Delta I) &= \text{sign}[V_{OptPer} - v(t)] \times \Delta v \\
 \Delta \theta(t + \Delta I) &= \text{sign}[\Delta \theta(t)] \times \Delta \theta
 \end{aligned}$$

où $v(t + \Delta I)$ et $\theta(t + \Delta I)$ sont les valeurs de vitesse et d'angle sur l'intervalle $[t, t + \Delta I[$, V_{OptPer} est la vitesse optimale sur la période ΔP et prend, au début de chaque période, une valeur dans une distribution uniforme dans $[V_{min}, V_{max}]$, Δv et $\Delta \theta$ sont les variations de vitesse et d'angle prenant des valeurs aléatoires dans des intervalles uniformément distribués $[-\tau \Delta v_{max}, (1 - \tau) \Delta v_{max}]$ et $[-(1 - \lambda) \Delta \theta_{max}, \lambda \Delta \theta_{max}]$, $\tau \in [0, 0.5]$ et $\lambda \in [0, 0.5]$. La fonction $\text{sign}[\]$ prend la valeur 1 si l'élément est positif ou nul et -1 s'il est négatif.

Nous en déduisons donc que pour $\tau = 0$, la vitesse tendra toujours vers V_{OptPer} et pour $\tau = 0.5$, $v(t + \Delta I)$ peut tendre vers V_{OptPer} ou s'en éloigner de façon équiprobable. Pour $\lambda = 0$, la variation d'angle au début d'un intervalle $\Delta \theta(t + \Delta I)$ sera égale à

l'inverse de la variation de l'intervalle précédent $\Delta\theta(t)$. Pour $\lambda = 0.5$, la variation d'angle est quelconque dans $[-\Delta\theta_{\max}, \Delta\theta_{\max}]$.

Lorsque $\tau = 0.2$ et $\lambda = 0.2$, les variations de vitesse et d'angle prenant des valeurs aléatoires dans les intervalles respectifs, uniformément distribués $[-0.2 \Delta v_{\max}, 0.8 \Delta v_{\max}]$ et $[-0.8 \Delta\theta_{\max}, 0.2 \Delta\theta_{\max}]$. Les figures suivantes illustrent les valeurs que peuvent prendre $\text{sign}[V_{OptPer} - v(t)] \times \Delta v$ et $\text{sign}[\Delta\theta(t)] \times \Delta\theta$ dans ces cas.

Nous pouvons constater sur la figure 58 que la vitesse a plus de chance de tendre vers V_{OptPer} que de s'en éloigner. De plus, lorsque $v(t)$ est plus petite que V_{OptPer} , mais proche (différence $< -0.2 \Delta v_{\max}$), il est possible que la vitesse passe au dessus de V_{OptPer} . La situation inverse est tout aussi vraie.

Nous pouvons constater sur la figure 59 que le signe de la variation d'angle au début d'un intervalle $\Delta\theta(t + \Delta t)$ a plus de chance d'être l'inverse de celui de la variation de l'intervalle précédent ($\Delta\theta(t)$). Les chances d'être du même signe sont donc réduites. Les variables τ et λ permettent une souplesse importante dans le comportement du modèle TDMD.

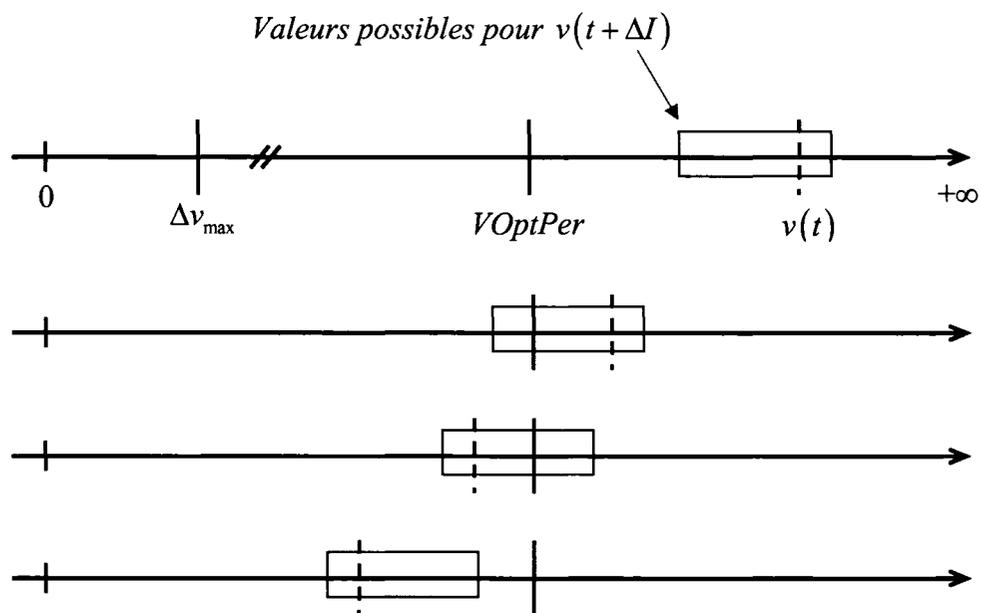


Figure 58 Valeurs possibles de $v(t + \Delta I)$ pour $\tau = 0.2$

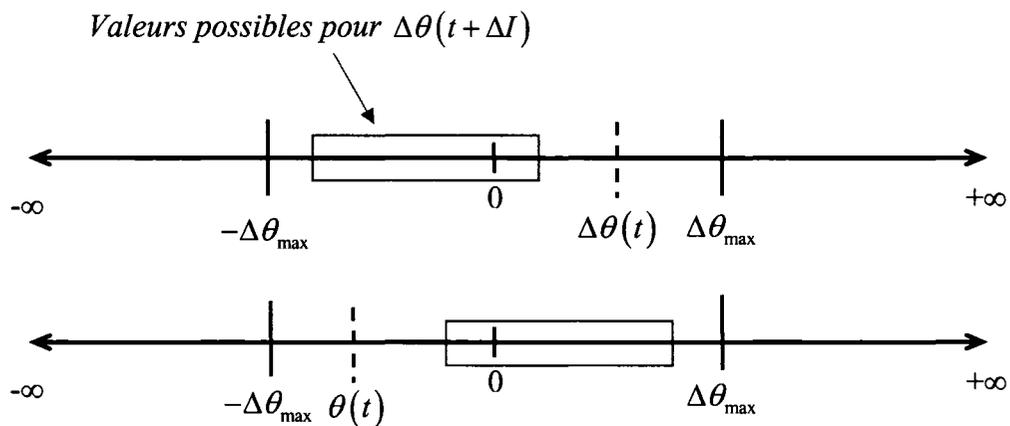


Figure 59 Valeurs possibles de $\Delta\theta(t + \Delta I)$ pour $\lambda = 0.2$

La gestion des bords est identique à celle de TD, expliquée dans la section 4.3.2 (page 81). La distribution initiale (à $t=0$) de la position se fait de la même façon que pour TD, exposée à la page 83. La distribution initiale de la vitesse $v(0)$ est prise selon une distribution uniforme dans $[V_{OptPer1} - \Delta v_{\max}, V_{OptPer1} + \Delta v_{\max}]$, avec $V_{OptPer1}$, la vitesse optimale V_{OptPer} de la première période de mouvement. L'angle $\theta(0)$ est pris selon une distribution uniforme en degré dans $[0, 360[$. À ($t=0$), le nœud commence une période de mouvement.

Les figures ci-après représentent deux traces obtenues avec le modèle TDMD sur 1 heure pour un nœud avec :

$$\begin{array}{llll}
 V_{\max} = 1,7 \text{ m/s} & \Delta t = 10 \text{ s} & IntMin = \{5, 40\} \text{ s} & \\
 V_{\min} = 0,5 \text{ m/s} & X_{\min} = 0 \text{ m} & IntMax = \{15, 60\} \text{ s} & \tau = 0.2 \\
 \Delta v_{\max} = 0,2 \text{ m/s} & X_{\max} = 500 \text{ m} & PerMin = \{300, 180\} \text{ s} & \lambda = 0.2 \\
 \Delta \theta_{\max} = 20^\circ & Y_{\min} = 0 \text{ m} & PerMax = \{400, 300\} \text{ s} & \\
 & Y_{\max} = 500 \text{ m} & \xi = 0.5 &
 \end{array}$$

Les valeurs de positions, de vitesses et d'angles sont récoltées toutes les secondes, ce qui correspond à une précision d'une seconde, $\varepsilon = 1$.

De la figure 51, la figure 56 et la figure 60, nous constatons que le mouvement avec TDMD est plus rectiligne, que dans le cas de TD et de TDPD. Ceci correspond à une approximation plus fidèle du *Task Based Movement*. Le mouvement suit une certaine direction globale sur une période. Le mouvement est assez rectiligne même avec une fréquence de calcul élevée.

Sur la figure 61 sont illustrées les valeurs obtenues pour le module de la vitesse et l'angle de déplacement¹⁷. L'angle est considéré nul lorsque la vitesse est zéro.

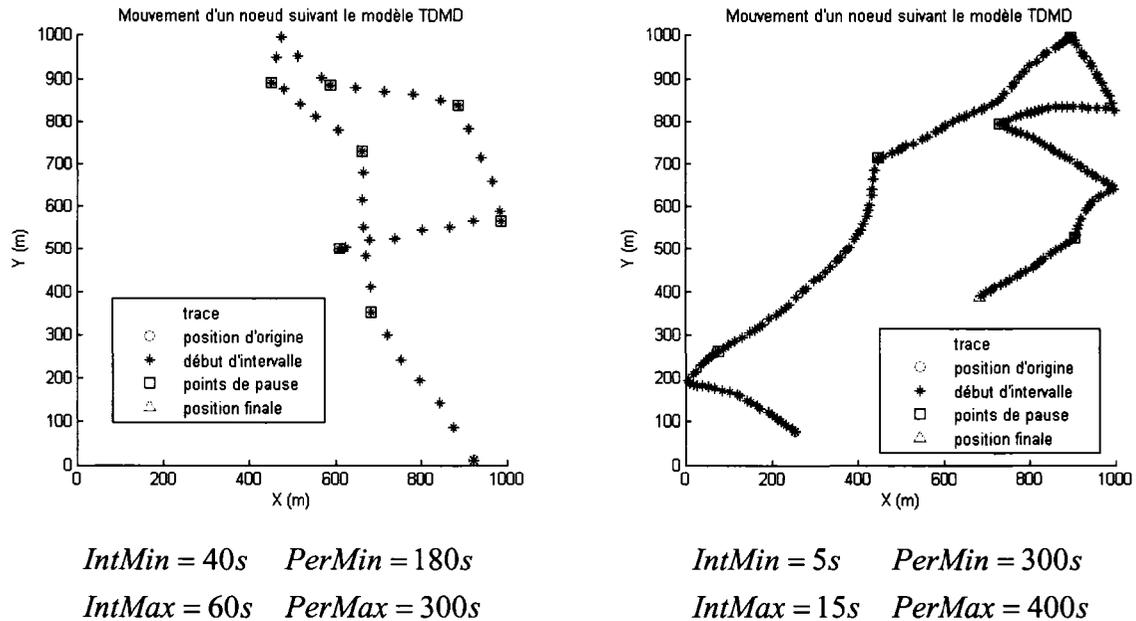


Figure 60 Trace d'une heure de mouvement d'un nœud suivant le modèle TDMD

En comparant la figure 61 et la figure 57, nous pouvons constater que tout en gardant des temps de pause globalement proportionnels au temps de mouvement, les variations de vitesses et d'angles sont globalement moins importantes sur une période que dans le cas de TDPD.

De plus, l'augmentation de la fréquence de calcul et de la durée des périodes, courtes durées d'intervalles et longues durées de périodes, n'affecte pas de façon significative l'allure du mouvement du TDMD. Ce point est très important car il signifie que de longs déplacements (durée d'une période beaucoup plus grande que la durée des intervalles la

¹⁷ l'angle étant pris avec l'axe $x = 0, y > 0$ et dans le sens trigonométrique indirect (sens des aiguilles d'une montre).

constituant) ont les mêmes caractéristiques que les déplacements plus courts. Nous aurions en effet obtenus les mêmes résultats en augmentant le temps de simulation et la durée des périodes et en laissant la durée des intervalles constantes.

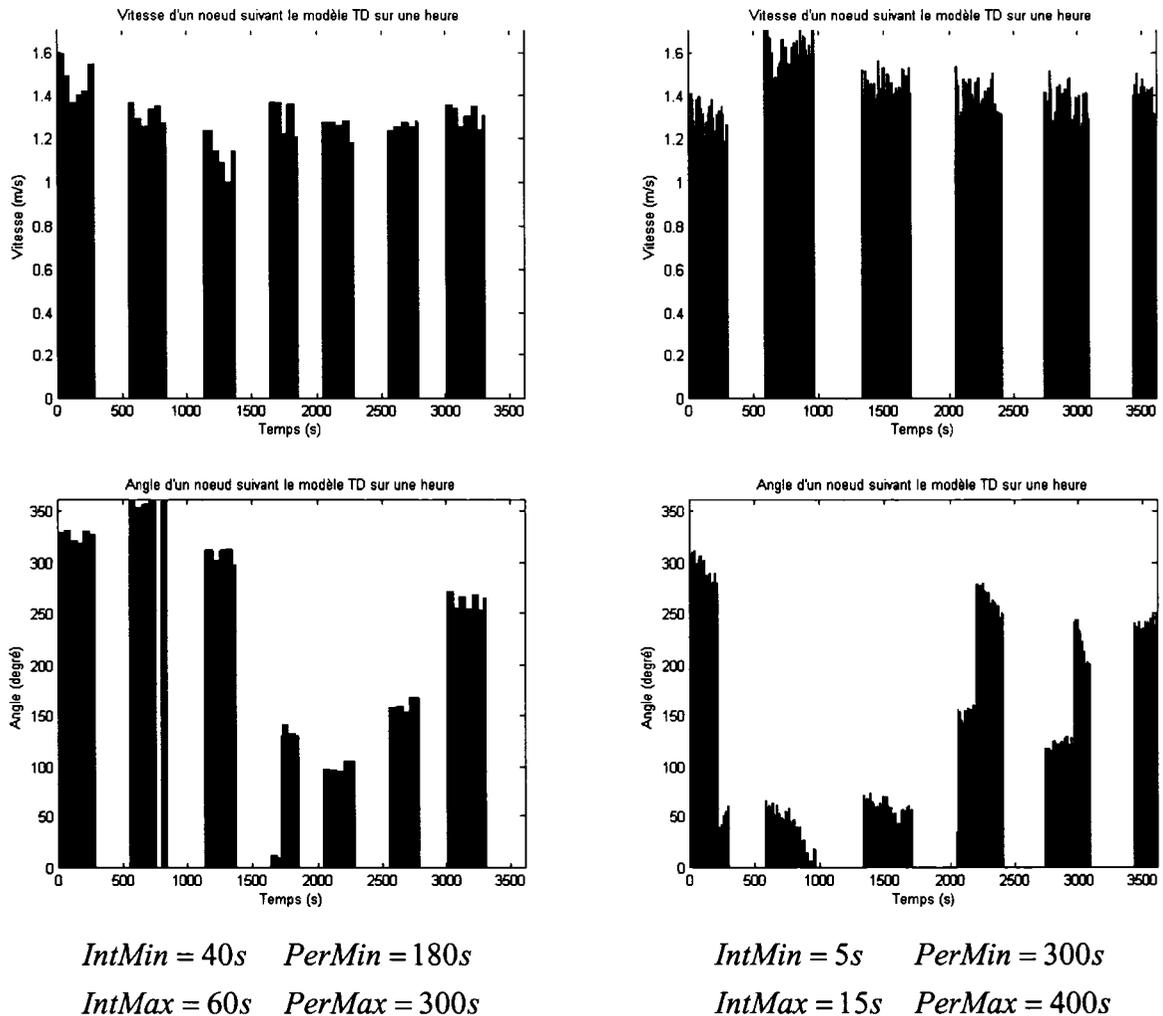


Figure 61 Vitesse et angle de mouvement d'un nœud suivant le modèle TDMD

La figure 62 illustre les distributions de vitesses des modèles TD et TDMD des exemples des pages 84 et 98. Nous pouvons voir que dans le cas de TD, la distribution est plutôt uniforme, les pics pour les vitesses de 1m/s et 1.6m/s sont dûs aux fonctions

min[] et max[]. Dans le cas de TDMD, la distribution varie de façon plus graduelle avec des bords moins rigides.

Notons que le modèle pourrait être amélioré en prenant une distribution non uniforme de V_{Opt} . Les vitesses optimales d'un déplacement varieraient alors autour d'une vitesse optimale fixe pour chaque nœud durant toute la simulation. Les distributions de $[-\tau \Delta v_{max}, (1-\tau) \Delta v_{max}]$ et $[-(1-\lambda) \Delta \theta_{max}, \lambda \Delta \theta_{max}]$ pourraient également ne pas être uniformes et la distribution pourrait varier d'un nœud (individu) à l'autre.

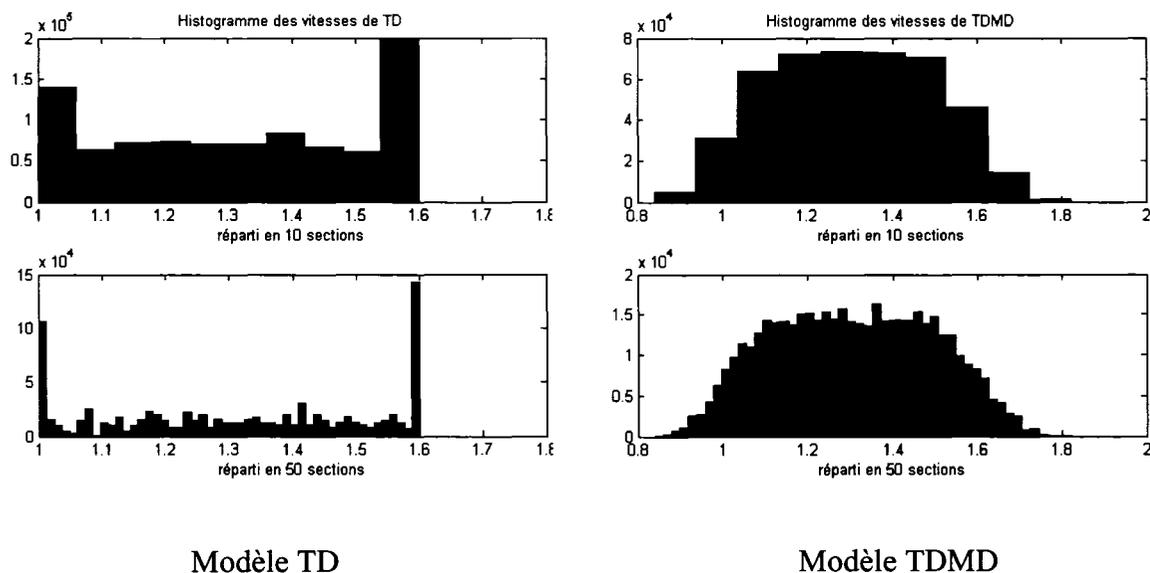


Figure 62 Histogrammes des distributions de vitesse du modèle TD et TDMD

4.4 Comparaison des modèles de mobilité implémentés et développés

4.4.1 Choix des paramètres des modèles

Tous les modèles de mouvement nécessitent qu'un certain nombre, plus ou moins important, de paramètres soient réglés (ex. vitesses minimale et maximale, distribution

des vitesses, longueur des intervalles de calcul, etc.). Le choix de valeurs réalistes pour ces paramètres est très important, car celles-ci influencent grandement les traces et peuvent considérablement modifier le mouvement et les résultats. Nous étudions ici les cas de mouvements humains comme dans une salle de conférence, lors d'un colloque, sur un campus ou sur le site d'une catastrophe.

La vitesse de marche¹⁸ généralement admise pour un humain est entre 1m/s et 1.5m/s (environ 3.5km/h et 5.5km/h), (T. F. Dictionary, 2006). Les champions de course pédestre peuvent atteindre la vitesse de 4.5m/s (environ 16km/h), (T. F. Dictionary, 2006). Knoblauch et al. (Knoblauch et al., 1996) ont fait une étude sur le terrain du temps que prennent des piétons pour traverser une rue. Les participants les plus rapides avaient des vitesses entre 1m/s et 1.7m/s, leur vitesse moyenne était de 1.51m/s et 85% d'entre eux avaient des vitesses supérieures à 1.25m/s. Les participants les plus lents avaient une vitesse moyenne de 1.25m/s et 85% d'entre eux avaient une vitesse supérieure à 0.97m/s. Les individus les plus rapides correspondaient aux personnes les plus jeunes alors que les individus les plus lents, étaient souvent les plus âgés.

À partir de ces éléments, nous avons décidé de fixer les valeurs minimale et maximale de la vitesse respectivement à 1m/s et 1.6m/s. De plus, en nous basant sur certaines données répandues dans les publications ainsi que sur des essais que nous avons effectués, nous avons décidé de considérer dans le reste du document les valeurs des paramètres décrits dans : Tableau IV, Tableau V, Tableau VI et Tableau VII.

Les valeurs pour $(\Delta v_{\min}, \Delta v_{\max})$ et $(\Delta \theta_{\min}, \Delta \theta_{\max})$ ont pour but d'être le plus réaliste possible en accord avec les valeurs de (v_{\min}, v_{\max}) et $(\theta_{\min}, \theta_{\max})$. Des périodes de mouvement de quelques minutes et des intervalles de quelques dizaines de secondes,

¹⁸ Le cas de marche s'applique également dans le cas de réseau ad-hoc sur des sites de catastrophes. En effet, dans la majorité des pays, la réglementation interdit au personnel de secours de courir sur les lieux de catastrophe, ceci pour éviter les blessures.

pendant lesquels le mouvement est constant, nous paraissent refléter la réalité. Des choix logiques ont été retenus pour ξ , τ et λ et restent dans une certaine mesure arbitraires.

Tableau IV

Paramètres du modèle RW

RW	
Vmax	Vmin
1.6	1

Tableau V

Paramètres du modèle TD

TD				
Vmax	Vmin	ΔV_{\max}	$\Delta\theta_{\max}$	Δt
1.6	1	0.2	20	50

Tableau VI

Paramètres du modèle TDPD

TDPD								
Vmax	Vmin	ΔV_{\max}	$\Delta\theta_{\max}$	IntMin	IntMax	PerMin	PerMax	ξ
1.6	1	0.2	20	40	60	180	300	0.5

Tableau VII

Paramètres du modèle TDMD

TDMD										
Vmax	Vmin	ΔV_{\max}	$\Delta\theta_{\max}$	IntMin	IntMax	PerMin	PerMax	ξ	τ	λ
1.6	1	0.2	20	40	60	180	300	0.5	0.2	0.2

4.4.2 Notre outil d'analyse et de comparaison

Le mouvement des nœuds d'un MANET change considérablement la stabilité des liens entre eux. Cette instabilité est la base des effets de la mobilité sur le *scheduling* et les protocoles de routage.

En nous inspirant des travaux de Kwark et al. (Kwak et al., 2003) et de Bai et al. (Bai et al., 2003), nous avons élaboré un outil permettant de caractériser les modèles de mouvement et de permettre leur comparaison. Nous ne prétendons pas que notre outil soit complet ou suffisant, il représente un compromis entre complexité et efficacité et a souffert du temps que nous avons à consacrer à son implémentation. Notre but est de pouvoir caractériser la connectivité d'un réseau avec un nombre restreint de paramètres et de pouvoir ainsi déduire, dans une première approche, l'influence de la mobilité sur ses performances.

Contrairement à certaines méthodes qui utilisent des métriques telles que la vitesse relative des nœuds, les temps de pause etc. (ex. (Johansson et al., 1999)), nous avons préféré nous affranchir des caractéristiques de mobilité pour nous concentrer sur les caractéristiques des liens entre les nœuds. La combinaison de l'effet de la distance sur le débit, décrit sur la figure 11 page 18, et du mouvement des nœuds a pour effet une variation graduelle de la connectivité entre les valeurs maximale et nulle. Ces différents cas peuvent être associés à une certaine QoS, plus ou moins compatible avec un service donné. De plus, la compatibilité d'un protocole ou d'une application avec le débit offert varie elle aussi de façon graduelle passant progressivement d'un cas sans problème à une incompatibilité totale. Partant de ces considérations, nous avons divisé la région entourant un nœud en différentes zones concentriques, comme illustré sur la figure 63. Chaque zone est associée à un type de connexion et est délimitée par une distance minimale et une distance maximale à l'image du débit (figure 11). Ces distances sont à déterminer suivant les caractéristiques de la couche physique et des besoins et

spécificités des protocoles à étudier. Il est à noter que rien n'empêche que des zones s'entrecoupent.

Pour limiter le temps de calcul et les ressources nécessaires, nous avons séparé les métriques en deux types, représentés sur la figure 64 :

- métrique décrivant
 - individuellement les liens.
 - globalement sur le temps de simulation.
- métrique décrivant
 - globalement les liens.
 - pour chaque instant de simulation.

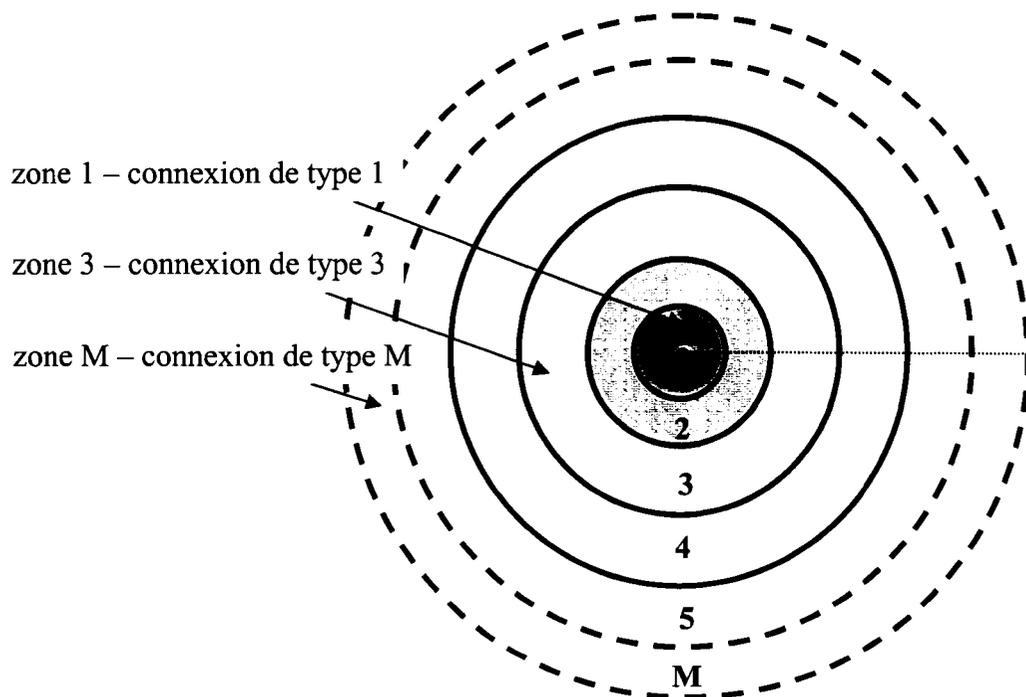


Figure 63 Division en zones de l'espace entourant un nœud

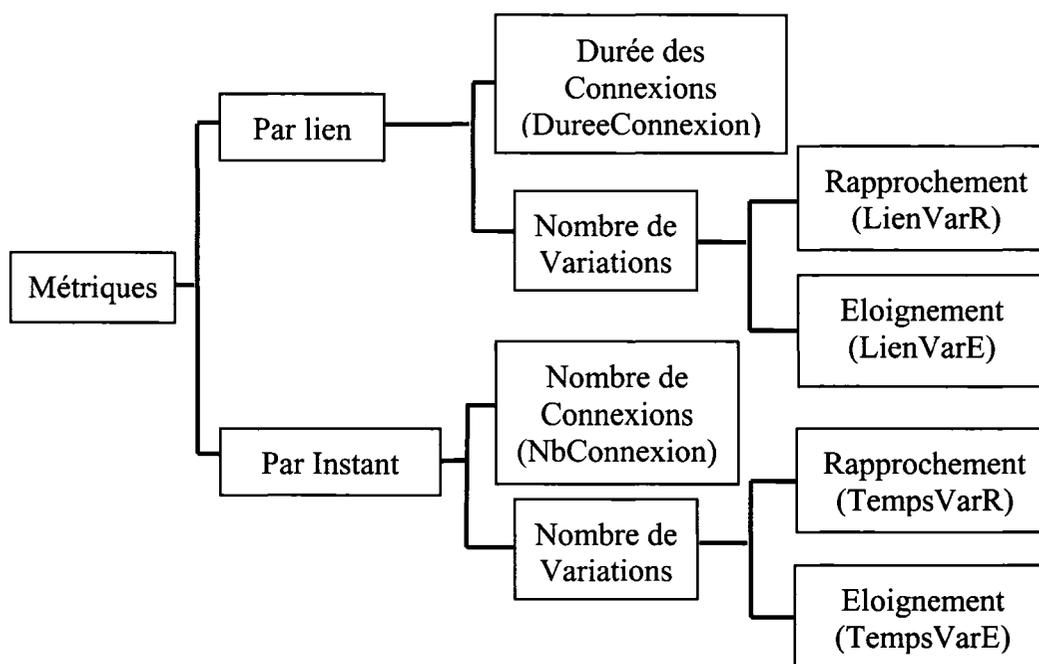


Figure 64 Schéma du modèle d'analyse et de comparaison

Les points suivant décrivent le fonctionnement des différentes variables de la figure 64 pour N nœuds, M zones et une durée de simulation répartie en T intervalles :

- **DureeConnexion** : représente la durée pendant laquelle un lien a appartenu à un certain type de connexion : tableau de taille $N(N-1)/2 \times M$.
- **LienVarR** : représente le nombre de fois qu'un lien est passé d'un type de connexion à un autre, vers une meilleure connectivité, ex. lorsqu'un nœud se rapproche d'un autre nœud et passe de la zone 2 à la zone 3 de ce dernier, sa connexion passe du type 2 au type 3 : tableau de taille $N(N-1)/2 \times (M-1)$.
- **LienVarE** : représente le nombre de fois qu'un lien est passé d'un type de connexion à un autre, vers une moins bonne connectivité, ex. lorsqu'un nœud s'éloigne d'un autre nœud et passe de la zone 3 à la zone 2 de ce dernier, sa connexion passe du type 3 au type 2 : tableau de taille $N(N-1)/2 \times (M-1)$.

- **NbConnexion** : représente, à chaque moment de la simulation, le nombre de liens pour chaque type de connexion : tableau de taille $T \times M$.
- **TempsVarR** : représente, sur un intervalle de temps élémentaire, le nombre de liens passés d'un type de connexion à un autre, vers une meilleure connectivité : tableau de taille $T \times (M - 1)$.
- **TempsVarE** : représente, sur un intervalle de temps élémentaire, le nombre de liens passés d'un type de connexion à un autre, vers une moins bonne connectivité : tableau de taille $T \times (M - 1)$.

Nous avons élaboré cet outil avant tout comme moyen de comparaison des modèles de mobilité que nous avons développé. Nous l'utiliserons ultérieurement, dans la section (4.4.1) de ce document, et présenterons ci-après un exemple de fonctionnement.

La figure 65 illustre un exemple dans lequel deux nœuds (nœuds 1 et 2) sont en mouvement (de la gauche vers la droite), à une vitesse de 1.6m/s. Le nœud 3 est quand à lui fixe. Quatre distances (75m, 100m, 150m, 200m) sont définies et délimitent cinq zones, chacune associée à un type de connexion allant du Type 1 au Type 5.

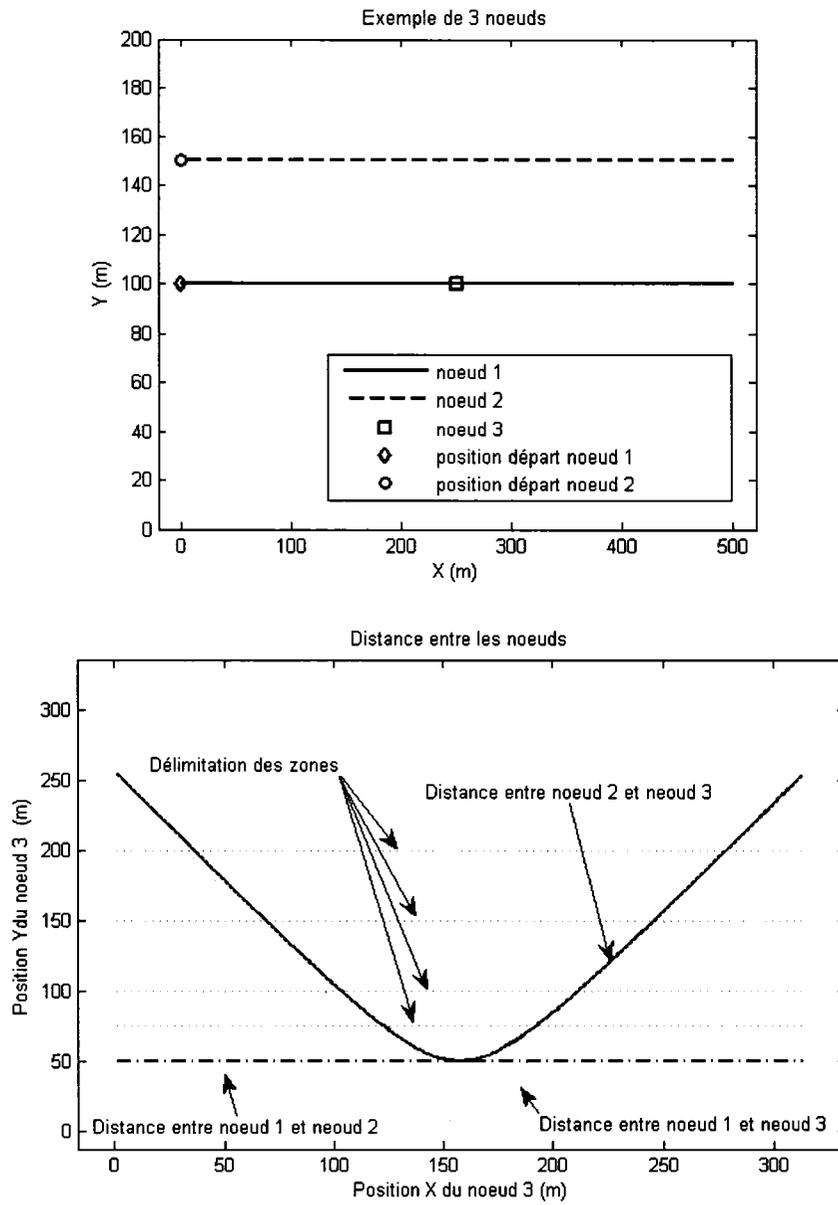


Figure 65 Exemple avec trois noeuds

En recoupant les différentes informations, nous pouvons juger de la qualité de chaque lien pour l'ensemble de la simulation ainsi que de la connectivité du réseau à tout instant. Les **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** illustrent les résultats obtenus avec l'outil d'analyse.

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** est composée de trois illustrations : Celle du haut représente le nombre de connexions (nombre de liens) de chaque type au cours du temps. On constate que lorsque les nœuds 1 et 2 se rapprochent du nœud 3, les liens passent du type 1 (le plus éloigné) au type 5 (le plus proche). L'inverse se produit lorsqu'ils partent dans l'autre sens (à partir de $t \approx 150s$). Les deux illustrations du bas représentent, à chaque instant, le nombre de liens qui passent d'un type de connexion à un autre type supérieur ou inférieur.

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** est composée de trois illustrations, dans lesquelles :

- Le lien #1 est celui entre les nœuds 1 et 3.
- Le lien #2 est celui entre les nœuds 2 et 3.
- Le lien #3 est celui entre les nœuds 1 et 2.

L'illustration du haut représente, pour chaque lien (connexion entre deux nœuds), la durée pendant laquelle il a été d'un certain type. Les deux illustrations du bas représentent, pour chaque lien, le nombre de changement d'un type de connexion à un autre type supérieur ou inférieur.

4.4.3 Comparaison des modèles de mobilité

Il n'est pas question ici d'effectuer une étude approfondie des différents modèles et de leur influence sur la connectivité du réseau. Nous souhaitons cependant apporter quelques éléments d'analyse en utilisant l'outil que nous avons décrit dans la section 4.4.2. Pour compléter les éléments de comparaison des sections précédentes, des simulations d'une durée de cinq heures ont donc été effectuées pour 50 nœuds, sur une surface de simulation de 500m de côté. Les valeurs de positions, de vitesses et d'angles ont été récoltées toutes les secondes. Les paramètres du Tableau IV au Tableau VII ont été utilisés et les initialisations suivent les explications des pages 83, 91 et 98. Bien que l'analyse que nous effectuerons s'appuie sur cet exemple de simulation, les résultats que nous dégagons reflètent les observations que nous avons pu faire sur un nombre plus important de tests.

La figure 66 et la figure 67, sont prises dans le cas où les différentes zones sont délimitées par les distances 75m, 100m, 150m et 200m. Les nœuds séparés par une distance plus grande que 200m (connexion de type 1) sont donc considérés non connectés. Nous pouvons constater, durant la simulation, de grandes variations du nombre des différents types de connexion. Sur la figure 66, nous pouvons voir que le nombre de connexions moyen suivant le type varie peu suivant le modèle, la connexion moyenne globale est assez proche. Ceci est dû aux valeurs élevées que nous avons prises pour les distances délimitant les types de connexions. De plus, sur la figure 67, nous pouvons voir que, pour tous les modèles de mouvement, les variations sont moins importantes dans le cas de transition du type 5 vers le type 4 (Type 5 → Type 4) que dans les autres cas.

De plus, nous pouvons observer que le modèle TD présente de plus grandes variations dans le nombre de connexions au cours du temps que les autres modèles. Ceci est principalement dû à l'absence de temps de pause qui sont sources de stabilité.

Nous pouvons également constater que les modèles TDPD et TDMD se comportent globalement de façon très semblable. Bien que le nombre de connexions au cours du temps de ces deux modèles soit similaire à celui du RW, nous pouvons constater sur la figure 67 que les variations dans le cas de RW sont plus importantes. Les liens dans les cas de TDPD et TDMD sont donc plus stables que dans le cas de RW.

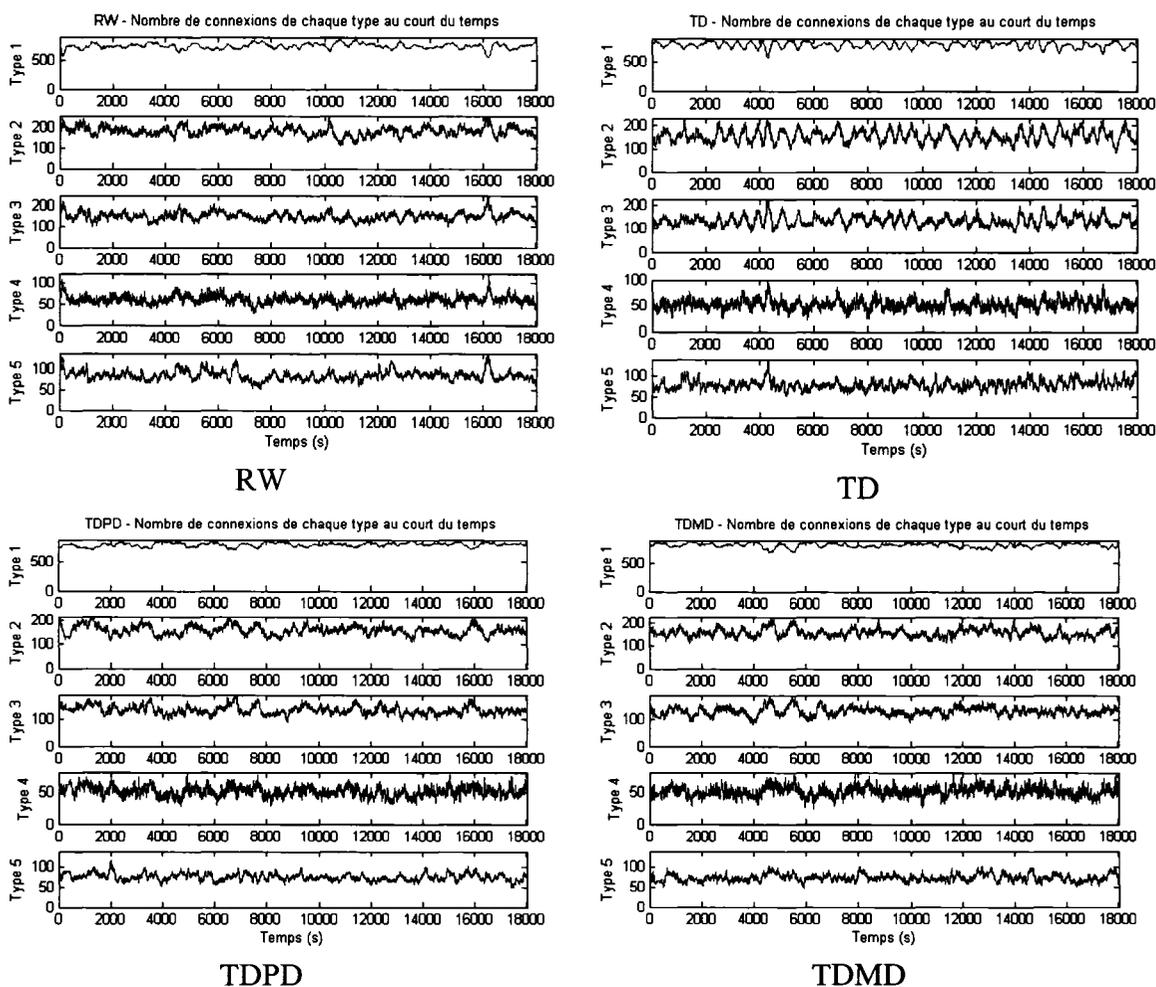


Figure 66 Nombre de connexion de chaque type au cours du temps

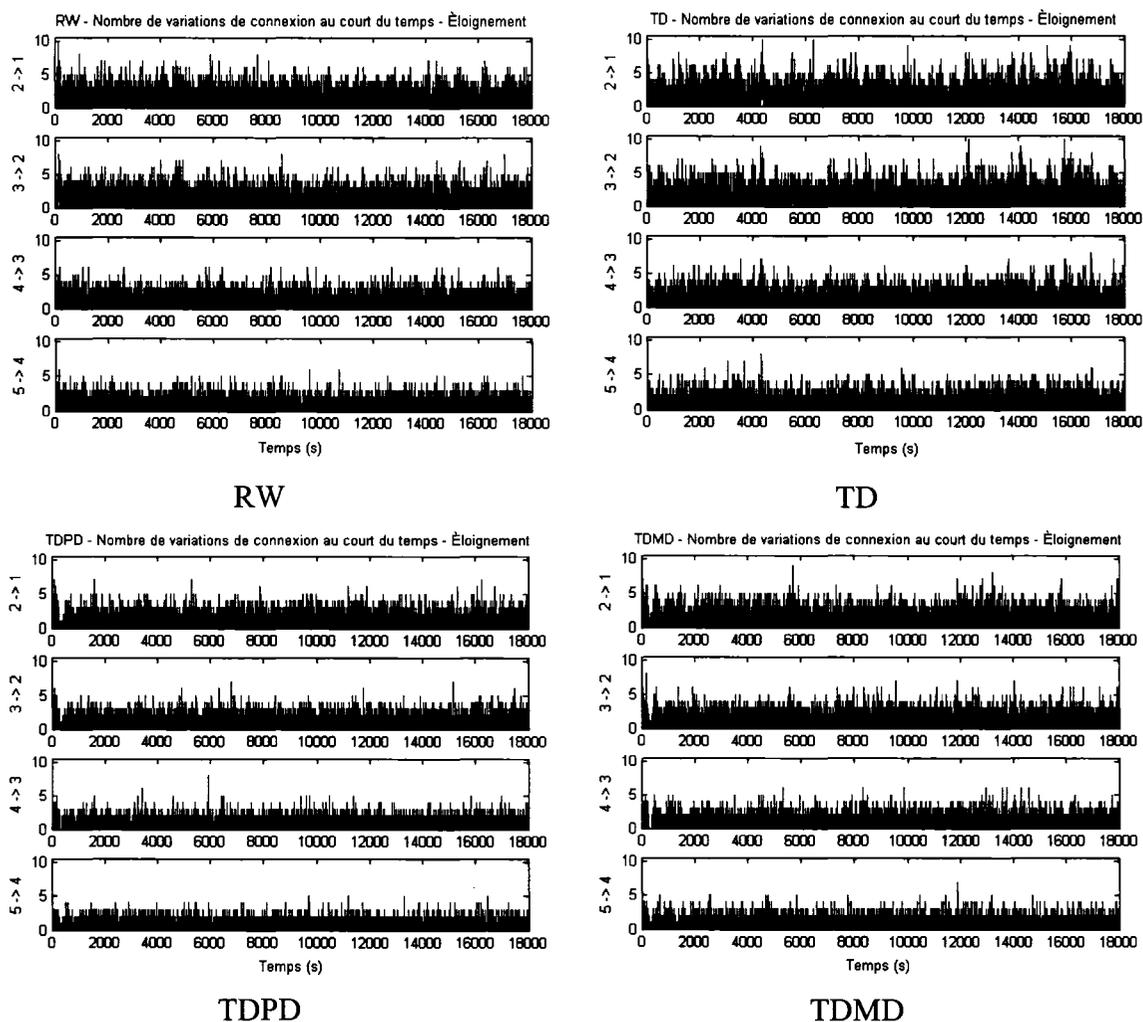


Figure 67 Nombre de variations de connexions au cours du temps – Éloignement

Nous avons effectué une deuxième analyse sur la dernière heure de simulation. Pour faciliter l'exposition des résultats obtenus, les différentes zones sont cette fois-ci délimitées par des distances beaucoup plus petites : 10m, 20m, 40m et 80m. Les nœuds séparés par une distance plus grande que 80m (connexion de type 1) sont donc considérés non connectés. En prenant des zones de tailles plus petites, nous limitons le nombre de connexions ainsi que le nombre de transitions entre zones. Les différences entre les amplitudes minimales et maximales de nos courbes sont alors plus petites, ce qui les rend plus lisibles.

En comparant la figure 68 et la figure 66, nous pouvons voir que les observations que nous avons effectuées sur la figure 66 sont toujours valables. On observe de grandes variations du nombre de connexions dans le cas TD. Dans le cas RW, les variations sont moins importantes. Enfin, Les courbes des cas TDPD et TDMD sont très semblables avec des variations beaucoup moins importantes que dans les deux premiers cas.

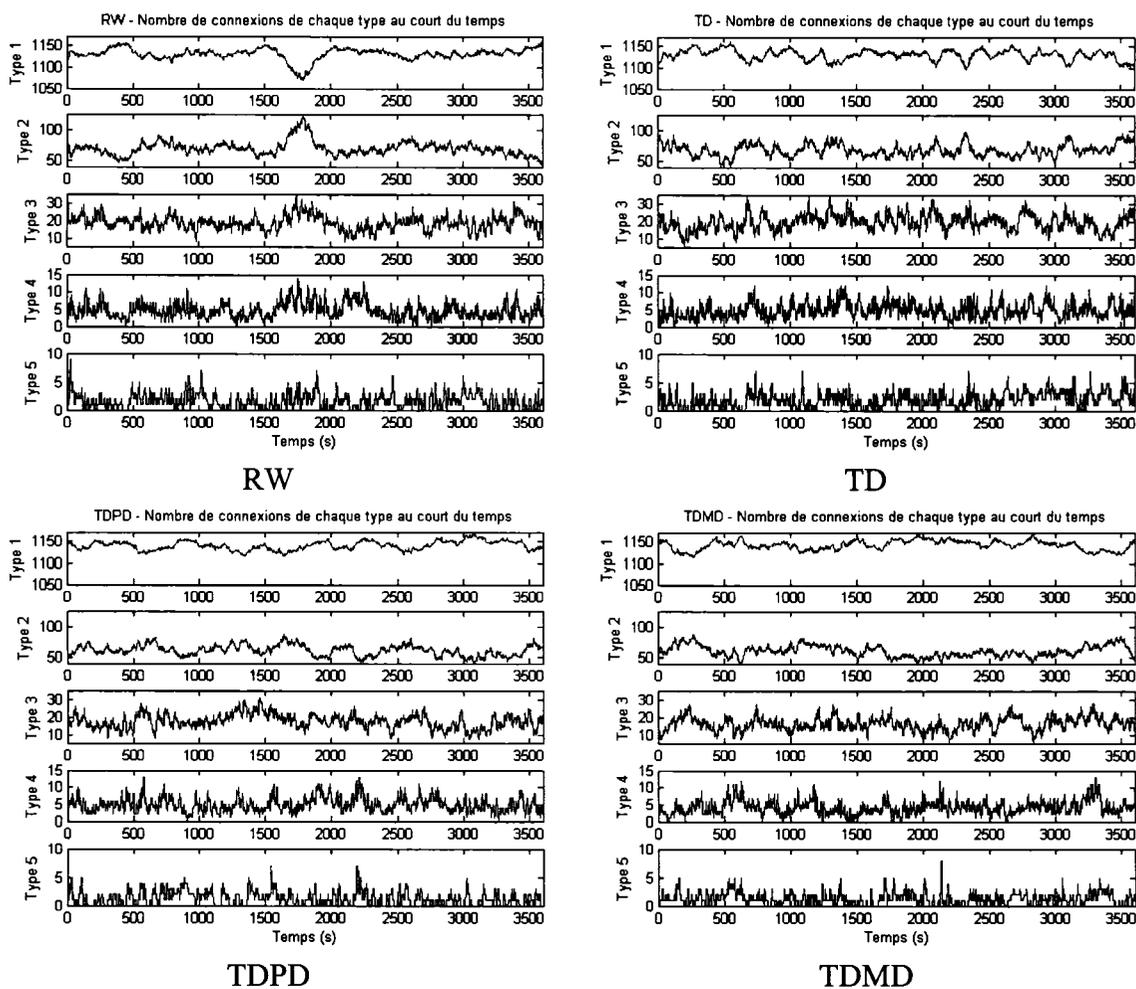


Figure 68 Nombre de connexions de chaque type au cours du temps

(connexion type 1), puis par ordre croissant de la durée de connexion des types 2 à 5 (2 puis 3 puis 4 et enfin 5).

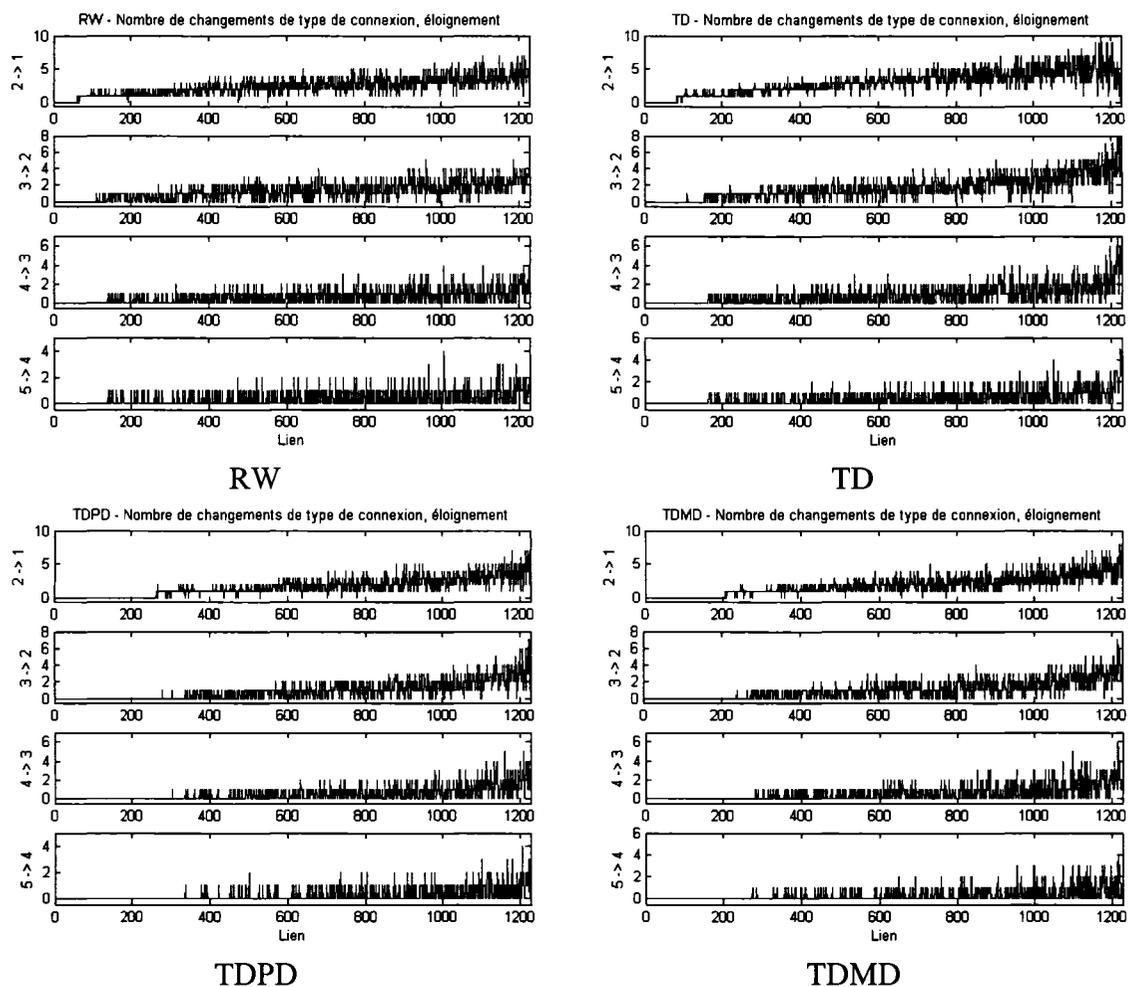


Figure 70 Nombre de changements des types de connexion en fonction des liens – Éloignement

Nous pouvons observer sur la figure 69 que dans le cas de TD, la connectivité des liens n'est pas uniforme et varie de façon très importante suivant les liens considérés. Certains liens ont des durées de connexion, de tous types, largement plus élevées que celles des autres liens. De plus, nous pouvons remarquer que les mêmes liens ont des durées de connexion élevées pour tous les types de connexions. Du fait de l'absence de temps de

pause et de variations importantes du mouvement¹⁹, les nœuds qui ont des directions de mouvement assez semblables ont de fortes chances de rester proches et de s'éloigner de façon très graduelle. Les liens entre ces nœuds auront donc plusieurs types de connexions de longues durées, du fait de l'éloignement graduel.

Sur la figure 69, nous pouvons observer que les modèle RW et TD se différencient des modèles TDPD et TDMD par l'étalement des connexions. Dans le cas des premiers, presque tous les nœuds sont connectés, à un moment ou à un autre de la simulation, alors que pour les seconds, un nombre plus important de nœuds ne sont jamais connectés. Ceci signifie que sur la figure 68, les mêmes liens, à travers des mécanismes de connexion-déconnexion répétés, sont comptés plusieurs fois dans le cas de TDPD et TDMD. TD étant dépourvu de temps de pause, les nœuds ont plus de chance de se croiser. Pour RW, du fait du choix de points destinations dans la zone de simulation, la dispersion des nœuds est moins importante. Si les nœuds passent plus de temps dans la zone centrale, même dans le cas de simples passages, il y a plus de chance pour deux nœuds de se croiser. La figure 71 et l'explication qui lui précède vont dans le sens de cet argument.

Sur la figure 69, nous pouvons voir que les liens sont plus stables dans le cas de TDPD et TDMD que dans le cas de RW et TD. Ceci s'explique par l'absence de pause dans le cas de TD et par des mouvements rectilignes dans le cas de RW.

Sur la figure 71 sont illustrés les mouvements de deux nœuds pour le deuxième cas d'étude (une heure de simulation). En comparant les traces des quatre modèles de mobilité, nous pouvons constater que le déplacement dans le cas de RW est plus concentré au centre de la zone de simulation que pour les autres modèles. Le mouvement des nœuds dans le cas du modèle TD a couvert quand à lui la totalité de la surface de

¹⁹ hormis proche des bords

simulation. Les modèles TDPD et TDMD couvrent de larges parties de la zone de simulation, mais avec une plus faible densité que dans le cas de TD

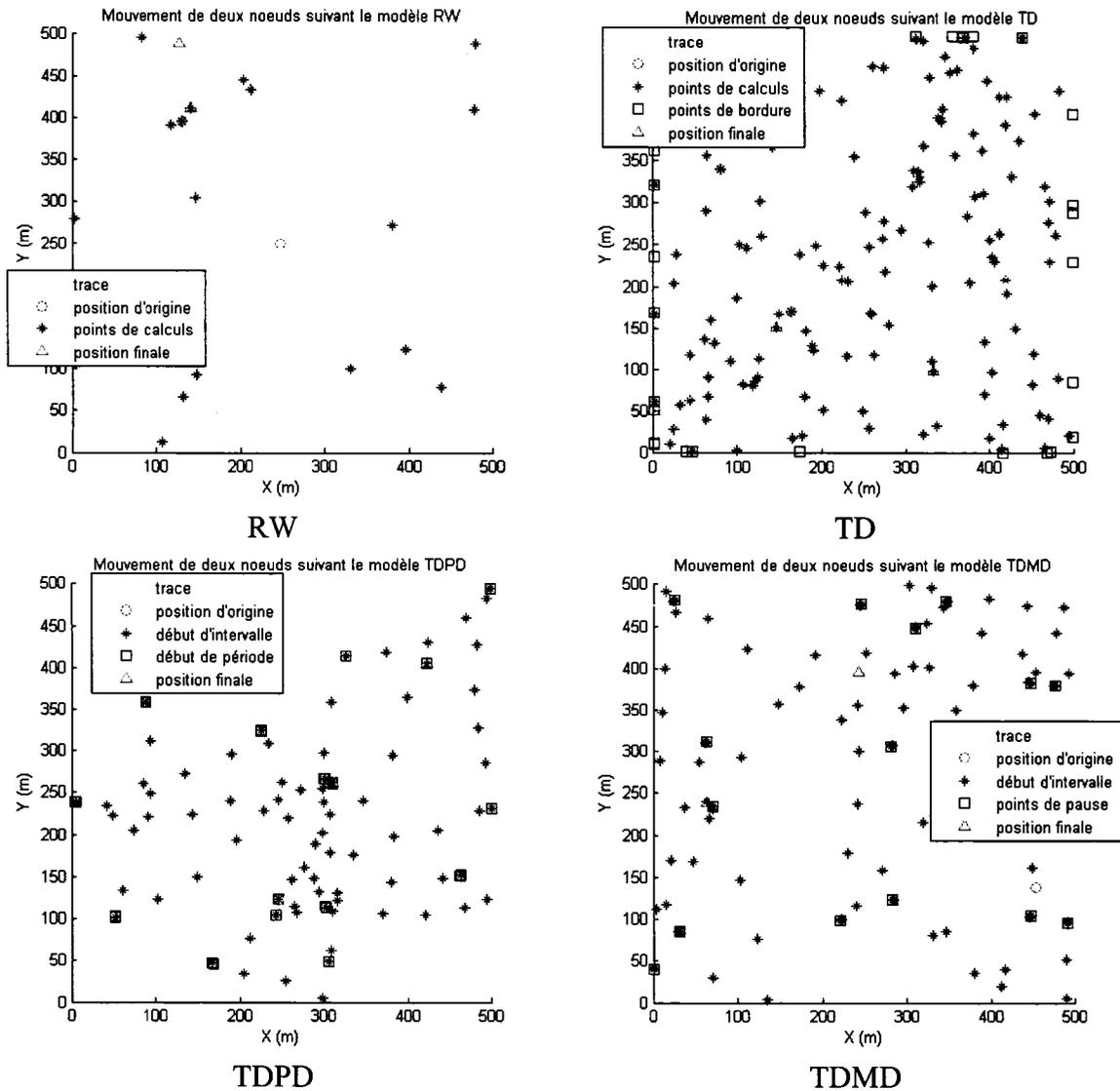


Figure 71 Trace d'une heure de mouvement de deux nœuds suivant les modèles : RW, TD, TDPD et TDMD

4.5 Synthèse et conclusion

La diversité des cas d'application des MANETs, l'hétérogénéité des nœuds les constituant et la variété des milieux d'utilisation, est une source de problèmes très particuliers en comparaison avec les réseaux ad-hoc plus « classiques ». La part très importante que représente la simulation dans l'étude et l'analyse des MANETs a poussé de nombreuses équipes de recherche à s'intéresser à la caractérisation de la mobilité. Le mouvement peut, en effet, avoir des répercussions considérables sur les performances d'un MANET.

La communication des MANETs se faisant par propagation radio, la variation de la distance entre les nœuds, à travers le mouvement, influence de façon significative la qualité des liens. Pour effectuer une analyse de la variation de la qualité des liens dans de bonnes conditions, il est donc nécessaire d'utiliser des modèles de mouvements réalistes.

La majorité des modèles de mobilité sont soit trop simplistes, soit très spécifiques, nécessitant la détermination de scénarios très précis. Nous avons donc proposé deux modèles de mobilité basés sur une version modifiée du *Boundless Simulations Area Mobility Model*. Ce dernier présente l'intérêt d'intégrer une dépendance temporelle facile à paramétrer et sans a priori important sur le mouvement (contrairement au modèle *Gauss-Markov mobility model*). Les modèles de mouvement que nous avons développés ont pour but d'intégrer de facto des éléments de *Task Based Movement* et d'améliorer le réalisme tout en préservant la simplicité d'implémentation et d'utilisation du *Boundless Simulations Area Mobility Model*.

À travers un outil d'analyse de la connectivité que nous avons élaboré, nous avons mis en évidence les principales différences entre les modèles que nous proposons et le *Random Waypoint Mobility Model*.

CHAPITRE 5

LA PRÉDICTION DE LA QUALITÉ DE LIEN

À partir des études que nous avons effectuées dans les deux derniers chapitres, nous abordons ici les questions d'estimation et de prédiction de qualité de liens. Nous effectuerons une étude des modèles et des approches existants puis nous expliquerons l'intérêt de notre approche en détaillant le fonctionnement de notre outil. Nous utiliserons les propriétés retenues pour le canal de propagation et le mouvement lors de l'élaboration et le test de nos modèles d'estimation et de prédiction.

5.1 Introduction

Les MANETs sont des réseaux sans fils multi-sauts à architectures organisationnelles et configurationnelles autosuffisantes capables de s'auto-reconfigurer au fur et à mesure que la mobilité des nœuds affecte la connectivité du réseau. Le réseau est typiquement formé d'éléments identiques avec des capacités réseautiques sans fils (type routeur sans fil), ce qui rend possible l'acheminement du trafic à travers des sauts multiples. Le trafic entre un émetteur et un récepteur passe par un chemin donné, formé d'une série précise de nœuds. Les chemins sont choisis par les protocoles de routage de manière proactive ou réactive comme exposé dans la section 1.3.3.2.

Vu que tous les nœuds peuvent bouger et qu'ils peuvent être arbitrairement interconnectés, la topologie du réseau est dynamique et aléatoire. L'approche classique pour le routage est de réagir aux changements après qu'ils aient lieu, entraînant des perturbations momentanées et des pertes de paquets. Si ces changements topologiques pouvaient être prédits avec une précision acceptable, la reconstruction des chemins pourrait s'effectuer avant que des perturbations ne surviennent. Un certain nombre de protocoles de routage incluent donc la prédiction de la connectivité dans le

choix et la maintenance des chemins (Lee et al., 1999; Su, 2000; Su et al., 2001; Weiss et al., 2003; Rong et al., 2005).

Cette vue « grande échelle » n'est pas le seul effet qui doit être considéré. En effet, les variations de la connectivité entre deux nœuds sont formées de composantes lentes et rapides qui affectent différents protocoles et couches. Pour résumer les explications du chapitre 3, les variations lentes résultent de l'atténuation du signal radioélectrique due à la variation de la distance engendrée par le mouvement relatif des nœuds. Les variations rapides quant à elles sont dues aux interférences provenant de l'effet d'ombrage (*shadowing*), des multitrajets (*multipaths*) et de l'effet doppler. Les variations lentes de connectivité affectent principalement les protocoles de routage, et devraient donc être prises en compte, sous forme de métriques, lors du choix des chemins. À l'inverse, l'intégration d'informations sur les variations rapides devrait améliorer le *scheduling* et les performances de la couche MAC.

L'intérêt de la prédiction de la connectivité dans le cas du routage et du *scheduling* ne doit pas masquer les applications potentielles dans la construction et la maintenance de *clusters* et de dorsales (*backbone*) ainsi que l'utilisation de telles informations pour la QoS.

La prédiction de la connectivité inclut un grand nombre d'approches et de notions différentes qui débouchent toutes sur des informations de même type. Le degré de connectivité (allant d'une parfaite connectivité à une déconnexion complète) est équivalent à la qualité de la connexion. De même et d'après ce que nous avons mentionné dans le paragraphe précédent, les variations grandes échelles de la qualité de la connexion dépendent du mouvement. La prédiction du mouvement permet donc de prédire la qualité de lien. Déterminer la durée d'une connexion correspond à déterminer le moment où le lien casse, donc du moment où la qualité du lien passe sous un certain seuil (le seuil de connectivité). Enfin, la gestion des ressources dans les systèmes sans fil

mobiles est un élément crucial, l'adaptation de la puissance d'émission à l'atténuation observée sur le canal radio (due à la distance et au *shadowing*) permet non seulement une économie d'énergie, mais également de limiter les interférences et les collisions.

Bien que ces notions soient similaires, les outils et surtout les informations utilisées pour leurs prédictions peuvent être, et sont dans la plupart des publications, très différents. Nous aborderons ces éléments dans la section 5.2, dans laquelle nous exposerons les différentes approches existantes, leurs similitudes et leurs différences. Dans cette section, nous effectuerons un état de l'art et y exposerons les approches et modèles décrits dans la littérature.

Dans la section 5.3, nous effectuerons une description de notre approche. Nous présenterons succinctement les *Time Series*, puis développerons notre modèle de prédiction (*Time Series Link Quality Prediction*, TSLQP) et exposerons les tests que nous avons réalisés. Nous effectuerons par la suite une synthèse et une conclusion.

5.2 État de l'art

Lorsque déployés, les réseaux sans fil ad-hoc devront assurer les mêmes services, navigation web, applications multimédia, service de voix et de vidéoconférence, etc., tout en fournissant une qualité équivalente aux réseaux sans fil centralisés. Cependant, la nature même des réseaux ad-hoc, comme nous l'avons déjà évoquée, rend la garantie de telle QoS particulièrement critique. Pour parvenir à assurer un service continu de haute qualité, il est essentiel que les protocoles existants puissent réagir de façon efficace aux changements brutaux de connectivité et, dans une certaine mesure, de prévoir ces changements. La prédiction de la localisation et de la qualité de lien est alors au centre de telles préoccupations. C'est de ce constat, et pour apporter des éléments de solution, qu'a été produit un nombre important de publications.

Nous commencerons par décrire une classification des approches existantes, nous effectuerons ensuite un survol des modèles proposés dans la littérature et terminerons par une synthèse de ces modèles dans laquelle nous aborderons leurs limitations.

5.2.1 Classification des modèles de prédiction

Nous pouvons séparer l'effort de recherche dans le domaine de la prédiction du mouvement et de la qualité de lien en deux parties très distinctes de part le contexte qu'elles traitent. Un premier type de problématique se pose dans un contexte de communication radio dans une structure centralisée de type cellulaire, que ce soit dans le cadre des réseaux de téléphonie mobile, de WLAN, de WMAN ou de *cluster* MANET. Le second type de problématique se pose dans le cas des réseaux MANETs décentralisés.

Les modèles de prédiction du mouvement ou de qualité de lien peuvent être classifiés comme suit, illustré sur figure 72 :

Pour la téléphonie cellulaire, la prédiction concerne la localisation du mobile dans une des cellules (il faut donc déterminer vers quelle cellule se déplace le mobile). À partir de cette information, la réservation des ressources nécessaires au *hand-over* (passage d'une cellule à l'autre) se fera exclusivement pour la prochaine cellule visitée et uniquement lorsque ce changement surviendra. L'approche plus conventionnelle consiste pour le mobile à surveiller les niveaux de réception des points d'accès joignables. Le mobile change de point de connexion lorsque le signal provenant d'un autre point d'accès est meilleur pendant un temps suffisamment long (ce qui évite les changements fréquents lorsque le mobile se trouve à l'intersection de plusieurs cellules). De nombreuses publications mettent en avant l'intérêt de la prédiction du mouvement pour l'amélioration de la réservation des ressources et de la gestion du *hand-over* et proposent des modèles d'estimation et de prédiction adéquats (Bharghavan et al., 1997; Liu et al.,

1998; Riera et al., 1998; Chan et al., 1999; Jianxin et al., 2001; Pathirana et al., 2003; Shum et al., 2003; Soh et al., 2003; Capka et al., 2004; Pathirana et al., 2004; Samaan et al., 2005). D'autres publications se concentrent sur les cas d'utilisation de *clusters* (Chellapa et al., 2003; Bricard-Vieu et al., 2005).

Un deuxième critère de classification correspond au type d'informations utilisées pour la prédiction. Bien que ces informations soient le plus souvent la position et les données sur le mouvement (vitesse, direction), certains modèles utilisent des données historiques des connexions. De plus, ces informations peuvent être plus ou moins complètes et précises. Il est à noter que lorsque le mouvement est considéré pour la prédiction, il est supposé inchangé (en vitesse et direction) sur l'intervalle de prédiction, il est en effet impossible de prédire les changements brusques avant qu'ils n'interviennent, nous ne pouvons pas prédire le caractère aléatoire de ces changements.

Un troisième critère de classification correspond au mécanisme d'obtention des informations. Les données de position par exemple peuvent être obtenues soit à partir de données GPS ou par tout autre mécanisme indépendant, soit à l'aide de calcul à partir de données telles que la puissance de réception. De plus, dans le cas où seul le canal de communication est utilisé, un trafic de contrôle supplémentaire pour la prédiction peut être nécessaire. Dans ce cas, une architecture *cross-layer*, même rustique, est nécessaire pour la communication des informations entre les différentes couches.

Les modèles de prédiction se distinguent également à travers les hypothèses et a priori qu'ils considèrent pour la propagation et/ou le mouvement.

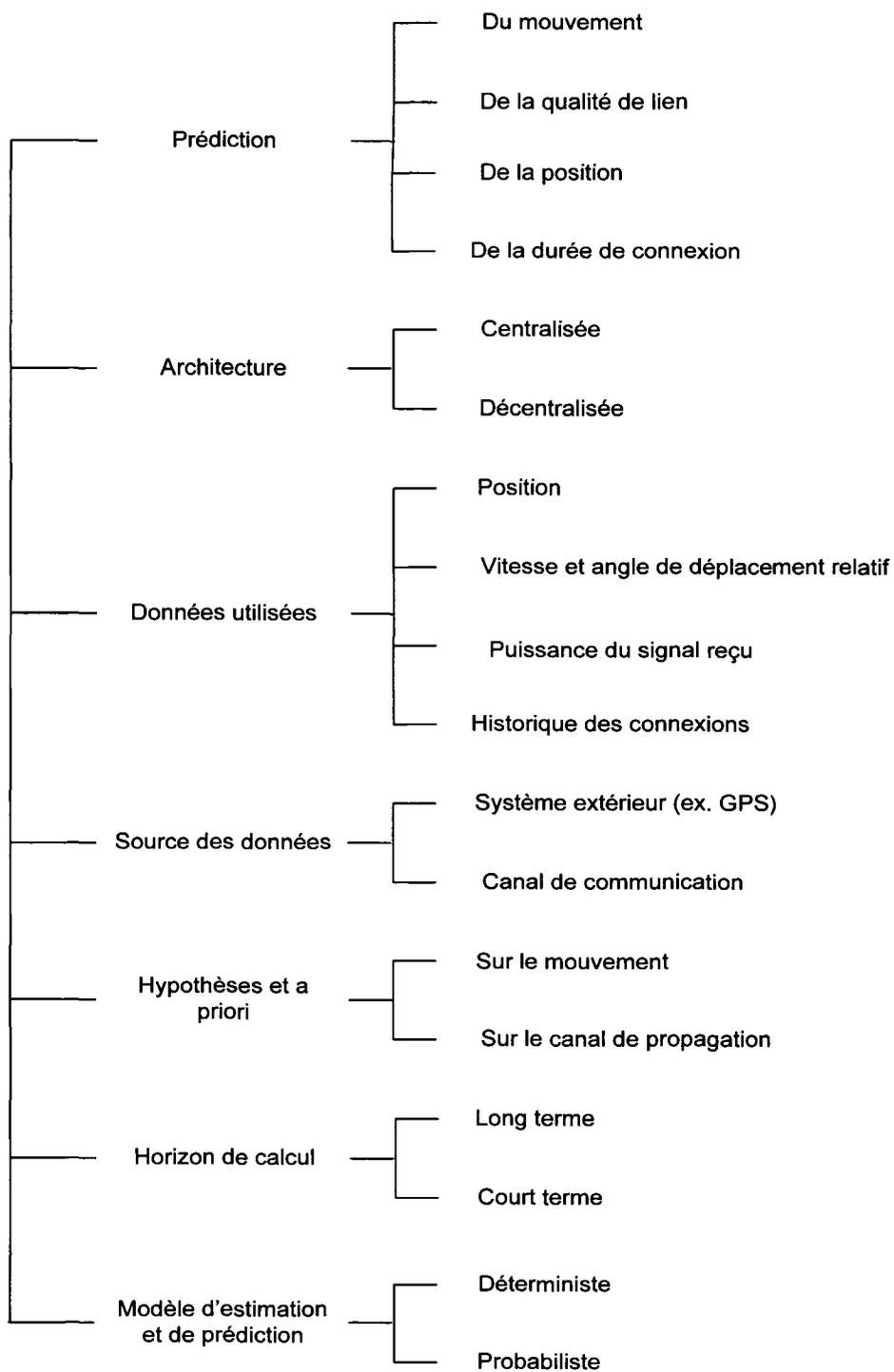


Figure 72 Classification des modèles de prédiction

5.2.2 Survol des modèles de prédiction existants

Nous nous concentrons dans notre étude aux modèles de prédiction appliqués aux MANETs et sans utilisation de *clusters*. Cette section présente les principales méthodes de prédiction proposées dans la littérature. L'ordre chronologique des propositions a été, dans une large mesure, préservé.

Le *Associativity Based Routing* (ABR), (Toh, 1997), fut la première méthode permettant d'inclure la mobilité des nœuds dans le processus de sélection de chemin au niveau du routage. Deux nœuds sont considérés associés lorsqu'ils restent à portée radio plus longtemps qu'une durée prédéfinie. Cette durée (*threshold*) reflète l'alternation de périodes où la distance séparant les nœuds est stable, à travers des pauses ou de faibles mouvements relatifs (ex. même direction), et des périodes de grandes variations qui reflètent les cas de mouvements relatifs importants.

Su et al. (1999) ont présenté un mécanisme de prédiction de la durée de lien, *Link Expiration Time* (LET), entre n'importe quel couple de nœuds permettant d'améliorer les performances du routage. Les informations de positions GPS sont échangées dans les paquets permettant ainsi aux différents nœuds d'estimer la durée restante des connexions avec leurs voisins. Pour deux nœuds i et j aux positions respectives (x_i, y_i) et (x_j, y_j) et se déplaçant aux (vitesses, directions) respectives (v_i, θ_i) et (v_j, θ_j) , l'équation suivante est utilisée à l'instant t pour déterminer la distance les séparant :

$$D_t = \frac{-(ab + cd) + \sqrt{(a^2 + c^2)r^2 - (ad - bc)^2}}{a^2 + c^2} \quad (4.1)$$

avec $a = v_i \cos \theta_i - v_j \cos \theta_j$, $b = x_i - x_j$, $c = v_i \sin \theta_i - v_j \sin \theta_j$ et $d = y_i - y_j$, (x_i, y_i) . La durée de vie d'un chemin, *Route Expiration Time* (RET), est prise comme la plus petite valeur de LET des liens constituant ce chemin. D'autres publications utilisent la même approche, notamment la même formule, avec quelques améliorations (Su et al., 2000; Wu, 2002).

Dans le modèle décrivant la proximité des nœuds, *Proximity Model* proposé par McDonald et al. (McDonald et al., 2000), la disponibilité totale (*total availability*) d'un lien entre deux nœuds m et n , $A_{m,n}^T(t)$, est donnée par :

$$A_{m,n}^T(t) = A_{m,n}^i(t)P_i + A_{m,n}^c(t)(1 - P_i) \quad (4.2)$$

avec $A_{m,n}^i(t)$ la disponibilité lorsque le mouvement des nœuds est indépendant et $A_{m,n}^c(t)$ la disponibilité lorsque le mouvement des nœuds est corrélé. Les valeurs prises par P_i permettent de pondérer l'importance des composantes indépendantes et corrélées dans la disponibilité totale. Chaque nœud doit donc définir une valeur pour P_i , suivant son environnement et son modèle de mouvement. Dans le cas de mouvement dans un groupe ou sur une voie rapide, de faibles valeurs de P_i seront privilégiés, tandis que de grandes valeurs seront choisies pour un nœud nomade et indépendant. À partir de valeurs prédéfinies pour $A_{m,n}^i(t)$ et P_i , les valeurs de $A_{m,n}^c(t)$ seront graduellement ajustées. L'idée est donc de partir de la supposition que les mouvements soient indépendants $A_{m,n}^c(t) = A_{m,n}^i(t)$ et de progressivement adapter la valeur de $A_{m,n}^c(t)$, suivant un modèle de type *exponential smoothing*²⁰, lorsque la durée de vie d'un nœud est plus longue que la durée de rupture prédite.

Goff et al. (2001) proposent un modèle qui considère que le lien est sur le point d'être rompu lorsque la puissance de réception est proche de la puissance minimale de connectivité. Pour cela, lorsque la puissance reçue passe en dessous d'une valeur $P_{threshold}$, une alarme est déclenchée qui permet aux protocoles de routage d'initier une maintenance préventive. Lorsque la valeur $P_{threshold}$ est trop petite, des ruptures de lien imprévues peuvent se produire et les chemins alternatifs peuvent ne pas être découverts à temps. Lorsque cette valeur est trop élevée, des alertes sont émises trop tôt avec trois conséquences problématiques :

²⁰ Le modèle *exponential smoothing* est décrit dans la section 5.3.2.1

- Le lien pourrait ne pas casser, notamment à cause du changement dans le mouvement d'un des deux nœuds, avec par conséquent une fausse alerte.
- Le chemin alternatif pourrait avoir une qualité inférieure et serait alors utilisé plus longtemps que nécessaire.
- L'augmentation du *threshold* diminue les distances de connexions, puisque des distances plus petites génèrent des alertes.

La valeur de $P_{threshold}$ est définie à partir d'une distance de sécurité $r_{preemptive}$ considérée autour de chaque nœud comme l'illustre la figure 73. L'équation suivante permet d'obtenir $P_{threshold}$ à partir de $r_{preemptive}$ et de la puissance d'émission P_0 :

$$\begin{aligned}
 P_{threshold} &= \frac{P_0}{r_{preemptive}^4} \\
 r_{preemptive} &= (range - w) \\
 w &= V_{relative} \times T_w
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

où *range* est la portée radio, $V_{relative}$ est la vitesse relative entre les nœuds et T_w est le temps nécessaire à la découverte d'un nouveau chemin.

Jiang et al. (2001) définissent une estimation de la disponibilité du lien à l'instant t_0 , *Link Availability Estimation* $L(T_p)$, comme la probabilité qu'un lien soit continûment disponible entre les instants t_0 et $t_0 + T_p$. L'hypothèse de base est que le mouvement des nœuds est décorrélé et que la durée des périodes de mouvements uniformes d'un nœud suit une distribution exponentielle de moyenne λ^{-1} . Deux cas sont décrits : cas de durées de périodes homogènes (même λ^{-1} pour les différents nœuds) et cas de durées de périodes hétérogènes (λ^{-1} différents pour les nœuds). La valeur de T_p est considérée connue soit à partir de données GPS, soit à travers un calcul basé sur la connaissance du mouvement relatif des nœuds à plusieurs instants consécutifs, ou encore à travers des calculs basés sur la puissance reçue à des instants consécutifs. Il est cependant à noter

que seul l'utilisation de coordonnées GPS en extérieur et des calculs similaires à l'équation (4.1) permettent de garantir des données avec peu d'erreur.

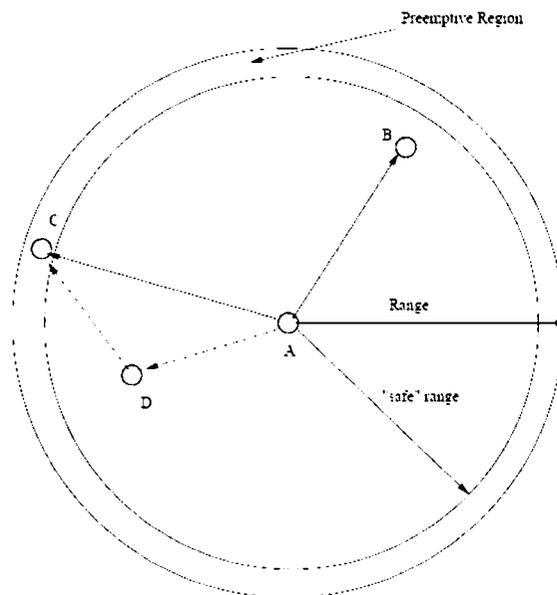


Figure 73 Illustration de la zone de sécurité
(Goff et al., 2001)

Une version améliorée du modèle, qui prend en compte tous les changements de vitesse qui peuvent se produire dans le période T_p , a été proposée en 2004 (Jiang, 2004). Dans une approche similaire, Qin et al. (2005) s'intéressent aux cas d'applications type *streaming* nécessitant une QoS importante et continue. Ils souhaitent donc déterminer les liens les plus stables. En considérant un certain nombre de suppositions sur le mouvement et à partir des données sur la distance entre deux nœuds, ils déterminent mathématiquement la distribution de $L(T_p)$.

Dans leur publication, Qin et al. (2003) ajoutent au protocole DSR un mécanisme de prédiction de rupture de lien basé sur la puissance reçue. Le modèle de propagation considéré est simpliste et la détermination de la distance en fonction de la puissance suit

l'équation (4.4). En considérant un mouvement uniforme et trois mesures de distance, le moment projeté auquel la puissance reçue sera en dessous d'une valeur prédéfinie P_{thr} est prédit. L'ajout d'un bruit sur la puissance reçue de 5% à 10% de la valeur nominale induit des erreurs de prédiction non négligeable.

$$d = \sqrt[4]{\frac{kP_t}{P_r}} \quad (4.4)$$

Dans une approche résolument *cross-layer*, Weiss et al. (Weiss et al., 2003) utilisent des informations de modulation de la couche physique pour déterminer la qualité d'un lien. La couche physique intègre, comme expliqué dans la section 1.3.1, la capacité d'adapter la modulation à la qualité du canal. Avec la dégradation du canal (par éloignement ou perturbation), des modulations de plus en plus simples sont utilisées (cf. figure 74). Lorsque deux nœuds s'éloignent l'un de l'autre, la complexité de la modulation utilisée pour leur transmission diminue donc graduellement. L'idée est alors de considérer le lien fragile et en voie de rupture lorsque la modulation utilisée correspond à la plus simple disponible. Sur la figure 74 est représentée la variation de la modulation et du débit lors d'un éloignement, donc lorsque la distance croît. Dans cet exemple, l'utilisation de la modulation BPSK $^{1/2}$, la modulation la plus simple, précède immédiatement la rupture du lien. L'avertissement de la couche réseau de l'imminence du bris de lien permet donc au protocole de routage d'effectuer la maintenance de chemin nécessaire.

Huang et al. (2003) proposent trois estimateurs de longévité de lien basés sur un filtre de Kalman et utilisant la puissance du signal reçu comme entrée du système. Le but est de pouvoir sélectionner les liens de plus grande longévité lors du choix d'un chemin de routage supportant une certaine QoS et nécessitant un temps minimum de connexion. Le premier outil utilise le niveau de puissance et la direction de réception pour calculer la distance et la vitesse relative. Le second outil n'utilise que le niveau de puissance reçue pour estimer la distance ainsi que sa variation. Le troisième outil est similaire au

second à la différence qu'il utilise l'historique des puissances reçues pour effectuer le calcul.

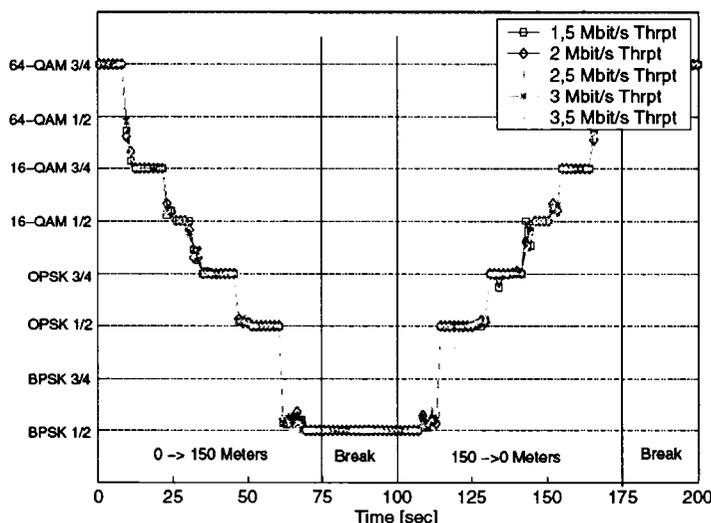


Figure 74 Évolution du débit lors d'un déplacement (Weiss et al., 2003)

Les trois outils calculent la distance à partir de la puissance de réception d'après l'équation :

$$d' = \left(\frac{k}{p} \right)^{1/a} \quad (4.5)$$

$$d = d' + m$$

où d' est la distance, p est la puissance du signal reçu, k et a des constantes d'atténuation. Les valeurs de k et a doivent être définies par les utilisateurs du modèle, les auteurs considèrent le cas $k = 10^6$ et $a = 2$. La seconde équation permet de tenir compte des variations (erreurs) de la puissance reçue due aux phénomènes de réflexions dans le calcul de la distance d . La distance maximale de connexion d_{max} est déterminée à partir de la définition d'une puissance minimale de réception p_{min} . Les trois outils calculent à partir de la puissance, une estimation de la variation de la distance et peuvent ainsi déterminer à quel moment la distance dépassera la valeur d_{max} .

Dans le troisième outil, une moyenne sur plusieurs calculs consécutifs est effectuée pour diminuer l'impact des erreurs et augmenter ainsi la fiabilité du système.

Zaidi et al. (2003) proposent un outil qui déduit les distances relatives entre les nœuds à partir de la puissance du signal reçu, dans un référentiel local à chaque nœud. Le mouvement des nœuds est estimé en considérant un modèle de mouvement basé sur un processus discret semi-Markovien et en utilisant un filtre de Kalman. Un filtre moyennneur est utilisé en entrée du système pour lisser les variations sur la puissance. Le modèle de propagation est défini d'après l'équation suivante :

$$p = k - 10a \log(d) + \psi \quad (4.6)$$

où p est la puissance de réception (en dB), a et k des constantes d'atténuation et ψ un nombre aléatoire de moyenne nulle et d'écart type $\sigma \in [4,8]dB$. L'estimation de la distance d est calculée en inversant l'équation ci-dessus et en considérant la moyenne sur N valeurs de puissance de réception. La figure 75 représente le mouvement réel et son estimation avec $\sigma = 6dB$. Dans un second article, les auteurs proposent un deuxième outil très similaire mais basé cette fois sur un modèle autorégressif du mouvement (Zaidi et al., 2004).

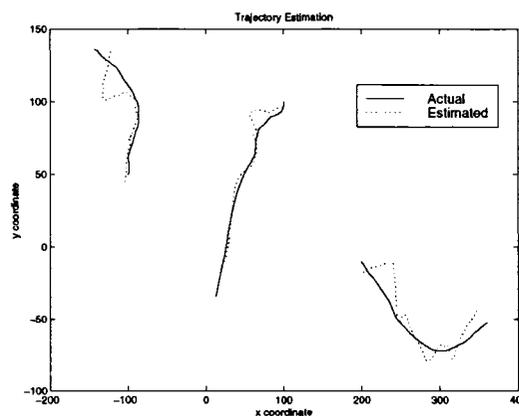


Figure 75 Mouvement réel et estimé
(Zaidi et al., 2003)

Hsu et al. (2004) proposent un mécanisme partant du constat que les routes sont plus stables pour les nœuds qui sont fixes et le sont moins lorsque les nœuds sont en mouvement. À partir de cette considération, chaque nœud transmet périodiquement des messages *Hello* pour informer ses voisins de sa présence. En comptant les messages *Hello* provenant de ses voisins, un nœud peut ainsi déterminer l'âge de ses liens avec eux. Après chaque rupture de lien, un nœud sauvegarde l'âge du lien, et conserve ainsi l'historique de la durée des liens qu'il a eue avec ses voisins. La prédiction *Long-lived Route Prediction* (LRP) permet de découvrir les routes stables à partir du facteur de longévité LF (*Longevity Factor*). Ce facteur est basé sur la fonction $I(i)$ d'un nœud x :

$$I(i) = \begin{cases} 1 & \text{si } a < LTR_x(i) \\ 0 & \text{autrement} \end{cases} \quad (4.7)$$

$$LF = \frac{1}{\left(1 + \sum_{i=1}^N I(i)\right)}$$

où a est l'âge du lien à considérer, $LTR_x(i)$ est la $i^{\text{ème}}$ donnée de la liste LTR_x des données historiques de durée de liens du nœud x , N est le nombre de données de la liste LTR_x . Par exemple, pour $LTR_x = \{3, 8, 29, 15, 77\}$ et un lien d'âge actuel $a=10$, le facteur de longévité LF est de 0.25. Le facteur de longévité d'une route formée de M liens, chacun ayant un facteur de longévité LF_i est donné par :

$$\frac{\prod_{i=1}^M LF_i}{M} \quad (4.8)$$

Il est à noter que ce mécanisme utilise du trafic de contrôle supplémentaire à travers les messages *Hello*, de plus, la taille N des LTR doit être fixe.

Sharma et al. (2004) font une étude comparative des prédictions pour le *Grid Location Service* (GLS) utilisé par les protocoles de routage par position (*position based routing protocols*). Dans le cas du GLS, l'espace est divisé en cellules et une cellule est assignée

à chaque nœud. De plus, chaque nœud connaît exactement les positions des autres cellules ainsi que des positions des nœuds appartenant à la même cellule que lui. La position d'un nœud est ainsi confondue avec la position de la cellule pour les nœuds n'appartenant pas à la même cellule. Les auteurs comparent les trois principales techniques de calcul utilisées : LVP, WVP et MHP. Dans le cas du *Linear velocity prediction* (LVP), la vitesse d'un nœud est calculée à partir de deux séries de données (x,y,t) et à l'aide de la formule classique de la vitesse. La position d'un nœud aux différents instants sera alors obtenue en considérant un mouvement rectiligne et uniforme. Dans le cas du *Weighted velocity prediction* (WVP), au lieu d'utiliser la vitesse telle quelle dans le calcul de la position, une vitesse pondérée est obtenue à partir de :

$$V_{av} = \alpha V_{av} + (1 - \alpha) V_{rec} \quad (4.9)$$

où V_{av} est la vitesse pondérée, V_{rec} est la donnée de vitesse la plus récente et α est un facteur de pondération. La position actuelle est obtenue en considérant un mouvement rectiligne uniforme de vitesse V_{av} . Ces deux premiers modèles ne prennent pas en considération les changements de direction qui affectent de façon tout aussi significative la position des nœuds. Dans le *History based order one markov prediction* (MHP), chaque nœud garde un nombre NUM-SAMPLES de données récentes de numéro de *grid* GLS des nœuds pour lesquels il doit prédire la position. Le prochain numéro de *grid* est le numéro qui a historiquement suivi le numéro actuel. Si c'est la première occurrence du numéro actuel, aucune prédiction n'est effectuée.

Dans leur article, Redi et al. (2004) utilisent l'estimation et la prédiction de la puissance reçue pour optimiser la puissance d'émission en fonction du mouvement et de l'atténuation du canal radio. Ils utilisent un algorithme récursif à minimum quadratique (*Recursive Least Squares*, RLS) pour détecter des tendances dans la variation de la puissance de réception. Les nœuds peuvent ainsi déterminer la puissance minimale d'émission nécessaire et mettre à jour une métrique basée sur le coût en énergie de

transmission pour chaque lien. Les protocoles de routage peuvent ensuite utiliser cette métrique comme base décisionnelle. Le modèle autorégressif utilisé est donné par :

$$\begin{aligned} p(n) &= a(n-1)p(n-1) + v(n) \\ a(n) &= a(n-1) + w(n) \end{aligned} \quad (4.10)$$

où $p(n)$ est la puissance de transmission au temps n , $v(n)$ et $w(n)$ des composantes de bruit et $a(n)$ une variable de calcul.

Dans l'article de Wang et al. (2005), la prédiction de la position future du nœud est effectuée basée sur trois informations : les informations des positions actuelles, la vitesse ainsi que le modèle de mouvement. Ce mouvement est choisi parmi quatre modèles disponibles : stationnaire (mouvement nul), vers un point destination (*Waypoint*), circulaire, et inconnu. Dans ce modèle, l'erreur de prédiction à trois sources possibles : erreur sur la position GPS actuelle, différence entre la vitesse considérée et la vitesse réelle, et différence entre le modèle de mouvement considéré et le modèle réel. Un filtre *Exponentially-Weighted Moving Average*, vérifiant l'équation (4.11), est utilisé pour corriger les erreurs dans le modèle de prédiction.

$$\Delta s_k = \gamma \Delta s_{k-1} + (1 - \gamma) \frac{s_k - \hat{s}_k}{t_k - t_{k-1}} \quad (4.11)$$

où s_k est une coordonnée (x, y ou z) mesurée à l'instant k et \hat{s}_k est l'estimé de cette position. γ est la pondération entre la composante historique et actuelle de l'erreur, le cas $\gamma = 0.8$ est empiriquement considéré. La valeur finale de la prédiction de la position est alors :

$$[x_{k+1}, y_{k+1}, z_{k+1}] = [\hat{x}_{k+1}, \hat{y}_{k+1}, \hat{z}_{k+1}] + [\Delta vx_k, \Delta vy_k, \Delta vz_k](t_{k+1} - t_k) \quad (4.12)$$

avec $[\hat{x}_{k+1}, \hat{y}_{k+1}, \hat{z}_{k+1}]$ est la valeur obtenue avec le modèle exposé précédemment.

Korsnes et al (2005) considèrent que le temps restant d'une connexion augmente avec la durée déjà écoulée de celle-ci, ceci part du fait que les contacts les plus anciens sont plus

sûrs que les nouveaux contacts. Il considère donc que les liens les plus anciens sont ceux qui ont le moins de chance de rupture. Ce sont donc ces liens qui sont utilisés par les protocoles de routage. Dans ce cas, la prédiction découle de l'hypothèse de départ : les auteurs prédisent de longues durées de connexion pour les liens les plus anciens.

Meng et al. (2005) utilisent la mesure de la puissance reçue pour estimer la distance d'un nœud voisin ainsi que la vitesse radiale relative. Sur la figure 76, le mouvement d'un nœud de la position D à la position D' est détecté par le nœud S. La prédiction sert alors à détecter la rupture de lien un temps suffisamment long avant qu'elle ne survienne pour permettre aux protocoles de routage d'effectuer la maintenance nécessaire. Les équations suivantes sont utilisées pour le calcul :

$$d = \sqrt[4]{\frac{kP_t}{P_r}} \quad (4.13)$$

$$v_r = \frac{\Delta d}{\Delta t}$$

$$direction = \begin{cases} v_r > 0 & \text{éloignement} \\ v_r = 0 & \text{statique} \\ v_r < 0 & \text{rapprochement} \end{cases} \quad (4.14)$$

$$v_r T_{\min} + d = D_{comm}$$

où P_t et P_r sont respectivement les puissances d'émission et de réception, k est un facteur d'atténuation et d est l'estimé de la distance entre deux nœuds. Cette distance est donc déterminée à partir de la puissance de réception. La racine quatrième signifie que la puissance varie comme l'inverse de la puissance quatrième de la distance ($P_r \propto d^{-4}$). v_r est la vitesse relative radiale, Δd est la différence de distance sur un intervalle de temps Δt . Lorsque les nœuds s'éloignent l'un de l'autre, et en considérant un intervalle de temps minimum T_{\min} nécessaire aux protocoles de routage d'effectuer la maintenance avant que le lien ne casse et une distance de communication (ou de portée radio) D_{comm} ,

le protocole de routage doit effectuer la maintenance quand $d > v_r T_{\min} + D_{comm}$. Nous pouvons remarquer que ce modèle considère une atténuation déterministe qui est une fonction de la distance, avec un facteur d'atténuation constant et une variation en puissance quatrième. De plus, la prédiction n'est valide que pour des mouvements uniformes et invariants. Les valeurs de T_{\min} et D_{comm} sont arbitraires et statiques.

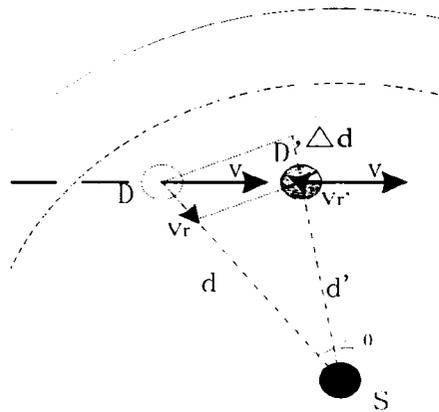


Figure 76 Prédiction de la rupture d'un lien
(Meng et al., 2005)

5.2.3 Synthèse et limitations des modèles

Sans revenir sur chaque modèle individuellement, nous allons présenter dans cette section les inconvénients et les limitations majeurs de ces approches.

Certaines approches sont probabilistes, basées sur le temps de connexion passé et considèrent une répétitivité, ou stationnarité, de la connectivité entre les nœuds. Ces approches ne fonctionnent que si la répétitivité de la connectivité est effective. Donc si les caractéristiques de connectivité futures sont corrélées à leurs historiques.

Les modèles utilisant le GPS pour en déduire la connectivité future ne prennent pas en compte la variation des propriétés du canal radio et supposent un modèle précis de propagation pour la détermination de la connectivité qui ne prend en compte que la distance et aucunement l'environnement.

Les modèles similaires utilisant la puissance de réception pour la détermination du mouvement présentent les inconvénients supplémentaires de supposer un modèle précis de propagation pour la détermination de la position et de la vitesse et ne prennent pas en considération la variation du niveau de puissance pour des raisons autres que le mouvement (ex. présence d'obstacles).

Les modèles utilisant la puissance de réception comme entrée du système considèrent généralement une relation bijective entre niveau de puissance et distance, donc sans aucune variation dans le niveau de puissance. Les méthodes de lissage utilisées sont généralement à travers des moyennes ce qui entraîne un retard par rapport à la réalité.

La grande majorité des modèles considèrent des a priori soit sur le mouvement, soit sur le modèle de propagation, soit sur les deux aspects.

5.3 Time Series Received Power Prediction (TSRPP)

5.3.1 Notre approche et son intérêt

Notre approche consiste à utiliser la puissance du signal reçu comme mesure de la qualité de lien. Nous avons vu dans les sections précédentes que les approches existantes considèrent des a priori sur le mouvement ou sur le canal de propagation. Notre idée est donc de n'en considérer aucun et d'effectuer l'estimation et la prédiction de la puissance reçue directement à partir de l'historique de la puissance reçue. De plus, notre approche utilise des outils simples nécessitant peu de calcul et de mémoire. Nos modèles

d'estimation et de prédiction se basent sur des extrapolations historiques de type *exponential smoothing*.

La fréquence de disponibilité de nouvelles données historique de puissance (une donnée par seconde) a été choisi comme compromis entre une fréquence minimale nécessaire aux outils d'estimation et de prédiction et la volonté de ne pas surcharger le système avec du trafic de control (Celui-ci sera néanmoins nécessaire si la période d'échange de trafic de données entre les nœuds est plus petit que la seconde).

Bien que la prédiction se fasse sur un horizon assez court (deux secondes), cette durée est néanmoins suffisante pour que les différents protocoles aient le temps d'effectuer la maintenance nécessaire et s'adapter au bris imminent du lien.

5.3.2 Nos modèles d'estimation et de prédiction

5.3.2.1 Description des modèles d'estimation et de prédiction

Nous commencerons cette section par quelques éléments et rappels concernant les *time series*. Il n'est pas question de faire une étude approfondie ou un cours sur le sujet mais plutôt une introduction au concept d'*exponential smoothing* que nous utilisons dans notre approche. Pour une compréhension plus complète du sujet, le lecteur pourra se référer aux documents : (Janacek et al., 1993; Brockwell et al., 1996; Storer, 2001; Caplice, 2003).

L'approche *time series* pour l'estimation et la prédiction d'un processus consiste à se baser sur un historique récent, plus ou moins étendu, pour dégager des caractéristiques permettant de déduire les probables valeurs futures. Les modèles supposent donc une relation étroite entre le passé, le présent et le futur.

Lorsque les données récoltées sont entachées d'erreur (de bruit de mesure par exemple), un certain nombre d'outils simples permettent d'estimer la valeur réelle du phénomène observé. Une technique très intuitive consiste en le calcul de la moyenne de plusieurs observations consécutives. De fait, l'utilisation de la moyenne pour la détermination de la « vraie valeur » suppose que l'erreur soit à moyenne nulle, autrement nos observations consisteraient en la somme d'une tendance (*trend*) et d'un bruit.

À partir de cette réflexion, assez simple sur la tendance, nous pouvons considérer qu'un phénomène observé, présentant une relation entre le présent et le passé, peut s'écrire comme la somme de plusieurs composants :

$$X(t) = T(t) + S(t) + R(t) \quad (4.15)$$

où $X(t)$ est la valeur observée du phénomène, $T(t)$ sa tendance, $S(t)$ sa saisonnalité et $R(t)$ la composante aléatoire (l'erreur). La saisonnalité correspond à la répétition dans le temps d'un certain comportement.

Dans le cas qui nous intéresse, nous ne considérerons que le terme de tendance et celui d'erreur, un phénomène alors décrit par :

$$X(t) = T(t) + R(t) \quad (4.16)$$

La moyenne correspond en fait à la somme pondérée d'observations passées. Le support de la somme peut être plus ou moins étendu allant de la prise en compte des deux dernières observations à l'utilisation de l'historique au complet.

Dans le cas de la moyenne, les coefficients de pondération pour N termes est $1/N$, les termes les plus anciens sont considérés avec la même importance que les termes les plus récents. Une approche intéressante est alors d'utiliser des poids plus importants pour les valeurs récentes et plus faible pour les valeurs les plus anciennes. Le lissage par exponential smoothing présente l'intérêt de définir de manière récursive les valeurs des différents coefficients d'après l'équation suivante :

$$\tilde{X}(t) = \alpha X(t) + (1-\alpha)\tilde{X}(t-1) \quad (4.17)$$

où $X(t)$ est la valeur observée à l'instant t , $\tilde{X}(t)$ est son estimé (la valeur lissée) et $\alpha \in [0,1]$ le paramètre de lissage. L'équation (4.17) peut également s'écrire, pour un historique de N valeurs :

$$\begin{aligned} \tilde{X}(t) &= \sum_{n=0}^N \alpha(1-\alpha)^n X(t-n) \\ \tilde{X}(0) &= X(0) \end{aligned} \quad (4.18)$$

Le poids des différents éléments historiques dépendra de la valeur prise par le coefficient α comme le montre la figure 77. Nous pouvons voir que lorsque α est proche de zéro, le poids des éléments historiques est semblable, en revanche, lorsque α est proche de un, le poids des éléments récents est plus important que celui des éléments les plus anciens.

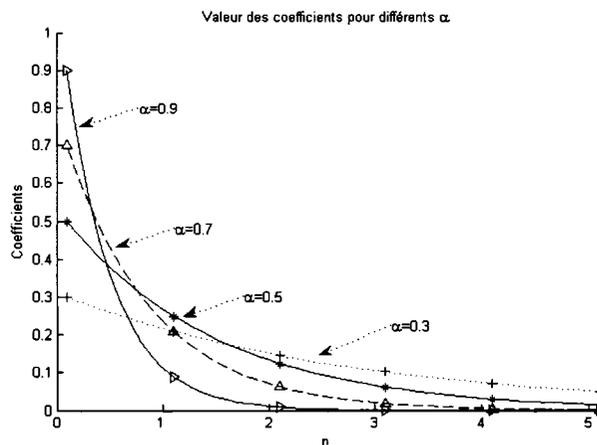


Figure 77 Différentes courbes des coefficients fonction de α

Dans le cas d'un double *exponential smoothing*, que nous utilisons dans notre modèle, l'estimation de la valeur présente est obtenue à l'aide des équations suivantes :

$$\begin{aligned}\tilde{X}_1(t) &= \alpha X(t) + (1-\alpha)\tilde{X}_1(t-1) \\ \tilde{X}(t) &= \alpha \tilde{X}_1(t) + (1-\alpha)\tilde{X}(t-1)\end{aligned}\quad (4.19)$$

où $X(t)$ est la valeur observée à l'instant t , $\tilde{X}(t)$ est son estimé (la valeur lissé), $\tilde{X}_1(t)$ est un lissage intermédiaire et $\alpha \in [0,1]$ le paramètre de lissage.

La figure 78 présente les courbes obtenues dans les cas d'un simple et d'un double *exponential smoothing* pour $\alpha = 0.1$. Nous pouvons voir sur cette figure que le simple exponential smoothing (courbe ES) est en retard par rapport à la courbe réelle, le double exponential smoothing (courbe ESES) à un retard encore plus important. La courbe 2ES-ESES correspond à $(2 \times ES) - ESES$, nous pouvons constater que la courbe ne présente pas de retard mais en revanche surestime la valeur réelle (*overshoot*) lors de changement de pente. La figure 79 correspond au même cas mais avec un bruit gaussien de moyenne nulle et d'écart type $\sigma = 1$ ajouté à la courbe réelle sans erreur. Ces deux figures correspondent à une partie de la figure 82 avec un changement de l'axe des ordonnées.

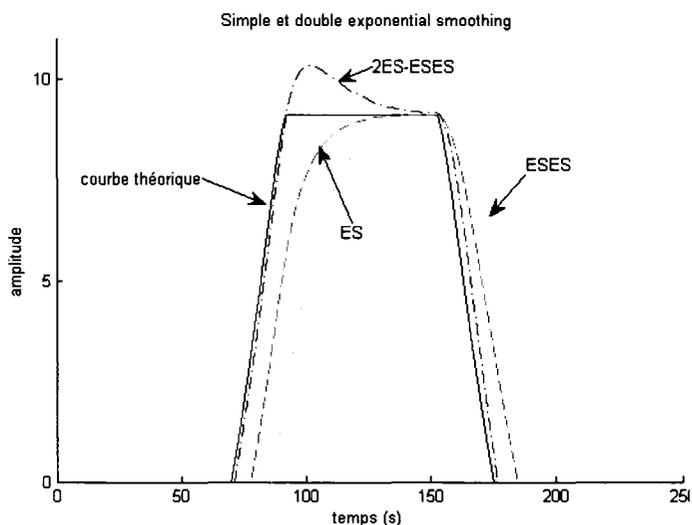


Figure 78 Simple et double exponential smoothing

Le modèle *exponential smoothing* peut également être utilisé pour la prédiction en considérant que l'estimation faite au temps t correspond à la prédiction au temps $t+1$, comme décrit par l'équation suivante :

$$\tilde{X}(t+1) = \alpha X(t) + (1-\alpha)\tilde{X}(t) \quad (4.20)$$

où $X(t)$ est la valeur observée à l'instant t , $\tilde{X}(t+1)$ est la prédiction à l'instant $t+1$ et $\alpha \in [0,1]$ le paramètre de lissage.

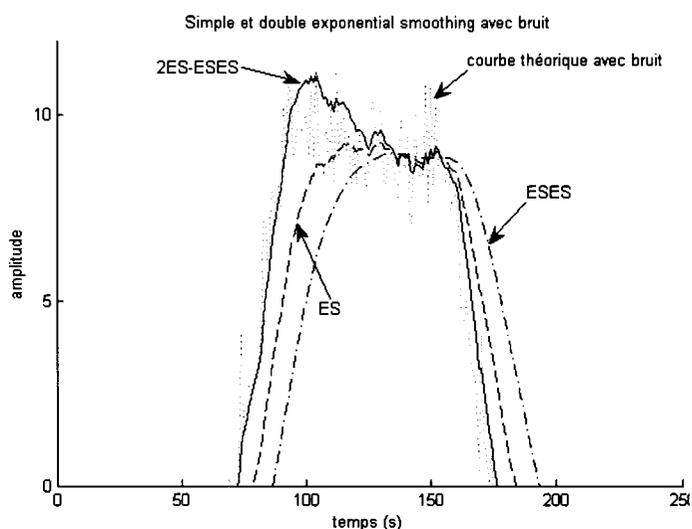


Figure 79 Simple et double exponential smoothing dans le cas de bruit

L'utilisation du *exponential smoothing* tel quel pour la prédiction engendre un retard inévitable. Pour mieux prendre en compte le facteur de tendance (*trend*) lors de la prédiction, le modèle de Holtz peut être utilisé. Ce modèle est basé sur les équations suivantes :

$$\begin{aligned} L(t) &= \alpha X(t) + (1-\alpha)\bar{X}(t-1) \\ T(t) &= \beta(L(t) - L(t-1)) + (1-\beta)T(t-1) \\ \bar{X}(t+\tau) &= L(t) + \tau T(t) \end{aligned} \quad (4.21)$$

où $X(t)$ est la valeur observée à l'instant t , $\bar{X}(t+\tau)$ est la prédiction à l'instant $t+\tau$, $\alpha \in [0,1]$ et $\beta \in [0,1]$ sont les paramètres de lissage, et $L(t)$ et $T(t)$ des variables de calculs intermédiaires. $T(t)$ correspond au facteur de tendance (*trend*), donc de pente.

Notre approche est donc d'utiliser la combinaison d'un simple et d'un double *exponential smoothing* pour estimer la vraie valeur de la puissance (valeur sans variations ou erreurs) et d'utiliser cette estimation associée au double *exponential smoothing* et à la formulation de Holtz pour effectuer la prédiction.

Rappelons que nous utilisons les termes « variations » ou « erreurs » pour désigner les écarts entre la courbe théorique de la puissance à variations lentes (cas $\sigma = 0$) et celle ayant des variations rapides (cas $\sigma \neq 0$).

Notre modèle d'estimation utilise donc les équations suivantes, déduites de l'équation (4.19) et des explications de la page 141 :

$$\begin{aligned}\tilde{X}(t) &= \alpha X(t) + (1-\alpha)\tilde{X}(t-1) \\ \tilde{\tilde{X}}(t) &= \alpha \tilde{X}(t) + (1-\alpha)\tilde{\tilde{X}}(t-1) \\ \hat{X}(t) &= 2\tilde{X}(t) - \tilde{\tilde{X}}(t)\end{aligned}\tag{4.22}$$

où $X(t)$ est la valeur observée à l'instant t , $\hat{X}(t)$ est son estimation, $\tilde{X}(t)$ est le premier lissage (ou simple *exponential smoothing*), $\tilde{\tilde{X}}(t)$ est le deuxième lissage (ou double *exponential smoothing*) et $\alpha \in [0,1]$ le paramètre de lissage.

À partir de cette estimation, notre modèle de prédiction utilise les équations suivantes, déduites de l'équation (4.21) et des explications de la page 143 :

$$\begin{aligned}T(t) &= \beta \left(\tilde{\tilde{X}}(t) - \tilde{\tilde{X}}(t-1) \right) + (1-\beta)T(t-1) \\ \bar{X}(t+\tau) &= \hat{X}(t) + \tau T(t)\end{aligned}\tag{4.23}$$

où $\bar{X}(t+\tau)$ est la prédiction à l'instant $t+\tau$, $\hat{X}(t)$ est la valeur estimée à l'instant t , $\tilde{X}(t)$ est le deuxième lissage (ou double *exponential smoothing*), $\beta \in [0,1]$ le paramètre de lissage et $T(t)$ une variable de calculs intermédiaires représentant la tendance du double *exponential smoothing*.

Ce choix de formulation est basé sur les observations que nous pouvons effectuer sur la figure 78 et la figure 79. Nous pouvons constater que la combinaison du simple et double *exponential smoothing* à travers la formule $(2 \times ES) - ESES$ permet d'estimer avec peu d'erreur la courbe théorique et d'en lisser les variations. D'autre part, le double *exponential smoothing* permet d'estimer fidèlement la pente de la courbe théorique (sans variations aléatoires ou erreurs), de plus cette courbe est plus lisse que la courbe du simple *exponential smoothing* ou que celle de l'estimation. Nous pourrions donc réduire les erreurs de prédictions en utilisant la tendance du double *exponential smoothing* comme estimation de la tendance de la courbe de puissance.

Dans notre approche, nous devons donc déterminer les valeurs de α et β pour obtenir une erreur minimale d'estimation et une courbe de double *exponential smoothing* lisse et reflétant la pente de la courbe théorique.

Notre outil de prédiction est utilisé pour prédire le niveau, sans erreur (sans variations aléatoires), de la puissance et ceci à courte échéance. Ceci permet aux protocoles l'utilisant (au niveau de la couche Mac, du routage, dans les *clusters* et les *backbone*) de disposer d'un temps suffisant pour la maintenance et pour qu'ils puissent ainsi s'adapter aux changements de topologie. Nous considérons donc deux échéances de prédiction, la première est de deux secondes et la seconde de dix secondes. Nos efforts ont pour but d'obtenir de bons résultats pour l'échéance la plus courte (2s). L'échéance à plus long terme a pour but de mettre en évidence les limites de notre approche.

5.3.2.2 Scénarios de tests Matlab

Pour paramétrer et tester nos modèles, nous avons utilisé quatre scénarios de mouvement qui reflètent les cas possibles de variation de la puissance. Les paramètres de propagation sont ceux décrit dans le chapitre 3.

Les deux premiers scénarios mettent en œuvre des variations plus ou moins importantes de la puissance reçue. Le premier scénario reflète les cas où ces variations sont entrecoupés de période où la distance entre les nœuds est stable (vitesse relative nulle) tandis que le second reflète les cas où ces variations se suivent, ce qui correspond à des changements brusques du mouvement. Les deux derniers scénarios correspondent aux cas de variations continues et peu importantes de la puissance reçue.

Dans ces différents scénarios, un nœud est fixe et le second bouge dans le référentiel du premier à différentes vitesses. Les valeurs des vitesses ont été choisies en considérant les résultats que nous avons exposés dans la section 4.4.1 et pour engendrer les variations voulues dans le niveau de puissance en réception. Les mesures de puissances s'effectuent au niveau du nœud fixe.

Dans le premier scénario, les périodes de pause et de mouvement ont des durées de 60 secondes. La puissance de réception est mesurée toutes les secondes. La figure 80 est une illustration du mouvement considéré et la figure 82 reflète les variations de distance et de puissance correspondante.

Dans le second scénario, les périodes de mouvement ont des durées de 50 secondes. La puissance de réception est mesurée toutes les secondes. La figure 81 est une illustration du mouvement considéré et la figure 83 reflète les variations de distance et de puissance correspondante.

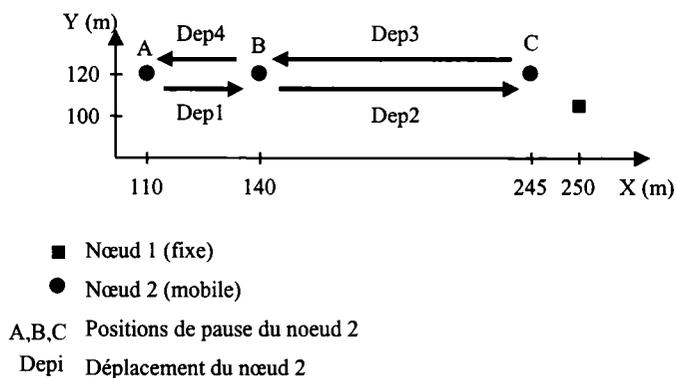


Figure 80 Premier scénario de test

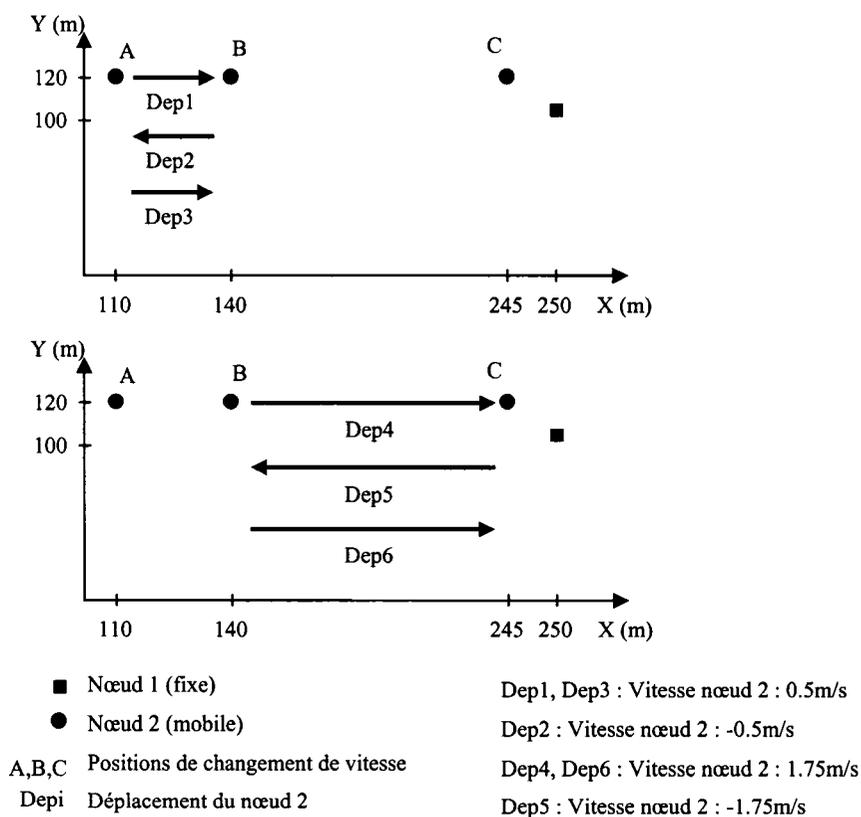


Figure 81 Second scénario de test

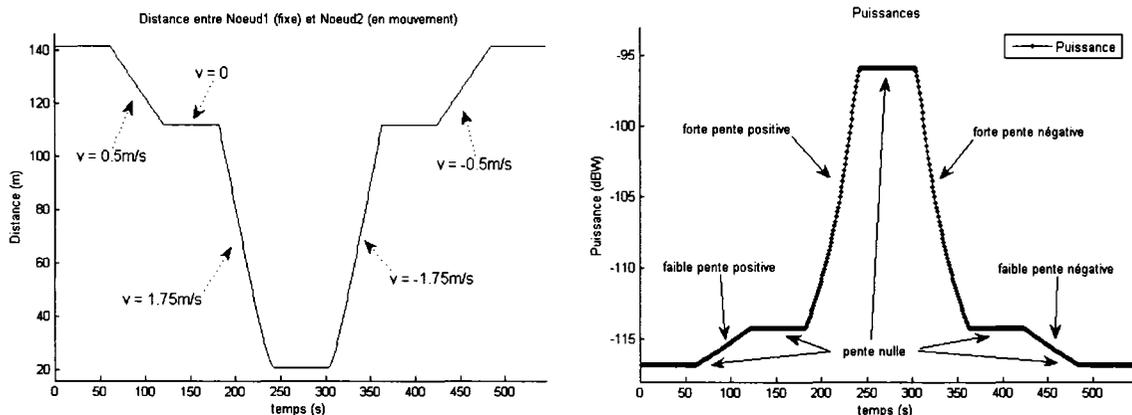


Figure 82 Variation de distance et de puissance lors du premier scénario de test

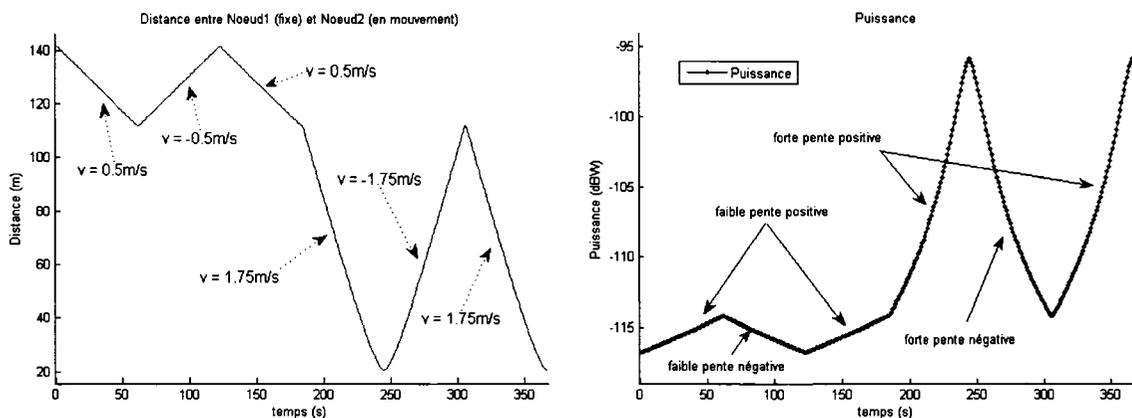


Figure 83 Variation de distance et de puissance lors du second scénario de test

Dans les scénarios trois et quatre, le mouvement est continu, le mouvement du premier nœud passe par la tangente du second nœud. La puissance de réception est mesurée toutes les secondes. La figure 84 et la figure 86 sont des illustrations des mouvements considérés. La figure 85 et la figure 87 reflètent les variations de distance et de puissance correspondantes aux deux scénarios. La différence entre les deux scénarios réside dans le degré de variation du niveau de puissance, les variations sont plus importantes dans le troisième modèle que dans le quatrième.

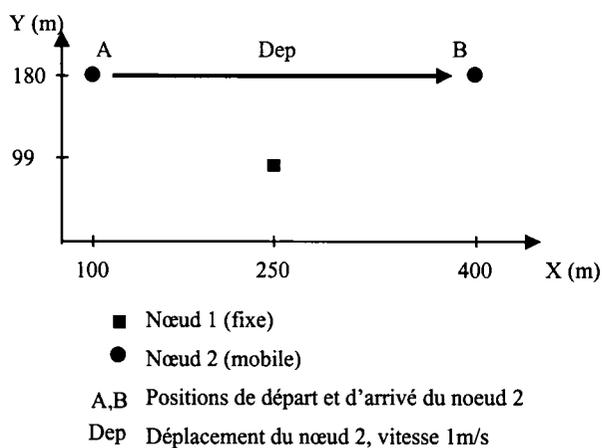


Figure 84 Troisième scénario de test

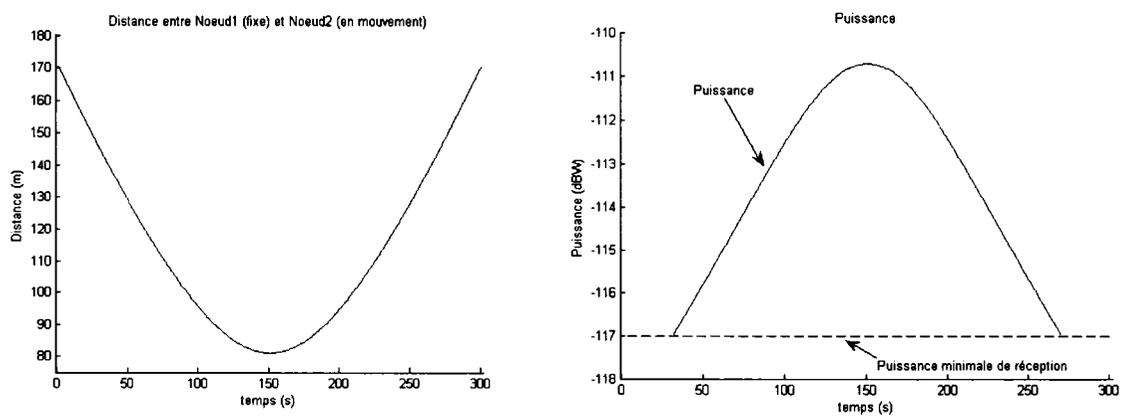


Figure 85 Variation de distance et de puissance lors du troisième scénario de test

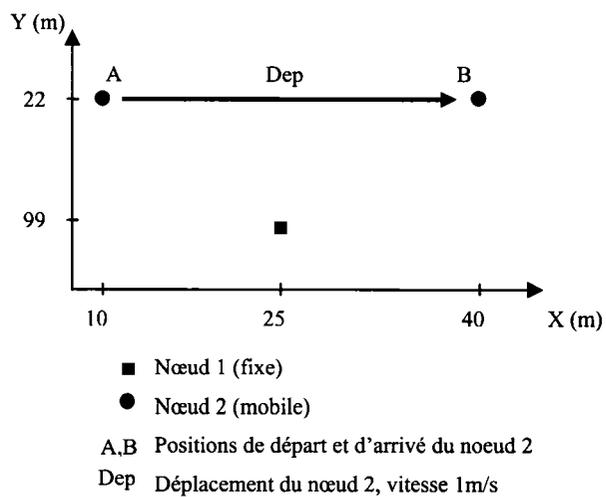


Figure 86 Quatrième scénario de test

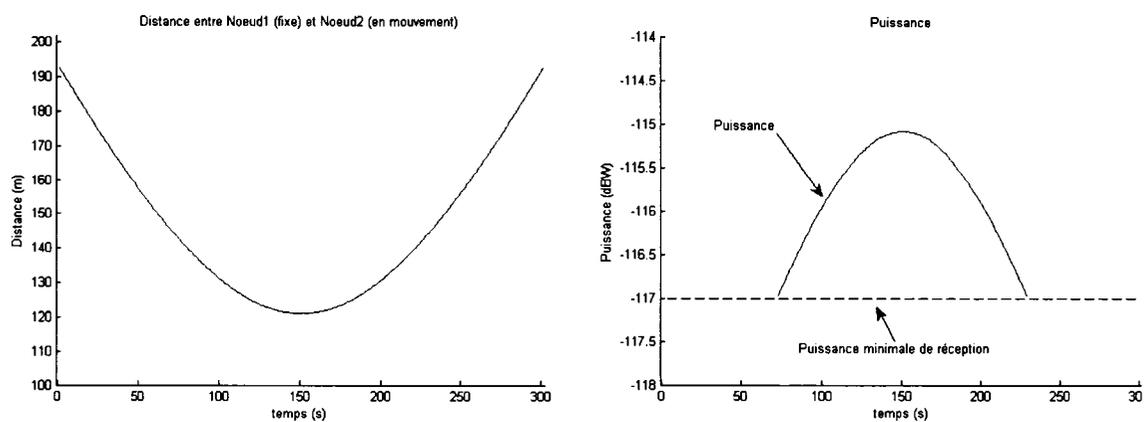


Figure 87 Variation de distance et de puissance lors du quatrième scénario de test

5.3.2.3 Choix du paramètres α

L'efficacité de notre prédiction dépendra de la précision de notre modèle d'estimation. Nous souhaitons d'une part que l'estimation de la puissance sans erreurs²¹ se fasse avec le maximum de précision (écart minimum entre la courbe d'estimation, basé sur les données avec erreurs, et la courbe sans erreurs) et d'autre part que la courbe du double *exponential smoothing* soit lisse et sa pente proche de la pente de la puissance sans erreurs. De grandes variations dans la pente de la courbe double *exponential smoothing* entraînera des erreurs considérables lors de la prédiction. Dans cette section, nous exposerons quelques essais et considérations qui nous ont conduit à choisir le paramètre α du modèle d'estimation.

Le choix de α est un compromis entre un lissage important ($\alpha \rightarrow 0$) et une bonne réactivité ($\alpha \rightarrow 1$). En cas de changements brusques, dues à une tendance à la hausse ou à la baisse de la puissance, il est important que la courbe du double *exponential smoothing* suive la tendance de la courbe sans erreurs (variations aléatoires).

Dans le cas d'un faible niveau d'erreur, correspondant au cas $\sigma = 0.5$ représenté sur la figure 88, nous pouvons constater sur la figure 89 que pour $\alpha = 0.2$, les courbes du simple *exponential smoothing* (ES), du double *exponential smoothing* (ESES) et de l'estimation (EST) sont presque superposées à la courbe de puissance sans erreurs.

Pour $\alpha = 0.1$, également illustré sur la figure 89, nous voyons que l'estimateur est presque superposé à la courbe de puissance sans erreur tout en ayant une surestimation (*overshoot*) importante lorsque la pente change de manière abrupte. Les courbes de ES

²¹ Rappelons que nous utilisons les termes « variations » ou « erreurs » pour désigner les écarts entre la courbe théorique de la puissance à variations uniquement lentes (cas $\sigma = 0$) et celle ayant des variations aléatoires rapides (cas $\sigma \neq 0$).

et ESES présentent elles un retard (*lag*) d'importance différente, elles ont cependant des formes lisses et sont de bonnes estimations de la pente de la courbe de puissance.

Nous pouvons également constater que dans le cas $\alpha = 0.2$, la courbe EST à plus de variations et plus d'erreurs que dans le cas $\alpha = 0.1$.

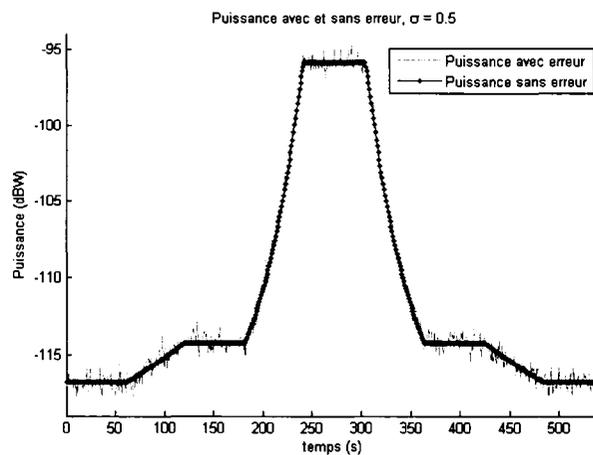


Figure 88 Puissance dans le cas du premier scénario et un faible niveau d'erreur

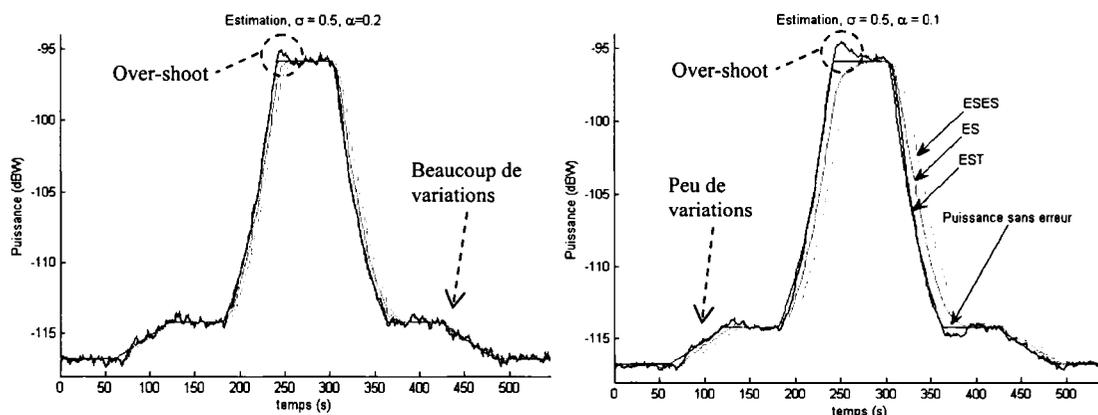


Figure 89 Estimation pour $\sigma = 0.05$ et les cas $\alpha = 0.1$ et $\alpha = 0.2$

Dans le cas d'un important niveau d'erreur, correspondant au cas $\sigma = 4$, représenté sur la figure 90, et en considérant les cas $\alpha = 0.05$ et $\alpha = 0.1$, nous pouvons constater sur la

figure 91 que la courbe de l'estimateur varie autour de la courbe de puissance sans erreur tout en ayant une surestimation (*over-shoot*) lorsque la pente change de manière abrupte. Cet *over-shoot* est nettement plus important dans le cas $\alpha = 0.05$ que dans le cas $\alpha = 0.1$. Les courbes de ES et ESES présentent elles un retard (*lag*) plus important pour $\alpha = 0.05$ que pour $\alpha = 0.1$ et ont, dans le premier cas, des pentes différentes de celles de la courbe de puissance sans erreurs. Pour $\alpha = 0.05$, l'estimateur met du temps avant de considérer le changement de pente ce qui se traduit par un *over-shoot* de durée importante. En revanche, la courbe EST est plus proche de la courbe de puissance sans erreur pour $\alpha = 0.05$, alors que les variations sont nettement plus importantes pour $\alpha = 0.1$. Nous pouvons voir en comparant les différentes courbes ($\sigma = 0.5, \sigma = 2$ et $\sigma = 4$) pour $\alpha = 0.1$, que lorsque le niveau d'erreur augmente, la précision de l'estimation diminue. De plus, lorsque sur un certain laps de temps, l'erreur n'est pas centrée, l'estimateur réagit comme s'il s'agissait d'un début de changement de pente. Bien que ceci puisse induire parfois en erreur, il n'est pas possible de faire la différence entre une série d'erreurs importantes dans le même sens et un changement de pente. Enfin, notons que ces variations non centrées, peuvent correspondre à des changements réels indépendants du mouvement.

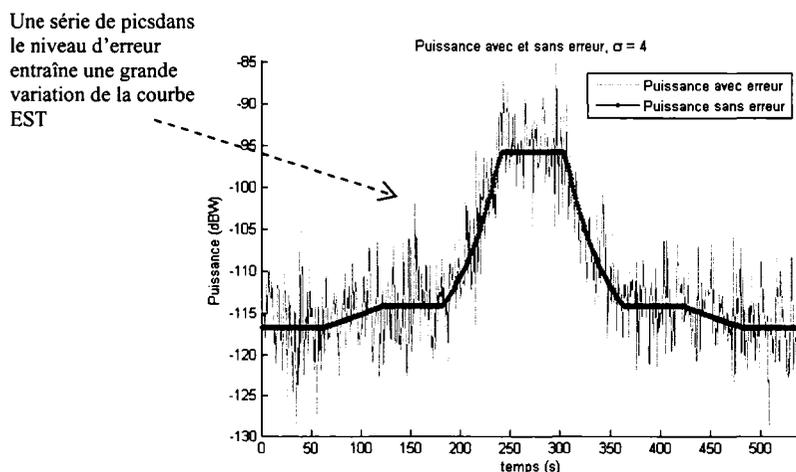


Figure 90 Puissance dans le cas du premier scénario et un niveau d'erreur important

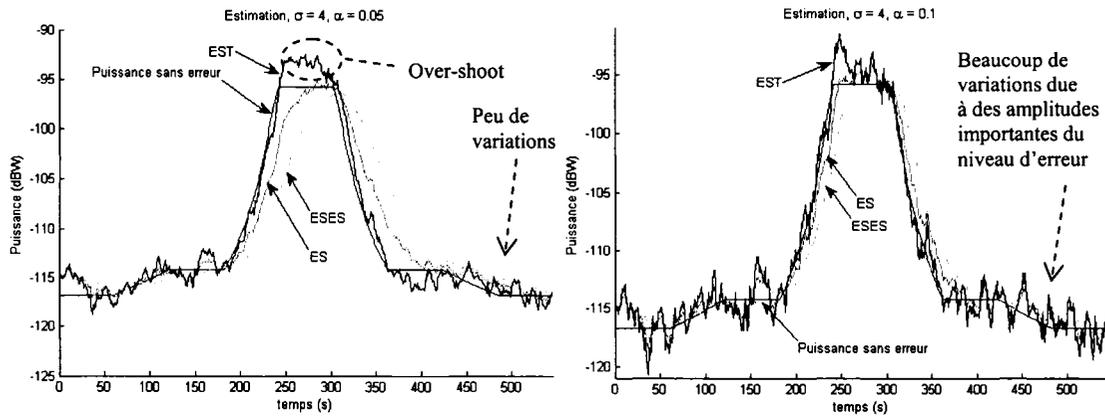


Figure 91 Estimation pour $\sigma = 4$ et les cas $\alpha = 0.05$ et $\alpha = 0.1$

Nous considérons enfin le cas d'un niveau d'erreur moyen, correspondant au cas $\sigma = 2$, représenté sur la figure 92, et en considérant les cas $\alpha = 0.05$ et $\alpha = 0.2$, respectivement représentés sur la figure 93 et la figure 94. Nous pouvons constater que la courbe EST est toujours une bonne estimation de la courbe de puissance sans erreur, les variations sont en effet autour de cette courbe. La surestimation (*overshoot*), qui entraîne des erreurs dans l'estimation, est plus importante dans le cas $\alpha = 0.05$ que dans le cas $\alpha = 0.2$. Les courbes de ES et ESES présentent elles un retard (*lag*) important pour $\alpha = 0.05$ et ont des pentes différentes de celle de la courbe de puissance sans erreur. Pour $\alpha = 0.2$, les variations de ESES et EST sont très importantes avec de fortes erreurs (variations) par rapport à la courbe de puissance sans erreur.

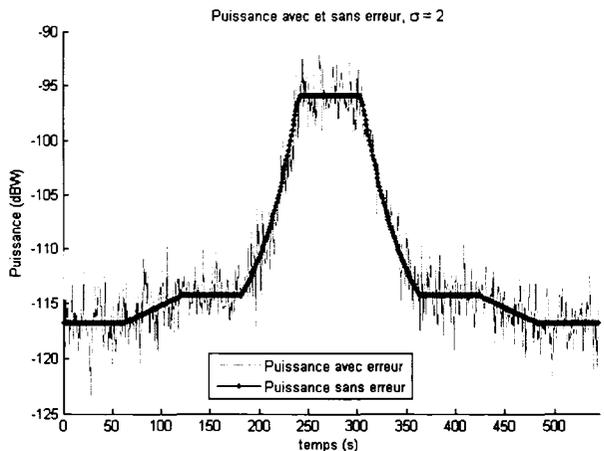


Figure 92 Puissance dans le cas du premier scénario et un niveau d'erreur moyen

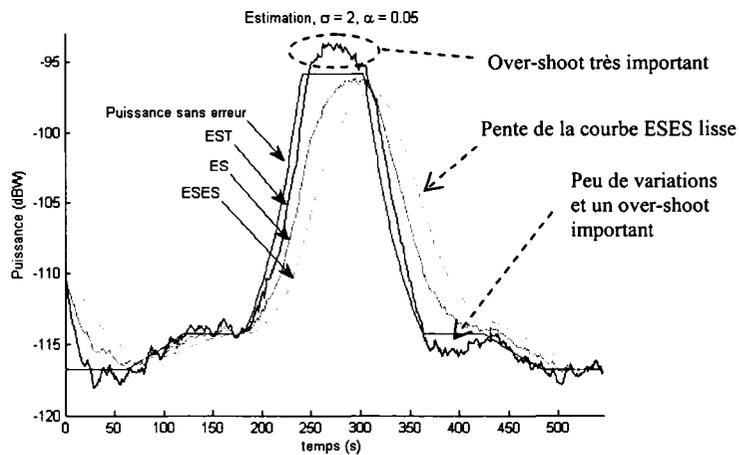


Figure 93 Estimation pour $\sigma = 2$ et $\alpha = 0.05$

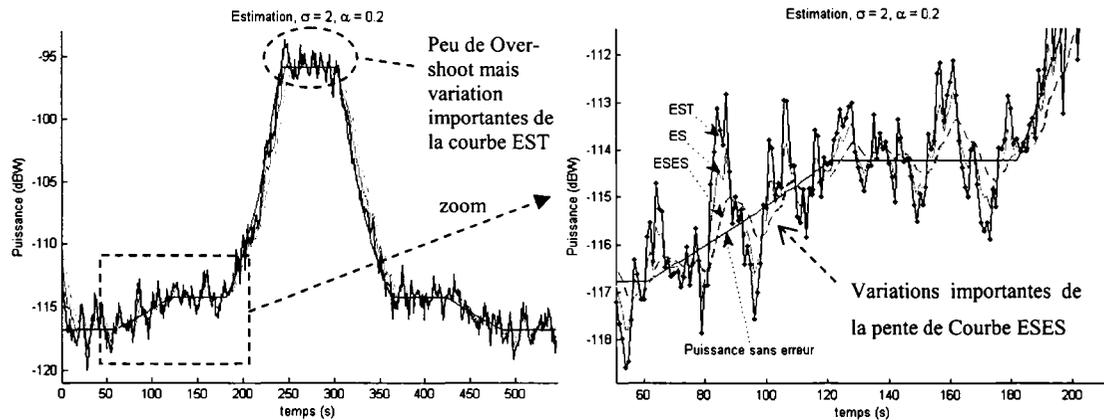


Figure 94 Estimation pour $\sigma = 2$ et $\alpha = 0.2$

D'après ces différents cas d'études, nous avons choisi d'utiliser dans le reste de notre étude $\alpha = 0.1$. Cette valeur est un compromis entre une bonne réactivité et un *overshoot* raisonnable de la courbe d'estimation EST, ainsi qu'une pente de ESES fidèle à la pente de la courbe de puissance sans erreur avec peu de *lag*.

5.3.3 Tests du modèle d'estimation avec les scénarios de tests

Nous avons effectué des tests de notre modèle d'estimation pour $\alpha = 0.1$ avec les quatre scénarios de mouvements que nous avons exposés dans la section 5.3.2.2.

5.3.3.1 Tests avec le premier et le second scénario de mouvement

Sur la figure 95, nous pouvons voir que dans le cas du premier scénario de mouvement et pour un niveau de bruit moyen ($\sigma = 2$), l'estimateur (courbe EST) est très précis surtout pour suivre les changements de pente de la puissance sans erreurs (variations aléatoires). De même, la pente de la courbe du double *exponential smoothing* (ESES) reflète assez fidèlement la pente de la courbe sans erreur notamment lors d'importants changements de pente de celle-ci.

Cependant, lorsqu'il y a une série d'erreurs (*burst* d'erreurs, ou variations brusques dans le même sens) soit au dessus, soit en dessous, de la valeur théorique, l'erreur de l'estimateur (EST) et du double *exponential smoothing* (ESES) croissent. Ce problème est plus important dans le cas de niveau d'erreur important ($\sigma = 2$), représenté sur la figure 96. Sur cette figure, nous pouvons également voir la présence d'*over-shoot* de la courbe de l'estimateur (EST) lors des changements importants de pente.

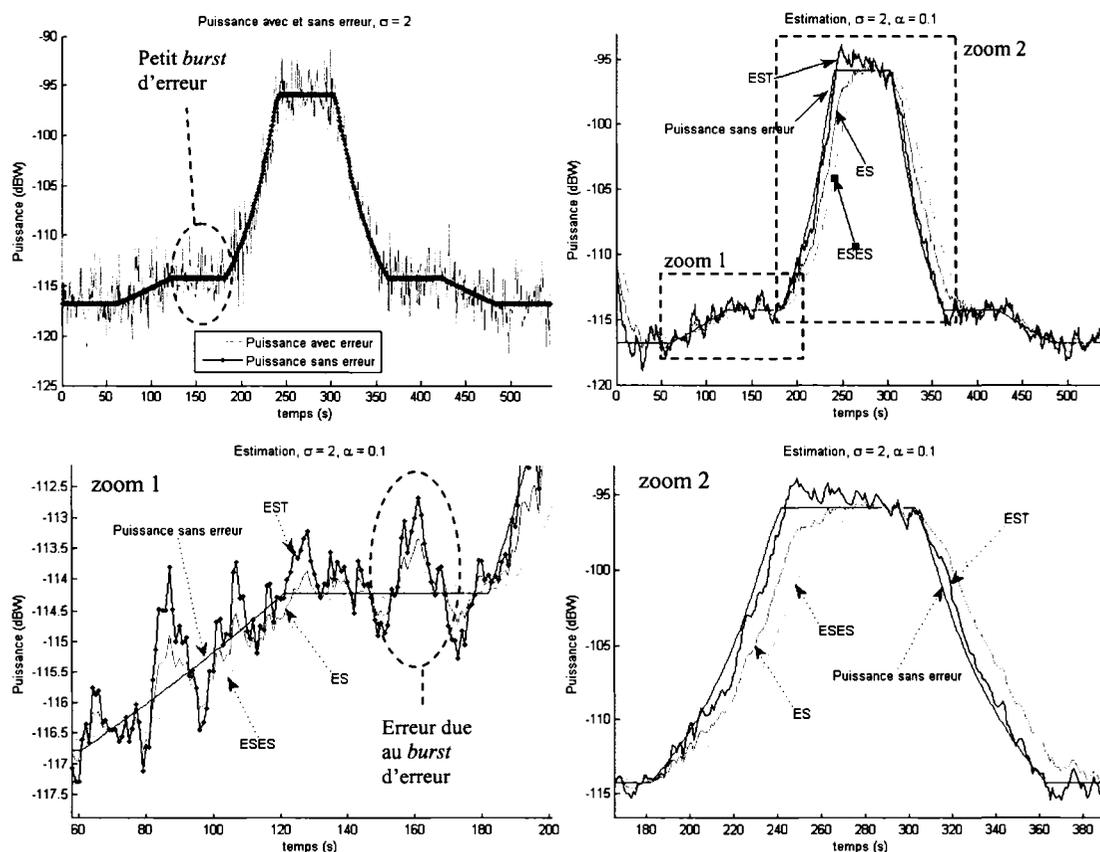


Figure 95 Estimation dans le cas d'un niveau d'erreur moyen ($\sigma = 2$) et le premier scénario de mouvement

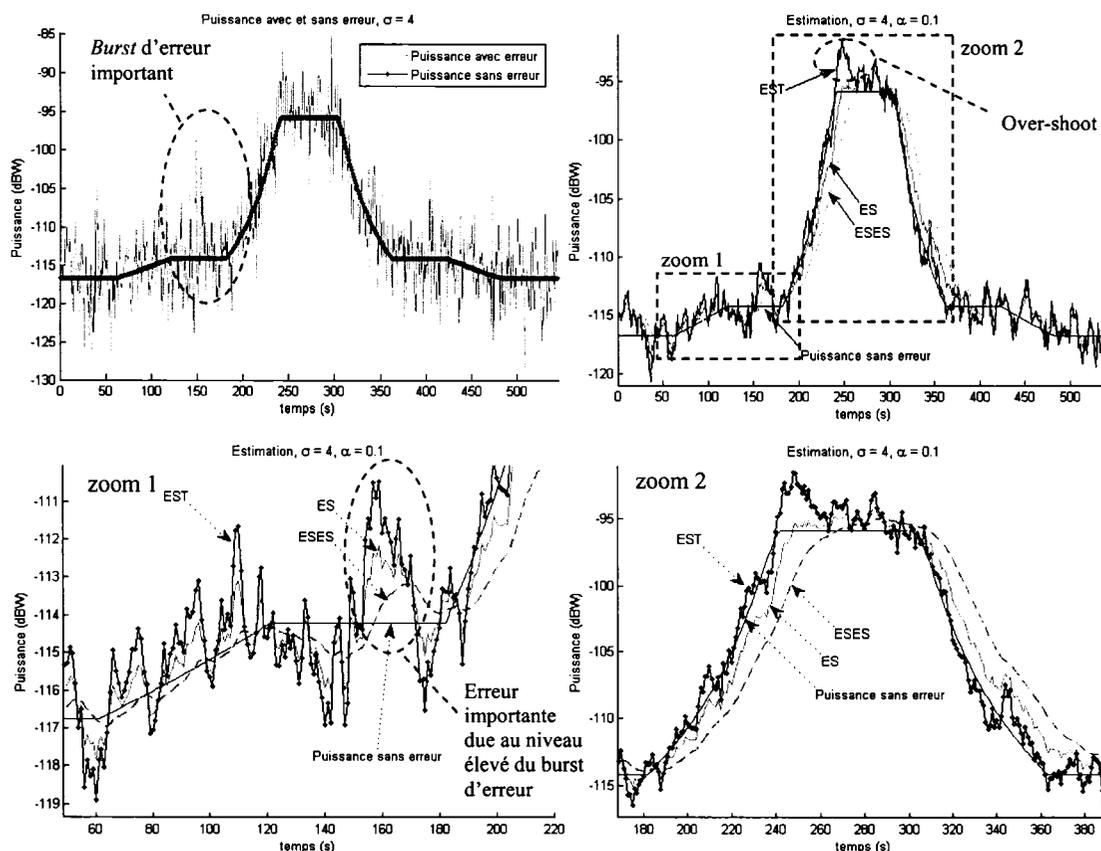


Figure 96 Estimation dans le cas d'un niveau d'erreur élevé ($\sigma = 4$) et le premier scénario de mouvement

Sur la figure 97, nous pouvons voir que dans le cas du deuxième scénario de mouvement et pour un niveau de bruit moyen ($\sigma = 2$), l'estimateur (courbe EST) est très précis surtout pour suivre les changements de pente de la puissance sans erreurs (variations aléatoires). De même, la pente de la courbe du double *exponential smoothing* (ESES) reflète assez fidèlement la pente de la courbe sans erreurs notamment lors des changements de pente importants. Nous pouvons également constater que les courbes EST et ESES s'adaptent rapidement après un *burst* d'erreur.

Sur la figure 96 et la figure 98, nous pouvons constater une grande différence de comportement lors de petits changements de pente. Pour le premier modèle de

mouvement, la courbe ESES suit globalement la courbe de puissance sans erreurs. En revanche, pour le deuxième modèle de mouvement, la courbe ESES est plus éloignée de la courbe théorique, ceci est surtout dû aux fréquents petit *bursts* d'erreurs que l'on peut voir sur la figure 98.

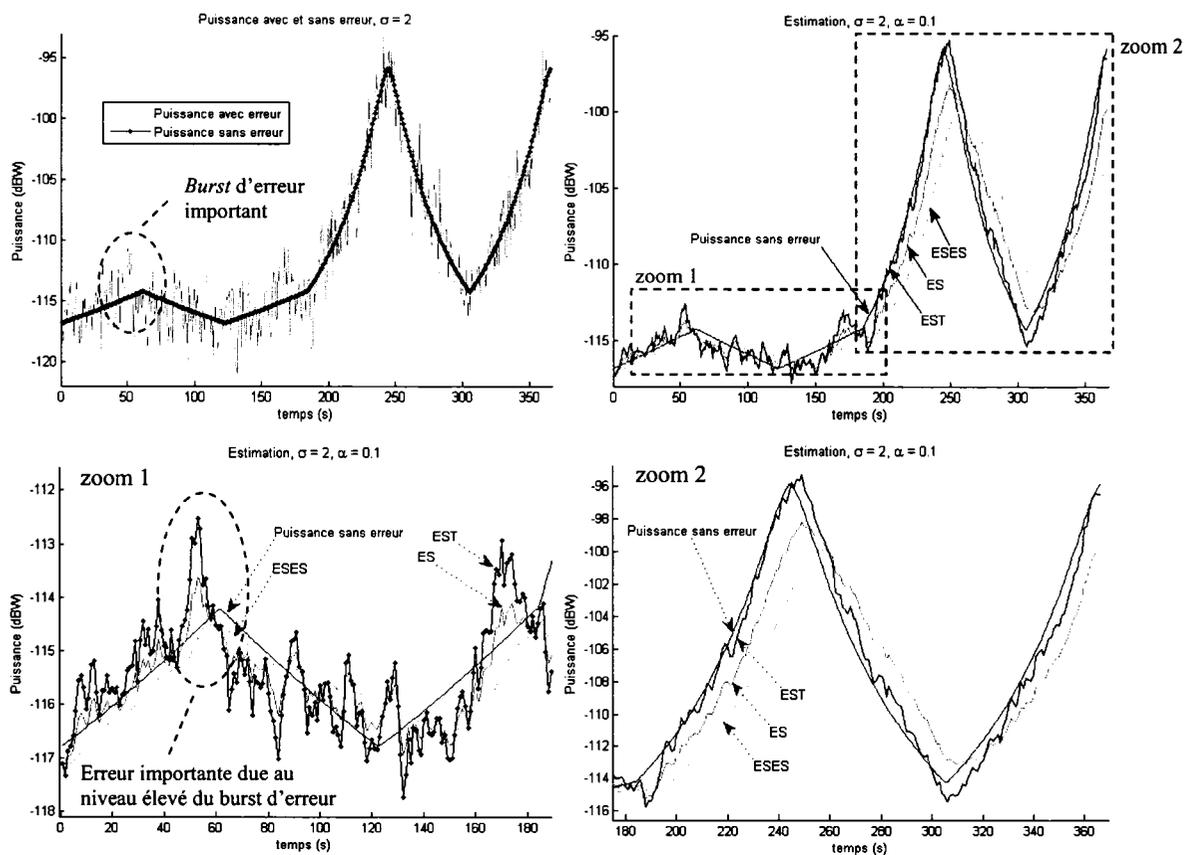


Figure 97 Estimation dans le cas d'un niveau d'erreur moyen ($\sigma = 2$) et le deuxième scénario de mouvement

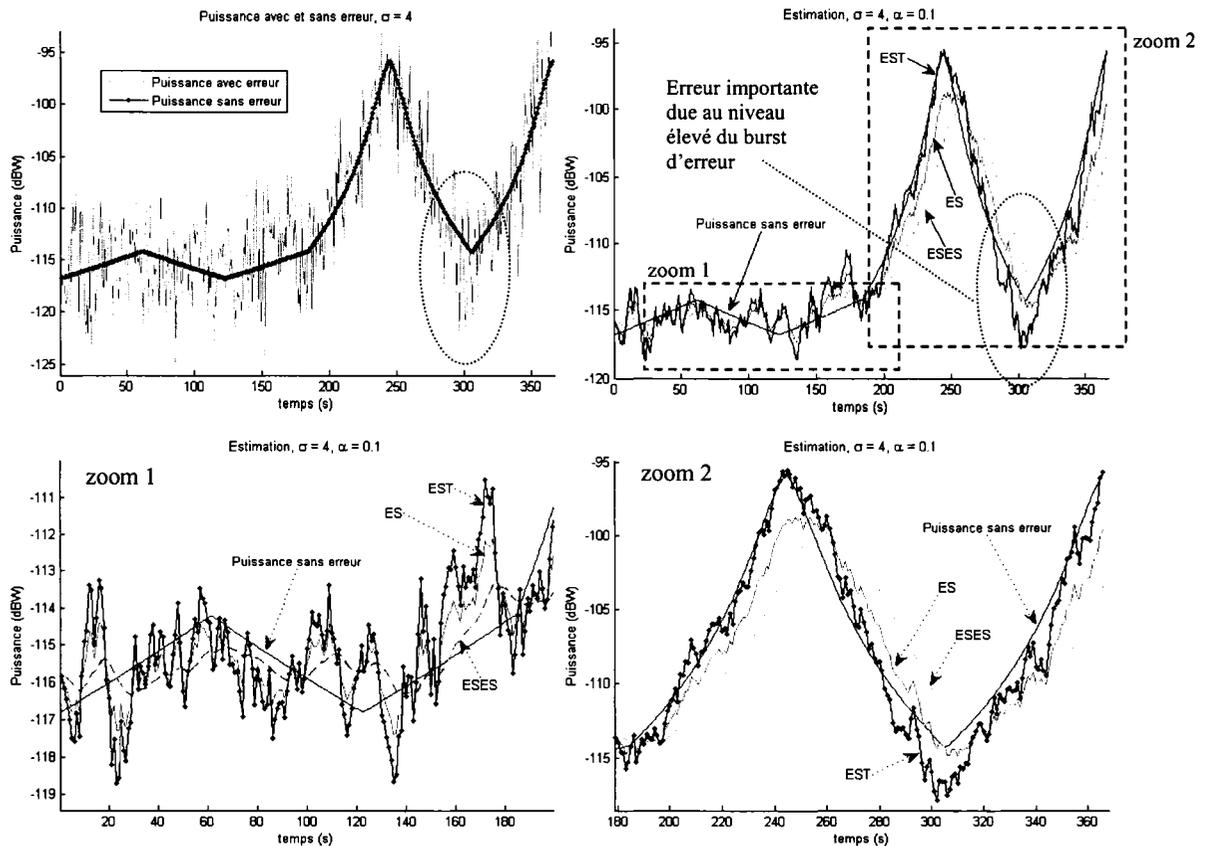


Figure 98 Estimation dans le cas d'un niveau d'erreur élevé ($\sigma = 4$) et le deuxième scénario de mouvement

5.3.3.2 Tests avec le troisième et le quatrième scénario de mouvement

Ces deux scénarios de tests ont pour but d'étudier le comportement de l'estimateur lors de changements continus du niveau de puissance correspondant à un déplacement du nœud émetteur par rapport au nœud récepteur.

Nous pouvons constater sur la figure 99 et la figure 100 que le comportement est très satisfaisant et répond bien à la présence de *burst* d'erreur. En revanche, dans le cas d'une courbe de puissance sans erreurs très plate, correspondante au quatrième scénario de

mouvement (figure 101 et figure 102), les *bursts* d'erreurs ont des conséquences plus importantes sur les courbes de EST et ESES.

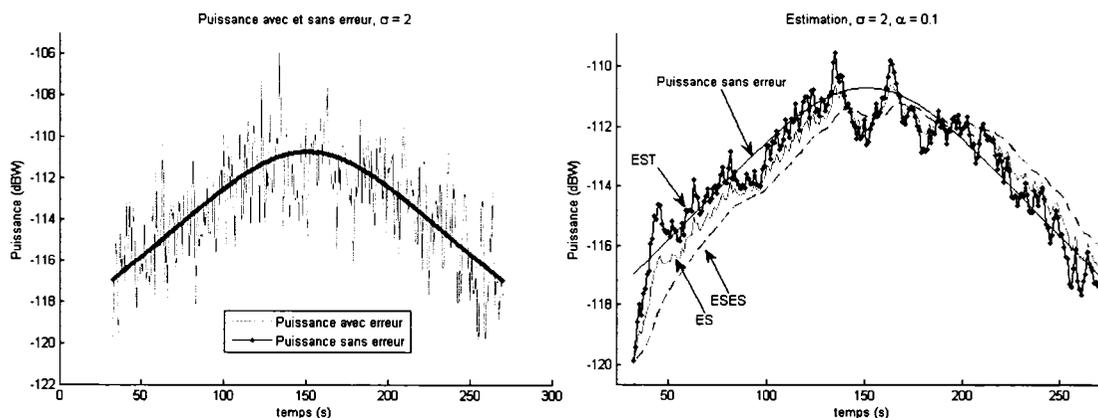


Figure 99 Estimation dans le cas d'un niveau d'erreur moyen ($\sigma = 2$) et le troisième scénario de mouvement

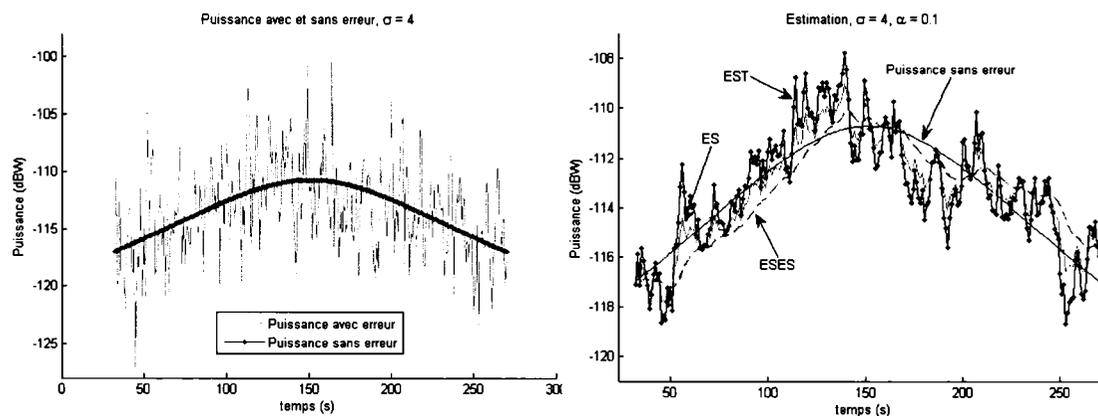


Figure 100 Estimation dans le cas d'un niveau d'erreur élevé ($\sigma = 4$) et le troisième scénario de mouvement

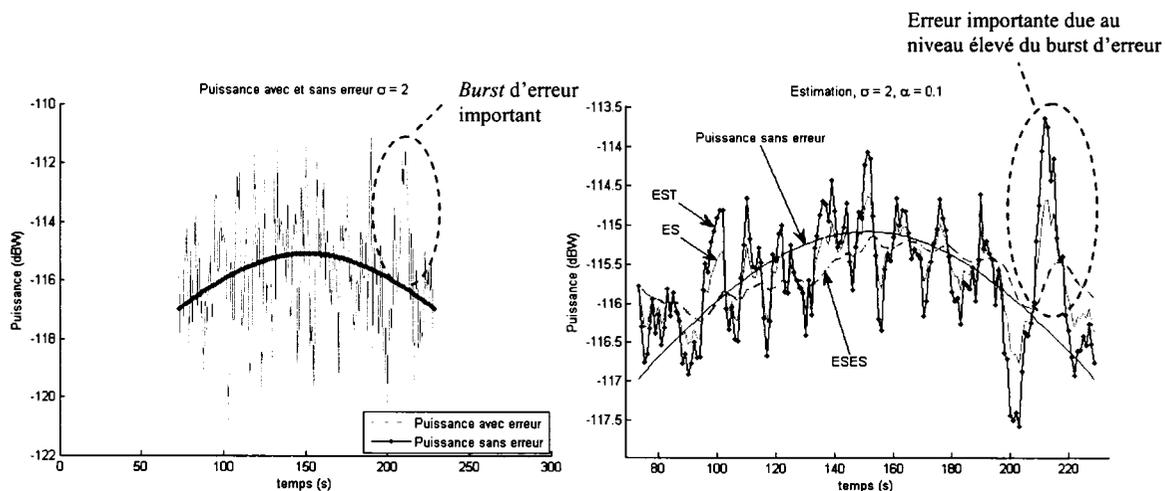


Figure 101 Estimation dans le cas d'un niveau d'erreur moyen ($\sigma = 2$) et le quatrième scénario de mouvement

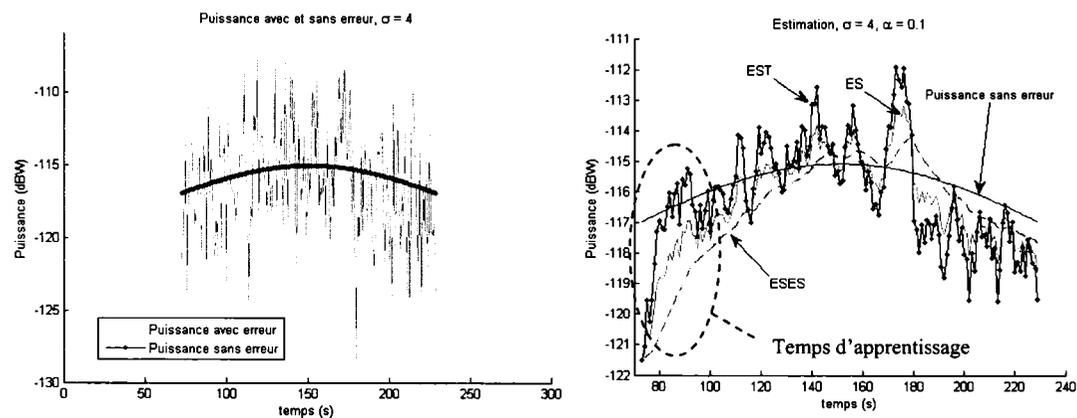


Figure 102 Estimation dans le cas d'un niveau d'erreur élevé ($\sigma = 4$) et le quatrième scénario de mouvement

5.3.4 Test du modèle de prédiction avec les scénarios de test

Nous avons choisi d'utiliser $\beta = 1$ dans l'équation (4.21). Notre choix a été un compromis entre la précision de la prédiction et sa réactivité. Une valeur de β inférieure à 1 aurait entraîné une trop faible réactivité dans le cas de changement de pente. Vu que nous voulons effectuer la prédiction à une courte échéance, nous avons privilégié la réactivité de la prédiction en cas de changement, ce qui correspond aux cas les plus problématiques, plutôt qu'à une prédiction plus précise dans le cas de peu de changement, mais ayant alors un retard important lors de changement dans le mouvement. De plus, lors du paramétrage de l'estimateur, nous avons constaté que le double *exponential smoothing* présente un comportement assez lisse.

Nous considérons pour cette première série de tests une échéance de prédiction de deux secondes et des variations (erreurs) de la puissance correspondantes aux cas $\sigma = 2$ et $\sigma = 4$.

Les scénarios et courbes de puissance avec et sans variations aléatoires (erreurs) utilisés dans cette section sont les mêmes que ceux utilisés lors du test du modèle d'estimation.

Sur les figures : figure 103 à figure 110, « EST » représente l'estimateur, « PRD » la prédiction à deux secondes, « Err. EST » est l'erreur de l'estimateur (estimation moins puissance sans variations), « Err. PRD » est l'erreur de prédiction (prédiction moins puissance sans variations) et XdB l'erreur (variations) ajoutée à la puissance sans variations.

De plus dans les tableau : Tableau VIII à Tableau XI, les erreurs quadratiques moyennes correspondent à la moyenne quadratique de XdB, « Err. EST » et « Err. PRD ».

5.3.4.1 Tests avec le premier et le second scénario de mouvement

Nous pouvons constater sur la figure 103 à la figure 106 que l'erreur de prédiction est presque identique à l'erreur d'estimation sauf dans le cas de changement de pente, où l'erreur de prédiction est légèrement supérieure, ce qui ne peut être évité puisque aléatoire. Après une période d'adaptation due au changement de pente, la prédiction se fait avec la même précision que l'estimation, nous pouvons donc en déduire que la prédiction suit bien la pente de la courbe de puissance sans erreur²² et peut ainsi anticiper sa valeur future. La précision diminue avec l'augmentation de l'erreur sur la valeur de la puissance de réception mais reste toutefois précise lors de variations importantes dues aux changements de pentes.

Enfin sur le Tableau VIII et le Tableau IX, représentant les erreurs quadratiques des deux scénarios de mouvement pour $\sigma = 2$ et $\sigma = 4$, nous pouvons constater que les valeurs correspondantes à l'estimation et à la prédiction sont très proches et très en dessous de la valeur respective pour XdB. Ceci confirme la qualité du lissage (à travers l'estimation) ainsi que la qualité de la prédiction.

²² Rappelons que nous utilisons les termes « variations » ou « erreurs » pour désigner les écarts entre la courbe théorique de la puissance à variations uniquement lentes (cas $\sigma = 0$) et celle ayant des variations aléatoires rapides (cas $\sigma \neq 0$).

Tableau VIII

Tableau comparatif des erreurs quadratiques moyennes pour le premier scénario de mouvement

Sigma	Moyenne Quadratique		
	XdB	Err. EST	Err. PRD
2	4.27	0.81	1.22
4	17.79	2.06	2.56

Tableau IX

Tableau comparatif des erreurs quadratiques moyennes pour le deuxième scénario de mouvement

Sigma	Moyenne Quadratique		
	XdB	Err. EST	Err. PRD
2	4.34	0.85	1.42
4	15.87	2.41	3.2

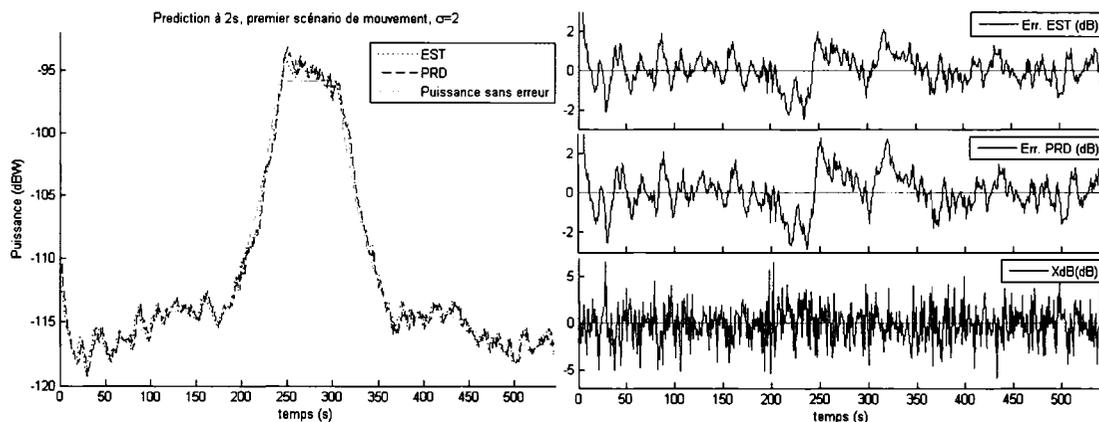


Figure 103 Prédiction dans le cas d'un niveau d'erreur moyen ($\sigma = 2$) et le premier scénario de mouvement

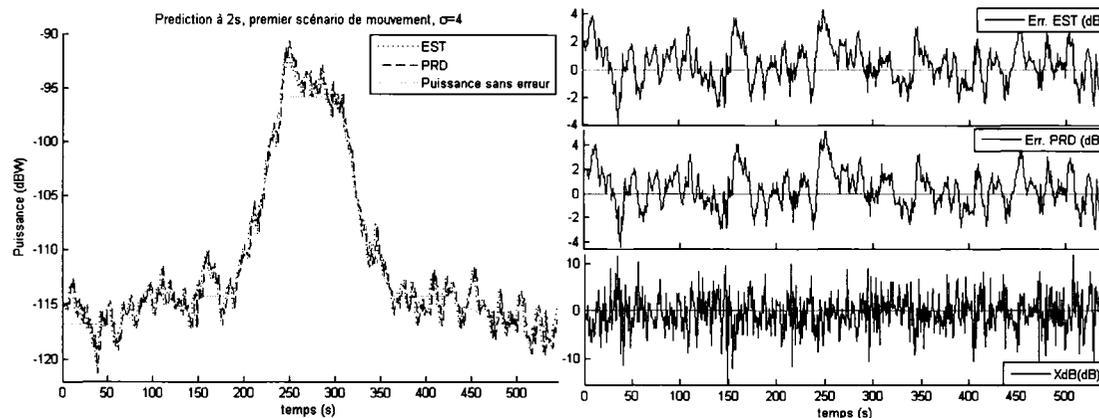


Figure 104 Prédiction dans le cas d'un niveau d'erreur élevé ($\sigma = 4$) et le premier scénario de mouvement

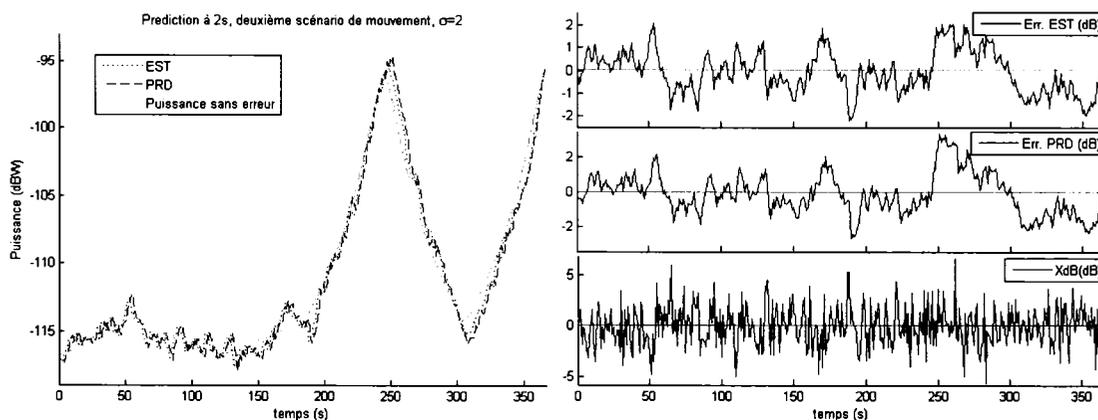


Figure 105 Prédiction dans le cas d'un niveau d'erreur ($\sigma = 2$) moyen et le deuxième scénario de mouvement

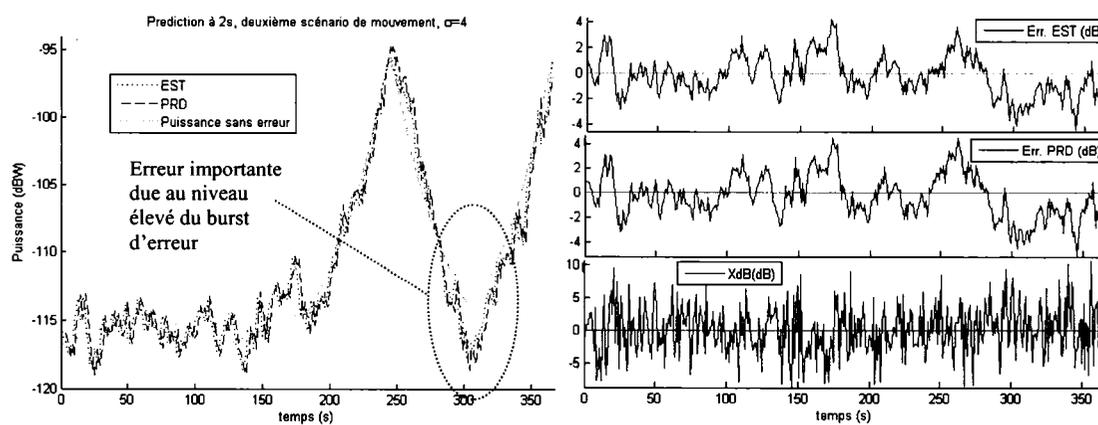


Figure 106 Prédiction dans le cas d'un niveau d'erreur élevé ($\sigma = 4$) et le deuxième scénario de mouvement

5.3.4.2 Tests avec le troisième et le quatrième scénario de mouvement

Nous pouvons remarquer sur la figure 107 à la figure 110 que la courbe de prédiction est presque une image décalée de la courbe d'estimation. En effet, dans le cas où la courbe de puissance sans erreur (variations) est aplatie (de faible pente), et du fait que la prédiction soit à court terme, l'apport du ESES sera un décalage de la courbe EST dans

la direction de variation. Du fait de la faible pente, la direction de variation est plus horizontale que verticale. Autrement, nous pouvons constater que l'erreur de prédiction est légèrement supérieure à l'erreur d'estimation. Dans le troisième scénario, la courbe de prédiction suit correctement la pente de la courbe de puissance sans erreurs (variations aléatoires) et anticipe donc sa valeur future. Dans le quatrième scénario, du fait de la faible variation du niveau de puissance (quelques dB), la précision de l'estimation et la prédiction sont moins bonnes, nous pouvons toutefois remarquer, que même dans ces conditions, la prédiction suit approximativement la courbe de puissance sans erreur.

Enfin sur le Tableau X et le Tableau XI, représentant les erreurs quadratiques des deux scénarios de mouvement pour $\sigma = 2$ et $\sigma = 4$, nous pouvons constater que les valeurs correspondantes à l'estimation et à la prédiction sont très proches et très en dessous de la valeur respective pour XdB. Ceci confirme la qualité du lissage (à travers l'estimation) ainsi que de la qualité de la prédiction.

Tableau X

Tableau comparatif des erreurs quadratiques moyennes pour le troisième scénario de mouvement

Sigma	Moyenne Quadratique		
	XdB	Err. EST	Err. PRD
2	3.9	0.52	0.68
4	16.2	1.8	2.1

Tableau XI

Tableau comparatif des erreurs quadratiques moyennes pour le quatrième scénario de mouvement

Sigma	Moyenne Quadratique		
	XdB	Err. EST	Err. PRD
2	4.04	0.53	0.64
4	17.49	2.26	2.77

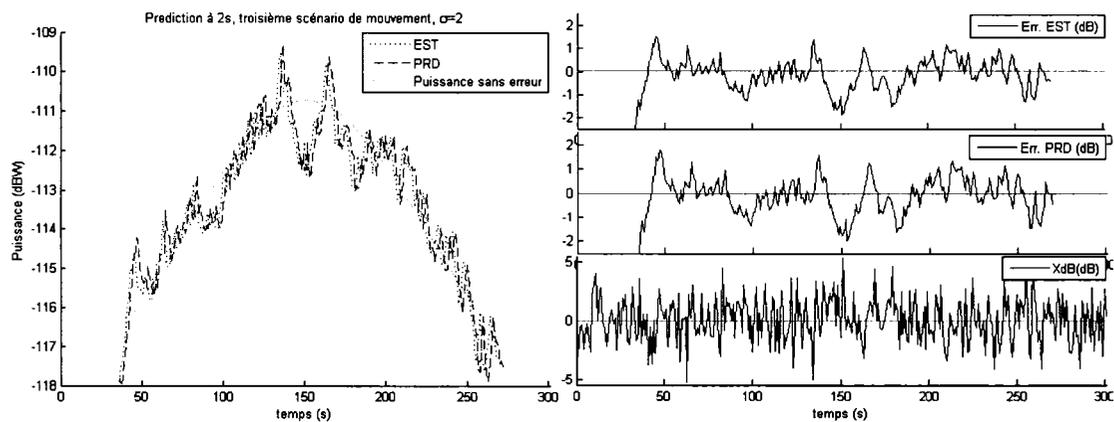


Figure 107 Prédiction dans le cas d'un niveau d'erreur moyen ($\sigma = 2$) et le troisième scénario de mouvement

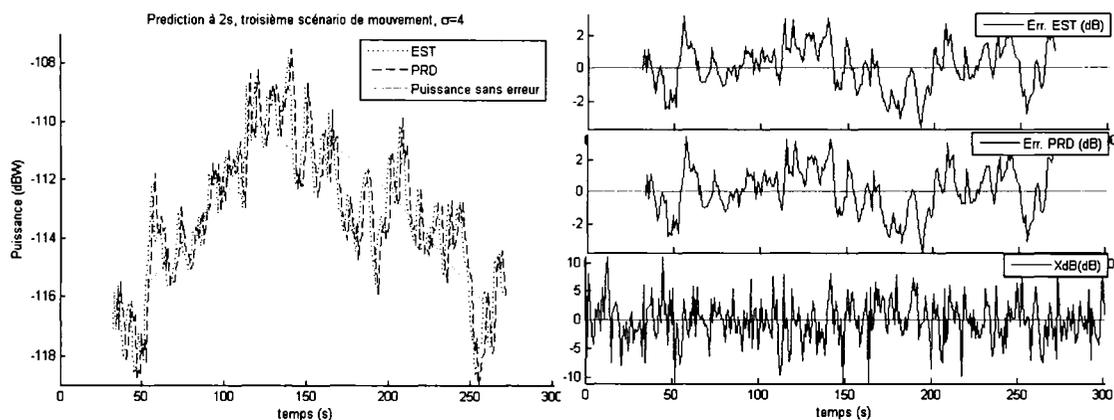


Figure 108 Prédiction dans le cas d'un niveau d'erreur élevé ($\sigma = 4$) et le troisième scénario de mouvement

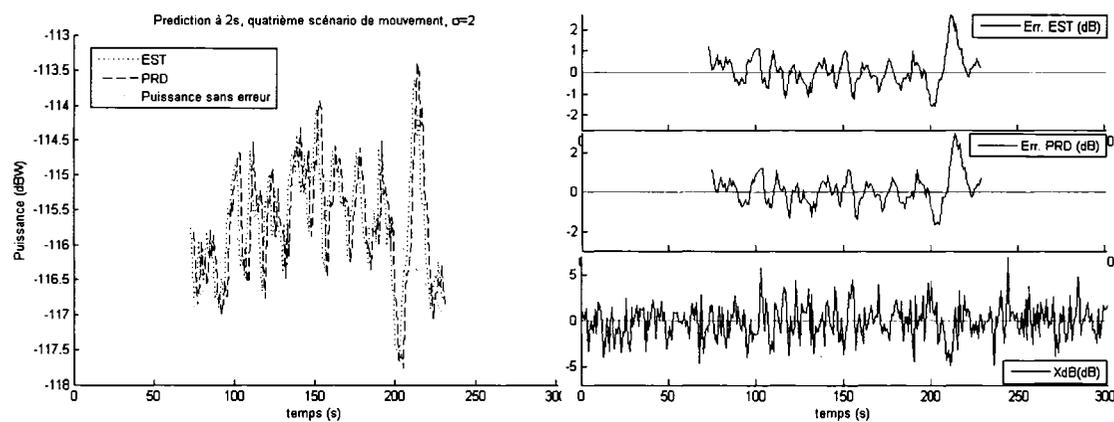


Figure 109 Prédiction dans le cas d'un niveau d'erreur moyen ($\sigma = 2$) et le quatrième scénario de mouvement

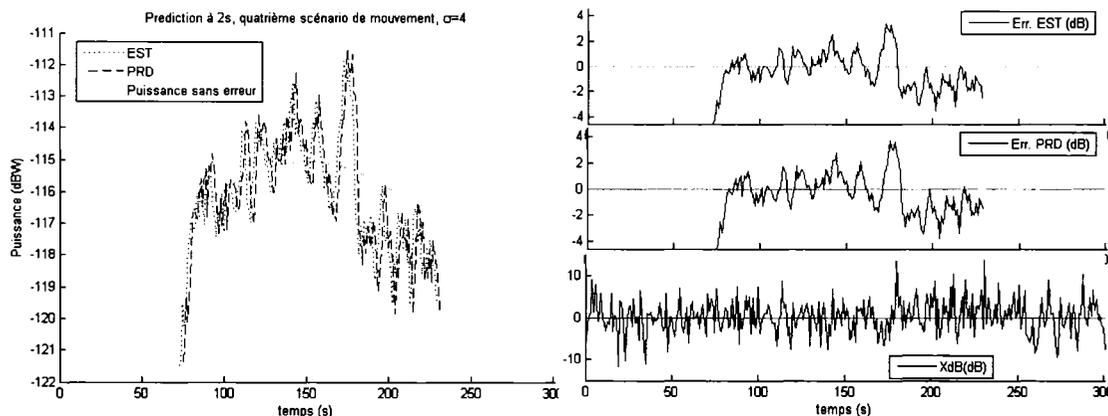


Figure 110 Prédiction dans le cas d'un niveau d'erreur élevé ($\sigma = 4$) et le quatrième scénario de mouvement

5.3.5 Test du modèle de prédiction avec les modèles de mouvements

Par clarté, nous avons choisi d'illustrer les résultats obtenus à travers deux cas de mouvement. Ces deux cas sont particulièrement intéressants car ils illustrent clairement l'efficacité de nos outils d'estimation et de prédiction ainsi que leurs limites. Dans chaque cas, deux nœuds sont en mouvement durant 30 minutes et les données de positions sont récoltées toute les secondes. Dans le premier cas, le modèle de mouvement TDPD est utilisé (détaillé dans la section 4.3.3), tandis que dans le second cas le mouvement TDMD est utilisé (détaillé dans la section 4.3.4). Les paramètres utilisés sont ceux du Tableau VI et du Tableau VII. Les deux mouvements ainsi que les puissances de réception sans erreurs correspondantes sont illustrés sur la figure 111 et la figure 113. La figure 112 et la figure 114 illustrent les courbes correspondantes de puissance avec erreur pour $\sigma = 2$ et $\sigma = 4$.

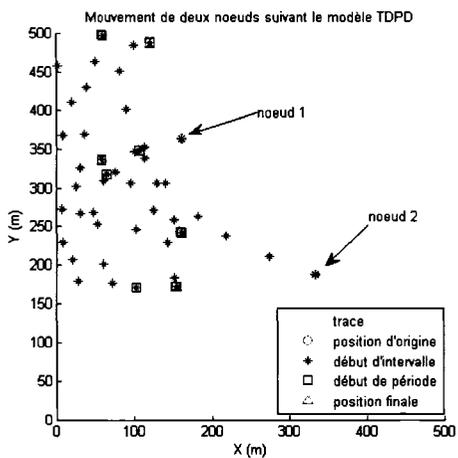
Nous pouvons constater sur la figure 111 que dans le premier cas de mouvement, la puissance de réception varie par palier, avec des variations (pentes) d'importances différentes. À la fin du mouvement, la puissance subit une très forte pente (20dB/20s) puis un inversement de pente et une descente tout aussi rapide.

Dans le deuxième cas de mouvement, illustré sur la figure 113, la puissance passe d'abord par une forte pente (35dB/100s), moins soutenue que dans le premier cas de mouvement, puis un inversement de pente et une descente légèrement plus rapide. Après une période de non connexion, il y a une augmentation et une diminution continue de la puissance.

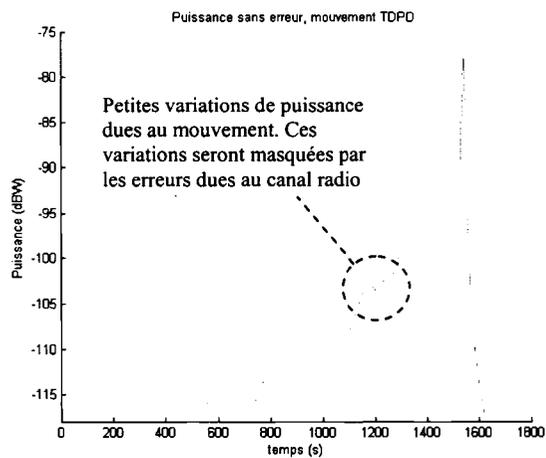
Il est à noter que le nombre de variations et leurs importances dépendent des paramètres utilisés dans les modèles de mouvement. De plus, comme déjà précisé, nous considérons deux échéances de prédiction : 2s et 10s. Dans l'équation (4.21), τ prend donc les valeurs 2 et 10.

Rappelons que sur les figures : figure 115 à figure 122, « EST » représente l'estimateur, « PRD » la prédiction, « Err. EST » est l'erreur de l'estimateur (estimation moins puissance sans variations), « Err. PRD » est l'erreur de prédiction (prédiction moins puissance sans variations) et XdB l'erreur ajoutée à la puissance sans variations.

De plus, dans le Tableau XII et le Tableau XIII, les erreurs quadratiques moyennes correspondent à la moyenne quadratique de XdB, « Err. EST » et « Err. PRD ».

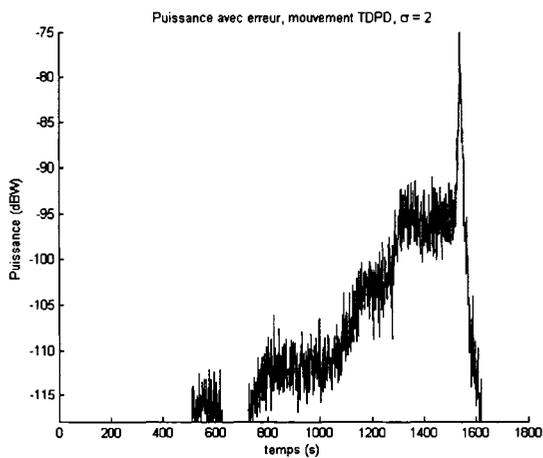


mouvement

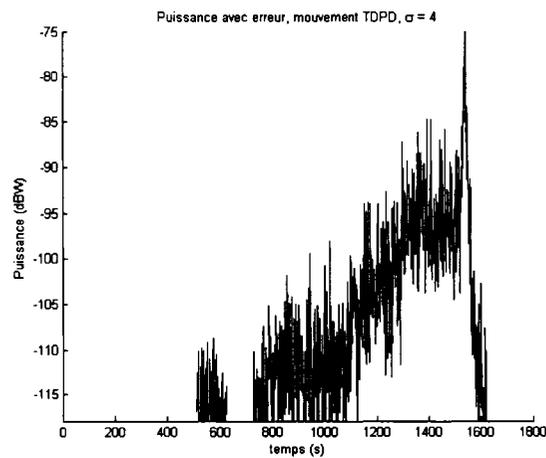


Puissance sans erreur

Figure 111 Premier cas de mouvement



Puissance avec erreur, cas $\sigma = 2$



Puissance avec erreur, cas $\sigma = 4$

Figure 112 Puissance avec erreur dans le premier cas de mouvement

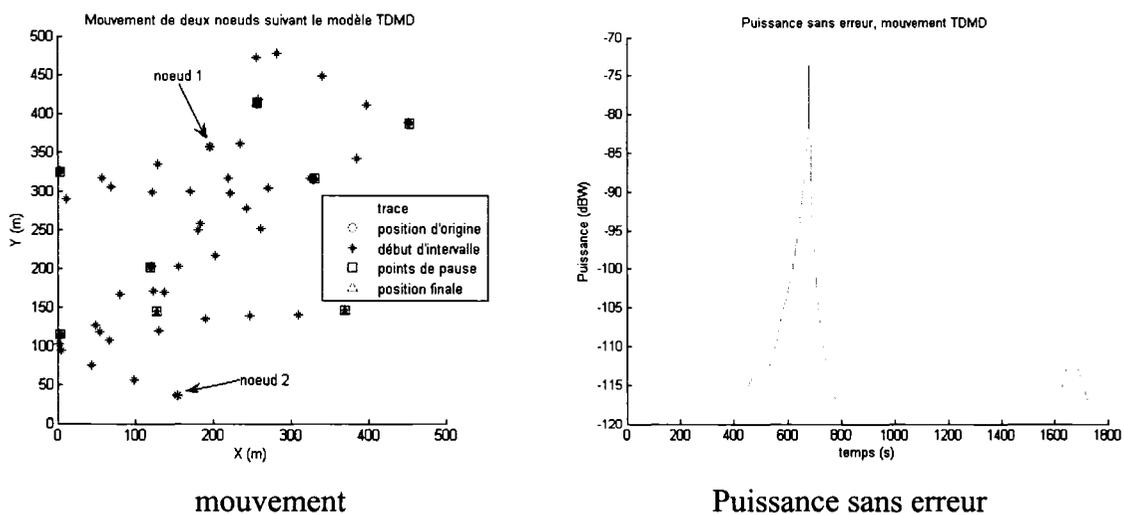


Figure 113 Deuxième cas de mouvement

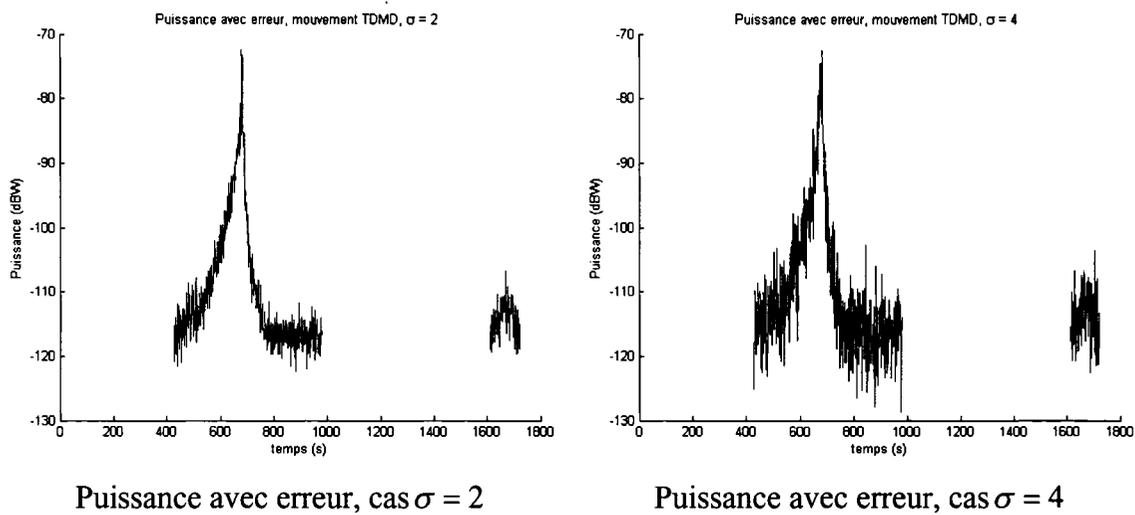


Figure 114 Puissance avec erreur dans le deuxième cas de mouvement

5.3.5.1 Prédiction à 2s

Les résultats obtenus avec ces simulations sont très semblables aux résultats obtenus avec les quatre scénarios utilisés précédemment. L'erreur de prédiction est très proche de l'erreur d'estimation. Comme on peut le voir sur la figure 115 à la figure 118, cette erreur est stable et ne varie qu'au moment d'un changement important de mouvement.

Nous pouvons constater sur la figure 115 et la figure 116 que la prédiction est de bonne qualité et anticipe bien les changements consécutifs de pente. Dans le cas de changements très importants, il y a un net décalage entre la prédiction et la réalité, ceci provient du fait que la courbe du double *exponential smoothing* (ESES), réagit lentement aux changements de pente, ce qui induit une erreur sur l'estimation et une autre sur la prédiction. D'une part ESES est utilisé lors de l'estimation, ce qui explique le décalage entre l'estimation et la réalité, d'autre part, ESES fournit la pente à partir de laquelle la prédiction est effectuée. Une faible réactivité de ESES entraîne inévitablement un retard dans la prédiction. Cette erreur de prédiction est par la suite rattrapée lorsque la pente de ESES converge vers la pente de la courbe de puissance sans erreurs²³.

Dans le cas de fortes valeurs de pentes associée à un changement de signe de celles-ci, le retard est encore plus important et le rattrapage plus tardif.

Lorsque l'erreur augmente, la précision de la prédiction diminue, ce qui provient de l'erreur d'estimation. Le comportement dans le cas de grandes variations reste cependant le même.

De plus, sur le Tableau XII et le Tableau XIII, représentant les erreurs quadratiques des deux scénarios de mouvement pour $\sigma = 2$ et $\sigma = 4$, nous pouvons constater que les

²³ Rappelons que nous utilisons les termes « variations » ou « erreurs » pour désigner les écarts entre la courbe théorique de la puissance à variations uniquement lentes (cas $\sigma = 0$) et celle ayant des variations aléatoires rapides (cas $\sigma \neq 0$).

valeurs correspondantes à l'estimation et à la prédiction sont très proches et très en dessous de la valeur respective pour XdB. Ceci confirme la qualité du lissage (à travers l'estimation) ainsi que de la qualité de la prédiction.

Tableau XII

Tableau comparatif des erreurs quadratiques moyennes pour le premier cas de mouvement

Sigma	Moyenne Quadratique		
	XdB	Err. EST	Err. PRD
2	4.09	1.13	1.91
4	17.31	2.71	3.83

Tableau XIII

Tableau comparatif des erreurs quadratiques moyennes pour le deuxième cas de mouvement

Sigma	Moyenne Quadratique		
	XdB	Err. EST	Err. PRD
2	3.77	1.36	2.55
4	15.98	2.56	3.92

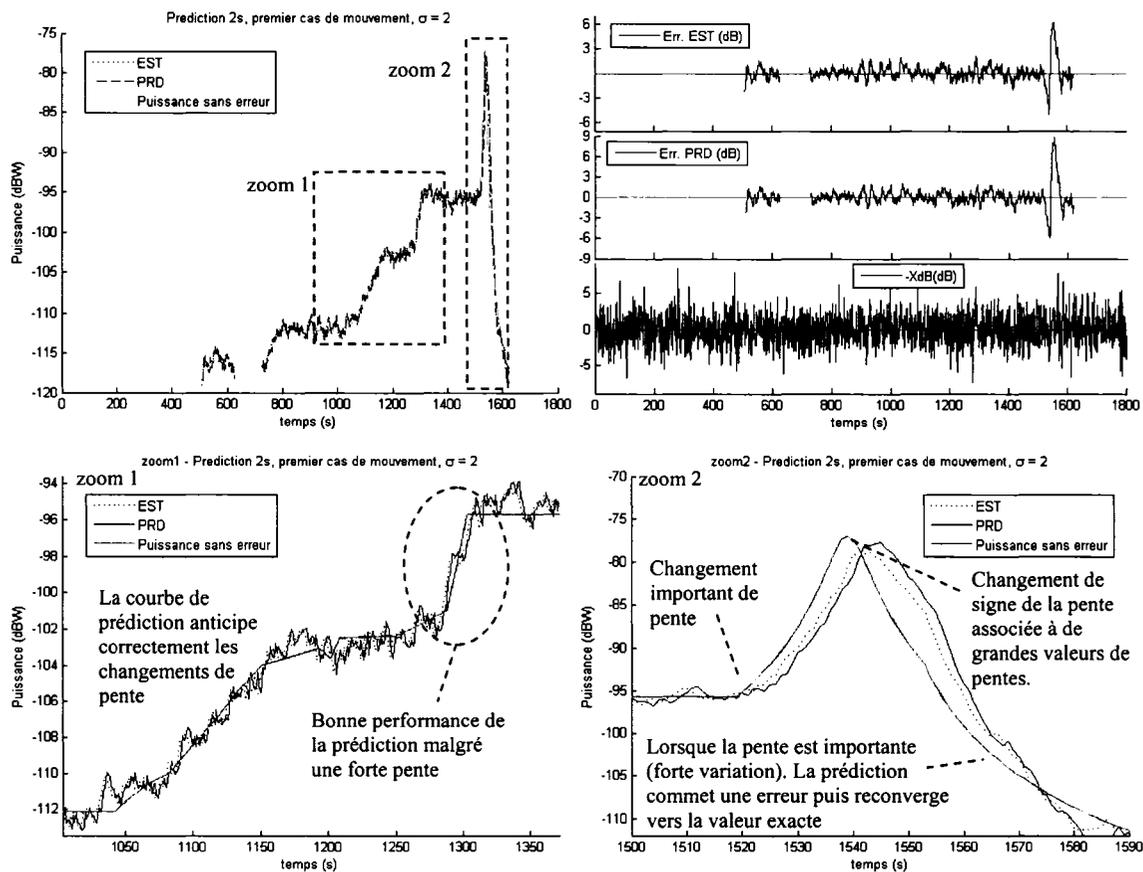


Figure 115 Premier cas de mouvement, prédiction à 2s avec un niveau d'erreur moyen ($\sigma = 2$)

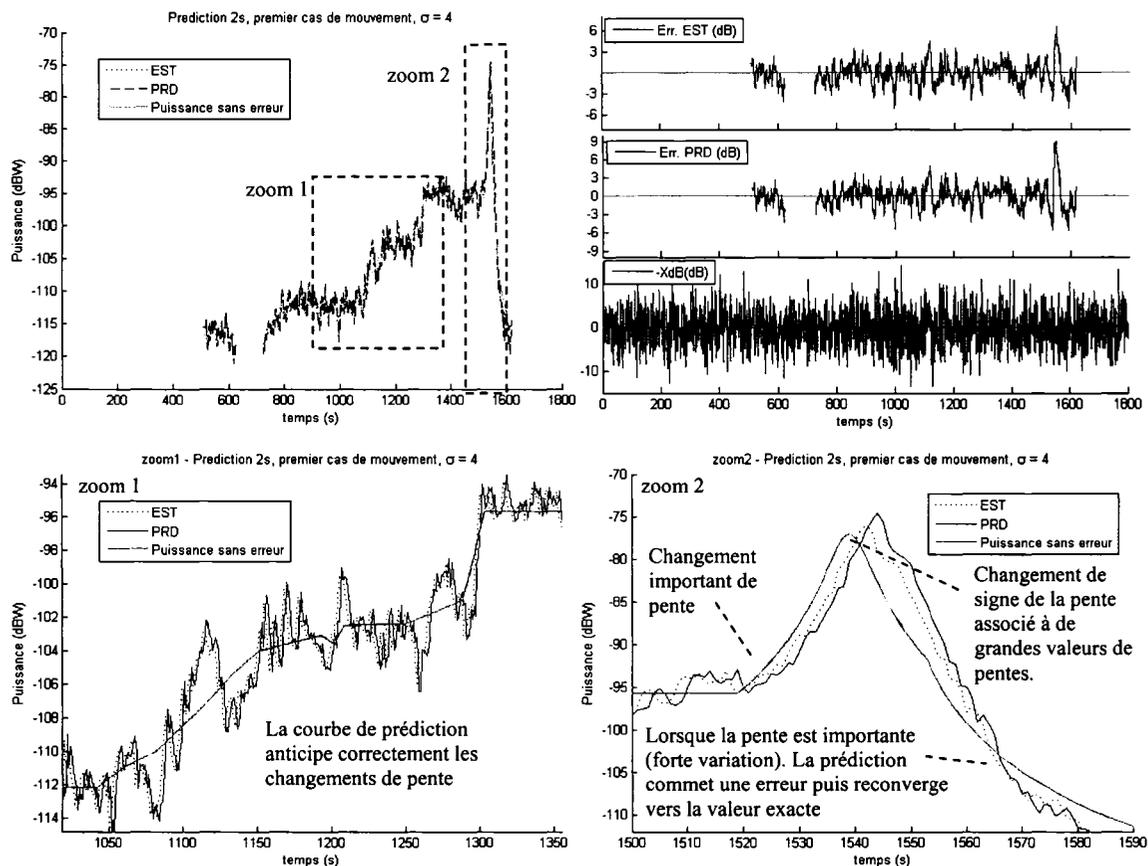


Figure 116 Premier cas de mouvement, prédiction à 2s avec un niveau d'erreur important ($\sigma = 4$)

Nous pouvons constater sur la figure 117 et la figure 118 que lors d'une variation lente de la pente, même si celle-ci est importante, la prédiction est de bonne qualité et est aussi précise que l'estimation. Dans le cas de l'inversement de pente, il y a un net décalage entre la prédiction et la réalité qui provient de la lente réaction du double *exponential smoothing* (ESES), comme nous l'avons expliqué dans la section précédente. Cette erreur de prédiction est par la suite rattrapée lorsque la pente de ESES converge vers la pente de la courbe de puissance sans erreur.

Sur le zoom 2 de ces figures, nous pouvons constater que la prédiction suit bien le changement de pente. Lorsque la pente est positive, le courbe de prédiction (PRD) correspond bien à un décalage de la courbe d'estimation (EST) vers le haut et vers la droite. Lorsque la pente est nulle, la courbe PRD correspond à un décalage de la courbe EST vers la droite. Lorsque la pente est négative, la courbe PRD correspond bien à un décalage de la courbe EST vers le BAS et vers la droite. Cette bonne performance provient du fait que la courbe ESES suit bien le changement graduel de pente de la courbe de puissance sans erreur.

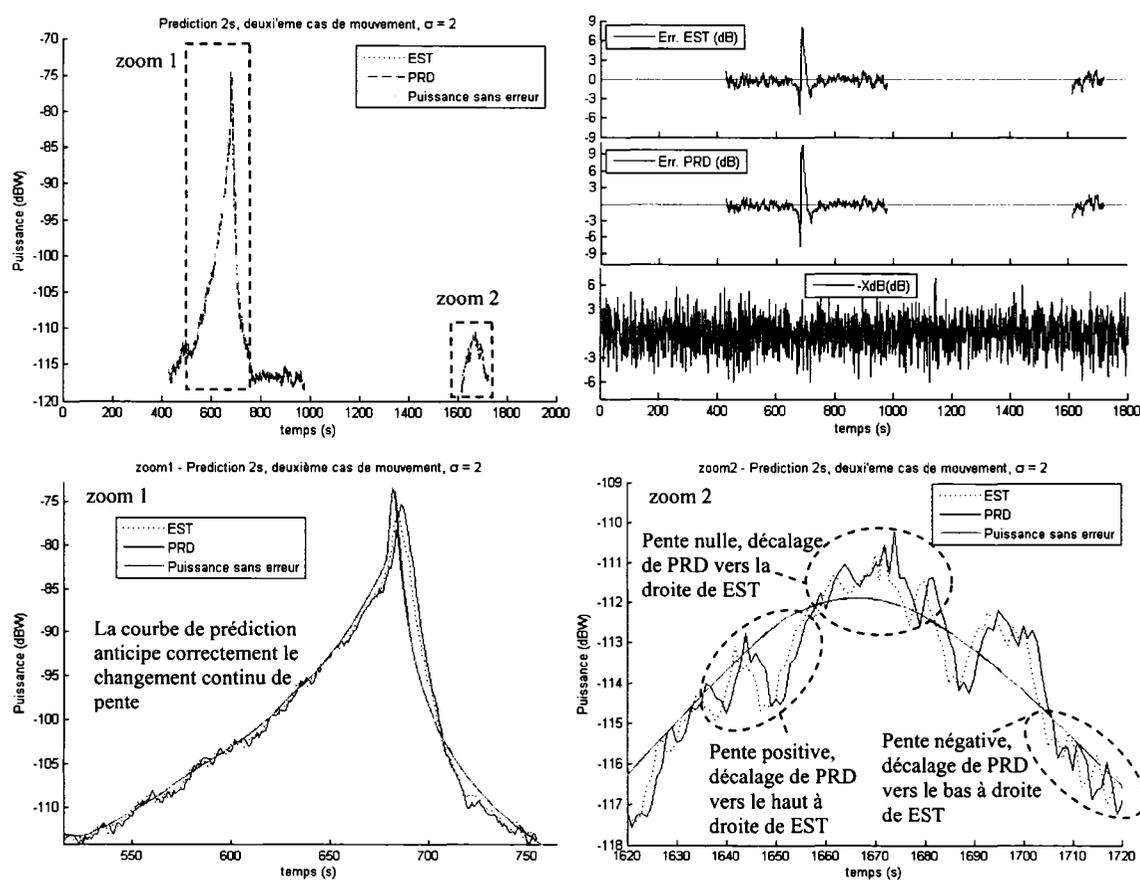


Figure 117 Deuixième cas de mouvement, prédiction à 2s avec un niveau d'erreur moyen ($\sigma = 2$)

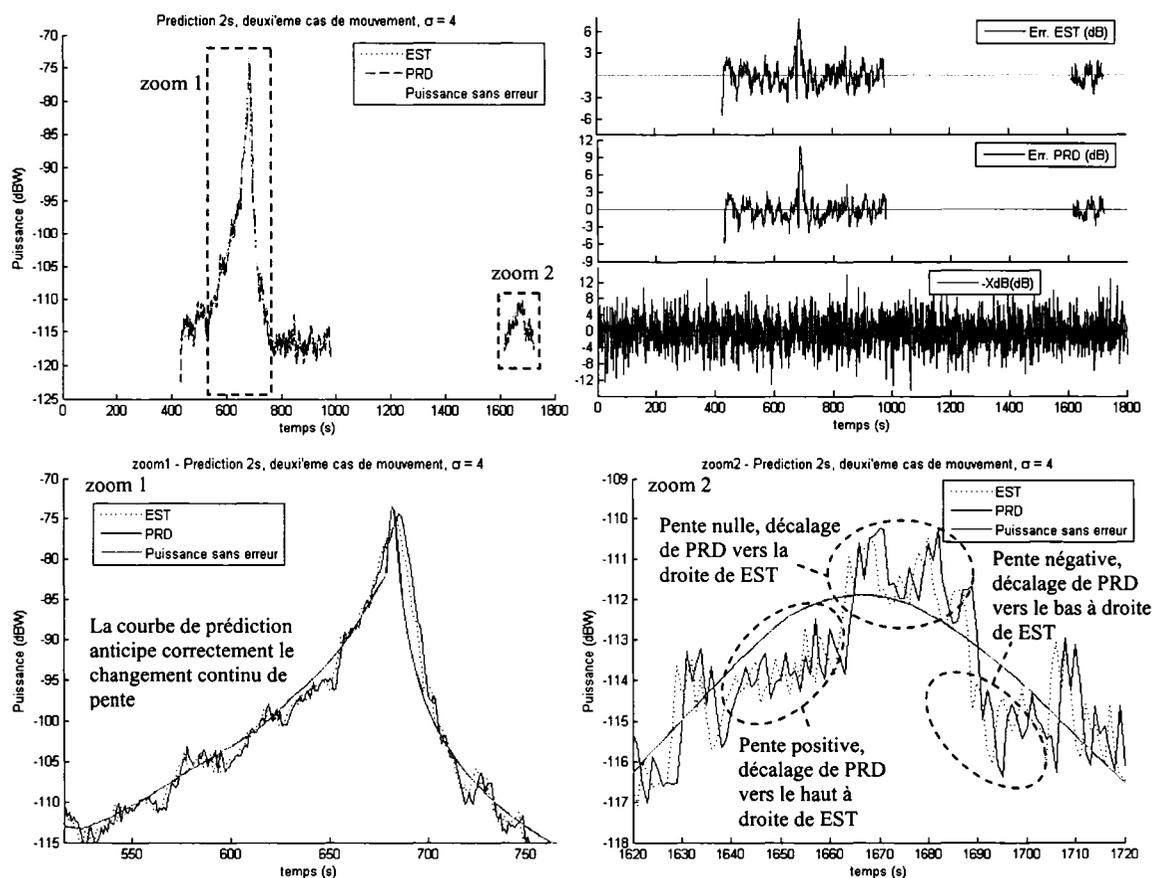


Figure 118 Deuxième cas de mouvement, prédiction à 2s avec un niveau d'erreur important ($\sigma = 4$)

5.3.5.2 Prédiction à 10s

Les courbes de la figure 119 à la figure 122, correspondent aux mêmes cas d'étude que la section 5.3.5.1 mais pour des prédictions à 10s. Dans la prédiction à 10s, nous tenons principalement à montrer les limites de notre modèle de prédiction.

En comparant deux à deux les figures correspondantes aux cas 2s et 10s (figure 115 avec figure 119, figure 116 à la figure 120, etc.) nous pouvons voir que la prédiction à 2s est nettement plus précise que la prédiction à 10s. En effet, la différence entre l'erreur de

prédiction (Err. PRD) et l'erreur d'estimation (Err. EST) dans le cas de 10s est plus importante que dans le cas d'une prédiction à 2s. Ceci est inévitable du fait que la courbe de double *exponential smoothing* ESES ne reflète pas totalement la pente de la courbe de puissance sans erreur. La différence entre les deux pentes aura un effet d'autant plus important que l'horizon de prédiction est important.

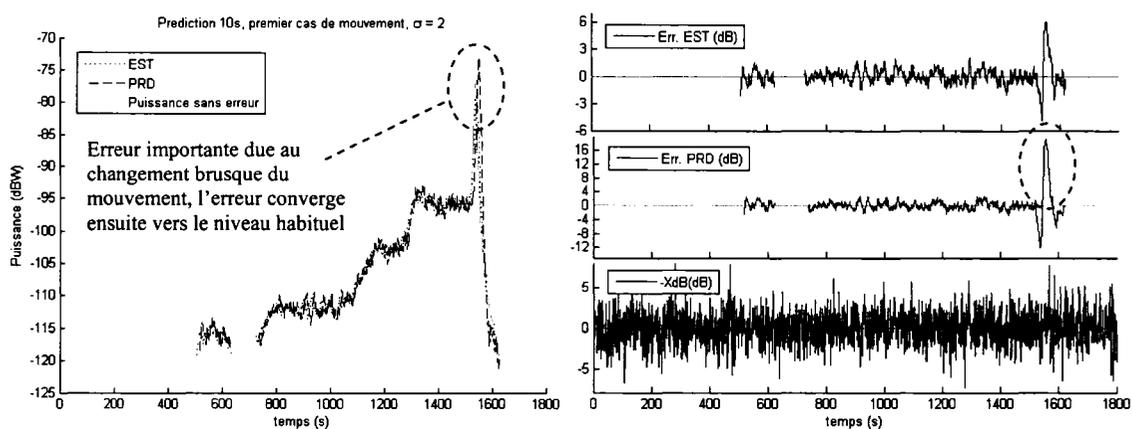


Figure 119 Premier cas de mouvement, prédiction 10s, niveau d'erreur moyen ($\sigma = 2$)

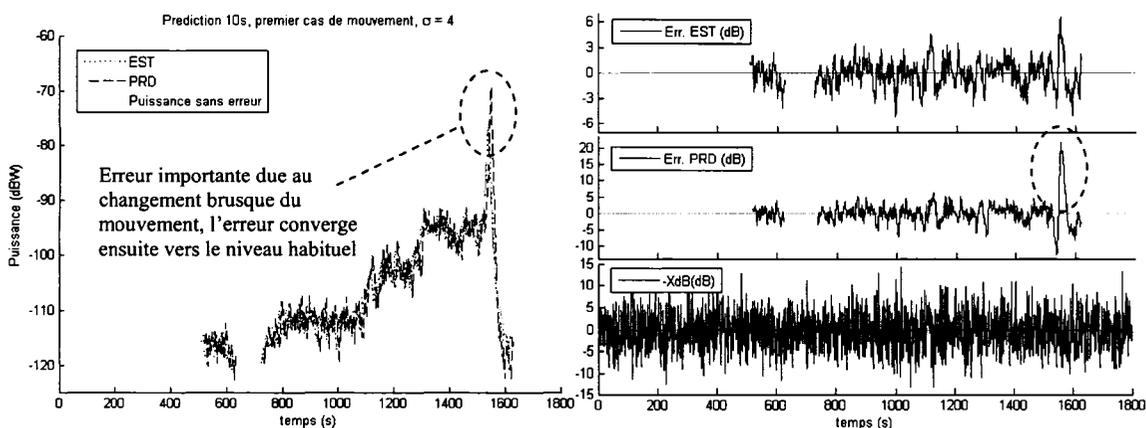


Figure 120 Premier cas de mouvement, prédiction 10s, niveau d'erreur important ($\sigma = 4$)

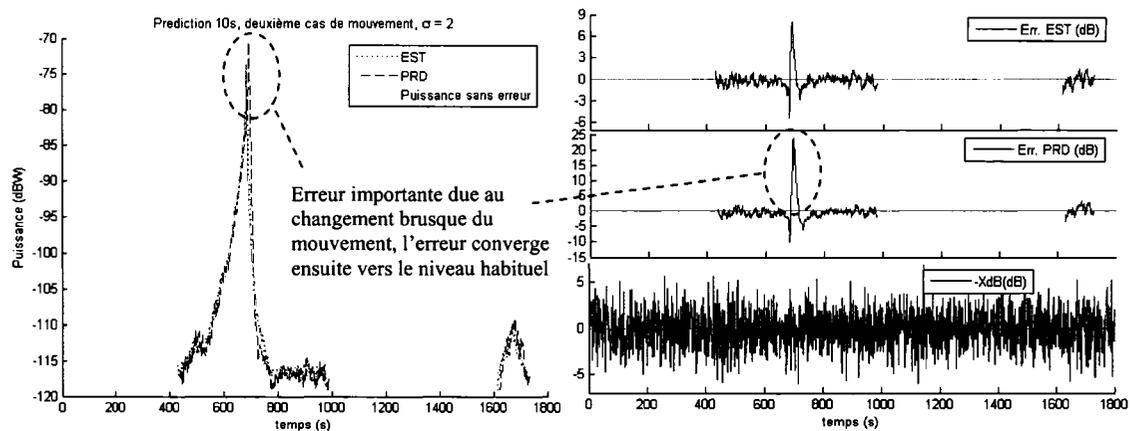


Figure 121 Deuxième cas de mouvement, prédiction 10s, niveau d'erreur moyen ($\sigma = 2$)

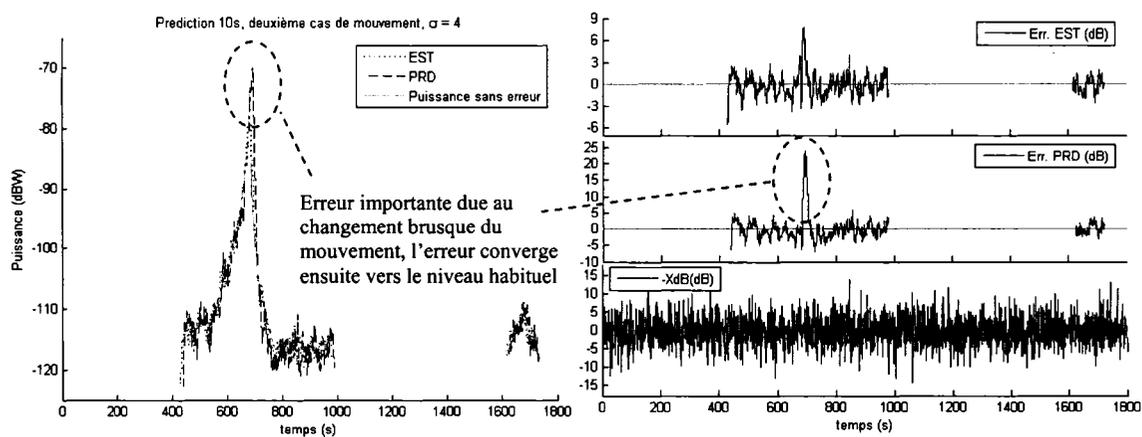


Figure 122 Deuxième cas de mouvement, prédiction 10s, niveau d'erreur important ($\sigma = 4$)

5.4 Synthèse et conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les approches de prédiction existantes. Ces approches présentent des inconvénients et des limitations dont les plus importants sont :

- Elles considèrent des a priori sur le canal de propagation et/ou le mouvement des nœuds.
- La majorité de ces approches ne prennent pas en compte les caractéristiques du canal de propagation et le considèrent sans erreurs (variations aléatoires).
- Plusieurs de ces approches utilisent la puissance reçue pour en déduire le mouvement des nœuds. Le mouvement des nœuds est ensuite prédit et la qualité des liens en est déduite.

Notre approche, basée sur une architecture *cross-layer*, utilise la puissance du signal reçu pour qualifier la qualité de lien et de déduire la qualité future du lien directement de l'historique de la puissance reçue. De fait, nous ne considérons aucun a priori sur le mouvement ou sur le canal de propagation. Notre outil se veut simple, nécessitant peu de calcul et d'espace mémoire ainsi qu'une faible fréquence de donnée de puissance (toute les secondes). En comparaison avec les modèles de la littérature, notre horizon de prédiction est assez court (deux secondes), ce qui permet de préserver une bonne qualité de prédiction tout en fournissant un temps suffisamment long aux protocoles qui l'utilisent pour qu'ils effectuent leur maintenance.

Nous avons développé un outil d'estimation de la puissance reçue, basé sur des extrapolations historiques de type *exponential smoothing*, dans le but de les lisser et d'en soustraire les variations (erreurs) dues à la propagation. Cet outil utilise la combinaison d'un simple *exponential smoothing* (ES) et d'un double *exponential smoothing* (ESES), donné par $(2 \times ES) - ESES$. Par ailleurs, nous utilisons le double *exponential smoothing* pour estimer la pente de la puissance de réception sans erreur. La prédiction se fait à

partir de l'estimation de la puissance, du double *exponential smoothing* et de la formulation de Holtz.

Ces deux outils ont d'abord été développés et testés avec quatre scénarios reflétant un grand nombre de cas possibles. Nous avons ensuite effectué une série de tests sur deux cas de mouvements que nous avons développés. Le premier est basé sur le modèle TDPD tandis que le second est basé sur le modèle TDMD. Ces deux cas de tests reflètent les différentes variations de puissance que nous avons observées lors de nombreuses simulations. Ces différents tests ont été par ailleurs effectués avec deux niveaux d'erreurs (amplitude des variations) sur le niveau de puissance reçue, l'un reflétant un niveau d'erreur moyen, l'autre correspondant à un niveau d'erreur important.

À travers ces différents tests, nous avons pu mettre en évidence la qualité de nos modèles d'estimation et de prédiction. La prédiction ne pouvant pas être meilleure que l'estimation, nous avons pu constater que mis à part le cas de variation très importante (forte pente ou inversement de pente), la prédiction avait globalement la même précision que l'estimation.

Enfin, en effectuant une prédiction à dix secondes, nous avons mis en évidence une des limites de notre outil de prédiction. Lorsque l'horizon de prédiction est trop grand, l'importance d'une bonne estimation de la pente de la puissance sans erreur augmente.

CONCLUSION

La recherche actuelle sur les réseaux ad-hoc se concentre en grande partie sur la difficulté d'intégration de la qualité de service dans ces réseaux à architecture décentralisée. En réponse à cette problématique un certain nombre de pistes et d'architectures ont été explorées parmi lesquelles l'utilisation de *clusters* et de *backbones* dans les réseaux ainsi que des connexions entre les couches de communications d'un nœud (approche *cross-layer*).

Ces approches souffrent cependant de l'instabilité des liens entre les nœuds d'un MANET, dû d'une part à leur mouvement relatif et d'autre part à la variation de l'environnement qui les entoure. La modification de la qualité des liens, ainsi que leurs ruptures intempestives entraînent des problèmes au niveau de la couche MAC, du routage, de la construction et maintenance de *clusters* et *backbones*. L'approche classique consiste à répondre au problème de rupture de connexion lorsque celui-ci est effectif. La rupture de service, au niveau applicatif, qui en découle est incompatible avec des objectifs de qualité de service. De ce constat est apparue l'idée de prédiction de la qualité de lien, ce qui permettrait aux différents protocoles d'effectuer leurs maintenances avant la rupture de lien et garantir ainsi un service continu.

De nombreuses approches de prédiction de qualité de lien existent sous différentes appellations : prédiction de qualité de lien, prédiction de mouvement, prédiction de rupture de lien, prédiction de temps de connexion, etc. Nous avons passé en revue la grande majorité de ces approches et en avons déduit certaines lacunes. Celles-ci peuvent être décomposées en trois points principaux :

- Elles considèrent des a priori sur le canal de propagation et/ou le mouvement des nœuds.
- La majorité d'entre elles ne prennent pas en compte les caractéristiques du canal de propagation et le considèrent sans erreur.

- Un grand nombre d'approches utilisent la puissance reçue pour en déduire le mouvement des nœuds. Le mouvement des nœuds est ensuite prédit et la qualité future des liens en est déduite.

Notre problématique a donc été de développer un outil d'estimation et de prédiction de la qualité de lien directement à partir de son historique. L'idée étant de prédire la qualité de lien à une échéance suffisamment longue (deux secondes) pour permettre aux différents protocoles d'effectuer leurs mis à jour. L'outil devait par ailleurs être peu gourmand en ressources (espace mémoire et temps de calcul) et nécessiter une fréquence de mis à jour des données relativement faible (une seconde). Après une étude de la couche physique, nous avons décidé de considérer la puissance de réception comme grandeur qualifiant la qualité des liens.

Notre cas d'étude se limite aux utilisateurs humains, à pied, dans une zone fermée de type salle de conférence. L'espace est considéré sans sectorisations, murs ou partitions importantes. De plus, notre approche se veut avec le minimum de contraintes et a priori sur le mouvement. Enfin, nous nous posons dans le cas où les nœuds sont, du point de vue du réseau, identiques et interchangeable.

Les variations de la puissance de réception dépendent des variations de distances (dues au mouvement) et des variations intrinsèques au canal de propagation entre l'émetteur et le récepteur. Pour que nous puissions développer et tester, à travers des simulations, ces outils dans de bonnes conditions, nous avons alors besoin d'utiliser un modèle de propagation et des modèles de mouvement adéquats et réalistes. Nous avons donc dans un premier temps effectué l'étude du canal de propagation, ce qui nous a permis de choisir une modélisation de canal cohérente avec notre cas d'étude. Ce modèle considère deux types de variation : une atténuation lente de la puissance et des variations rapides autour de cette valeur. Les variations rapides, aléatoires, sont des incertitudes (erreurs) sur la valeur de la puissance.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés aux modèles de mouvement. De part la diversité des approches possibles, le choix d'un modèle de mouvement s'est avéré plus complexe que le canal de propagation. Les modèles de mouvement proposés dans la littérature sont soit trop simplistes et donc peu réalistes (à l'image du *Random Waypoint*), soit très complexes dans leurs structures et nécessitant la définition de scénarios très particuliers. Nous avons donc entrepris de développer des modèles ayant les propriétés de mouvement avec buts (*task based movement*) tout en préservant une simplicité de paramétrisation. Il est à noter que plus la paramétrisation d'un modèle de mouvement est complexe, plus ce modèle correspond à un scénario précis. Nous avons donc développé, à partir du modèle *Boundless Simulation Area mobility model*, deux modèles de mouvement : le *Temporal Dependency with Pause time Dependency mobility model* (TDPD) et le *Temporal Dependency and Movement Dependency mobility model* (TDMD). Le *Boundless Simulation Area mobility model* présente l'intérêt d'intégrer une dépendance temporelle entre les instants du mouvement tout en formulant peu d'a priori. Le TDPD intègre des temps de pauses de durées aléatoires mais dont les bornes de choix dépendent du temps de mouvement précédent reflétant le cas où une personne a atteint le but de son déplacement. Il est en effet habituel d'observer des temps de pauses d'autant plus longs que le déplacement le fut. Le TDMD, basé sur le TDPD, intègre en plus deux aspects sur le mouvement. Lors d'un déplacement particulier, la vitesse de déplacement oscillera aléatoirement autour d'une vitesse de déplacement optimale. De plus, lors de ce déplacement, les variations successives d'angles auront tendance à être de signes opposées. Le premier aspect est justifié par le fait que sur un trajet, une personne se déplace généralement à une vitesse plus ou moins constante. Le second aspect permet de modéliser le but du déplacement en obtenant des trajectoires qui sont globalement dans des directions particulières. Pour conclure l'étude du mouvement, nous avons effectué une comparaison de l'effet de ces modèles sur la connectivité des MANETs à travers un outil simple que nous avons développé.

Enfin, à partir de quelques scénarios combinant mouvement et canal de propagation, nous avons développé un modèle d'estimation de la puissance de réception utilisant des extrapolations historiques de type *exponential smoothing*. Une combinaison d'un simple *exponential smoothing* (ES) et d'un double *exponential smoothing* (ESES), donné par $(2 \times ES) - ESES$ permet de lisser la puissance et d'en retirer les variations (erreurs) dues à la propagation. À travers le double *exponential smoothing*, nous estimons la pente de la puissance de réception sans erreur, ce qui nous permet d'effectuer la prédiction à partir de l'estimation. La formulation de Holtz est alors utilisée. Une série de tests nous ont alors permis de mettre en évidence la qualité de la prédiction à deux et à dix secondes ainsi que certaines limitations.

L'outil de prédiction que nous avons développé répond aux contraintes et caractéristiques que nous avons fixées. Mis à part son utilisation, seul, comme moyen de prédiction, l'outil d'estimation peut également être utilisé pour fournir les données d'entrée de certaines approches de prédiction que nous avons vues dans la revue de littérature.

RECOMMANDATIONS

Nos recommandations se divisent en quatre points majeurs traitant chacun d'un aspect de notre étude.

Premièrement, il serait possible d'utiliser un modèle de propagation plus précis pour vérifier la qualité de nos modèles d'estimation et de prédiction dans des conditions encore plus réaliste. Il serait d'ailleurs intéressant de les tester sur des données réelles.

Deuxièmement il serait possible de définir les paramètres des modèles de mouvement à partir de données réelles récoltées sur le terrain (des parcours). Il serait alors utile de définir pour chaque famille de mouvement, à travers une approche statistique, les valeurs à utiliser pour les différents paramètres. Nous obtiendrions ainsi des traces plus réalistes.

Il serait également possible d'apporter des modifications à nos modèles de mouvement. Un bon exemple serait de définir pour chaque nœud, dans le modèle TDMD, une vitesse autour de laquelle la vitesse optimale de chaque trajet est choisie. En effet, pour les différents trajets, la vitesse de déplacement d'un individu ne varie pas entre 1m/s et 1.6m/s, mais de manière plus limitée.

Troisièmement, un certain nombre d'améliorations peuvent être envisagées pour nos outils d'estimation et de prédiction. Trois améliorations essentielles, directement liées à leurs limitations, peuvent être envisagées :

- Des erreurs importantes de l'estimation et de la prédiction se produisent lors d'un changement important de pente, ou dans le cas d'une inversion de pente associé à de grandes valeurs de celle-ci. Ces erreurs se produisent à cause de la faible réactivité du double *exponential smoothing* (ESES). En considérant une

valeur seuil correspondante à de fortes variations, nous pourrions utiliser deux approches différentes pour diminuer les erreurs d'estimation et de prédiction :

- Une première approche pour obtenir une meilleure précision est d'utiliser uniquement le simple *exponential smoothing* (ES) pour l'estimation et la prédiction, ce qui correspond aux équations :

$$\begin{aligned}\tilde{X}(t) &= \alpha X(t) + (1-\alpha)\tilde{X}(t-1) \\ T(t) &= \beta(\tilde{X}(t) - \tilde{X}(t-1)) + (1-\beta)T(t-1) \\ \bar{X}(t+\tau) &= \tilde{X}(t) + \tau T(t)\end{aligned}\tag{6.1}$$

avec \tilde{X} l'estimation de la puissance sans erreur et \bar{X} la prédiction faite à l'horizon τ .

- Une deuxième approche est d'ajuster la valeur de α suivant la variation de pente de la puissance. Une plus grande valeur de α entraîne une meilleure réactivité de ESES. Il peut cependant être délicat de faire la distinction entre la variation de pente de la courbe de puissance sans erreur et la présence de *burst* d'erreur. Des variations trop rapides de α pourraient alors entraîner un nombre importants d'erreurs.
- La qualité de l'estimation et de la prédiction dépend du niveau d'erreur dans la courbe de puissance. Dans le cas où le niveau d'erreur serait estimé, il serait possible d'ajuster la valeur de α dépendamment du niveau d'erreur observé. Pour un niveau faible d'erreur, les performances seraient améliorées en prenant un α moins grand. Au contrario, lorsque le niveau d'erreur est important, une plus faible valeur de α est plus intéressante.

Il est à noter que la modification de α , suivant le niveau d'erreur, peut être combinée à sa modification dans le cas de changement de pente à travers un outil prenant en compte les deux paramètres.

Notre outil d'estimation de la puissance reçue peut être utilisé indépendamment de l'outil de prédiction. Ce premier peut donc servir comme entrée d'un grand nombre de modèles que nous avons exposés dans l'état de l'art (section 5.2). En effet, la majorité des publications considèrent comme entrée de leur système une puissance sans erreur, le lissage de la puissance que nous effectuons à travers notre outil d'estimation peut donc fournir des données plus convenables que d'utiliser directement la puissance telle quelle.

Enfin, la qualité du lien ne dépendant pas uniquement du niveau de puissance reçue, une amélioration significative de la prédiction serait possible en intégrant dans le processus des données plus complètes de la couche physique. À ce propos, il serait possible d'intégrer une approche *cross-layer* descendante pour améliorer la connaissance que possède la couche physique du canal radio. Les protocoles MAC intègrent généralement dans une trame un fanion permettant d'en déterminer le début. Le fanion est un ensemble connu de bits (ex. 01111110). Connaissant quel signal doit être reçu, ce qui est rarement le cas en communication, la couche physique pourrait effectuer certaines opérations (telles que des corrélations) et ainsi déterminer plus précisément les caractéristiques du canal radio. La qualité d'un lien dépend de plusieurs paramètres incluant : la puissance de réception, la modulation utilisée, le SNR, le BER. Les différents facteurs du canal radio (effet Doppler, *multipaths*, *shadowing*, etc.) influencent différemment ces paramètres. La combinaison des informations sur les différents paramètres physiques doit permettre de séparer l'influence des différents facteurs du canal radio. Ainsi, la prédiction séparée de chacun des paramètres permettra d'obtenir une meilleure prédiction globale de la qualité de lien future.

BIBLIOGRAPHIE

- Adibi S. et Erfani S. (2006). «A multipath routing survey for mobile ad-hoc networks».
- AlAgha K., Pujolle G., et al. (2001). *Réseaux de mobiles & réseaux sans fil*. Eyrolles.
- Bai F., Sadagopan N., et al. (2003). «Important: A framework to systematically analyze the impact of mobility on performance of routing protocols for ad hoc networks». *Proceedings of IEEE Information Communications Conference (INFOCOM 2003)*, San Francisco, USA, IEEE.
- Bettstetter C., Resta G., et al. (2003). «The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks». *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 2(3),257-269.
- Bharghavan V., Demers A., et al. (1994). «Macaw: A media access protocol for wireless lan's». *Proceedings of the conference on Communications architectures, protocols and applications*,
- Bharghavan V. et Jayanth M. (1997). «Profile-based next-cell prediction in indoor wireless lan». *in proceeding of the IEEE SICON'97*,
- Bhatt M., Chokshi R., et al. (2003). «Impact of mobility on the performance of ad hoc wireless networks».
- Borrel V., Amorim M.D.d., et al. (2005). *On natural mobility models*. http://www-rp.lip6.fr/site_npa/site_rp/publications/645-wac05-03.pdf.
- Bricard-Vieu V. et Mikou N. (2005). «Qos in manets using a mobility prediction-based weighted clustering algorithm». *Wireless And Mobile Computing, Networking And Communications, 2005. (WiMob'2005), IEEE International Conference on*,
- Broch J., Maltz D.A., et al. (1998). «A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols». *Proceedings of the Fourth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking(Mobicom98)*, ACM.
- Brockwell P.J. et Davis R.A. (1996). *Introduction to time series and forecasting*. Springer.
- Butala A. et Tong L. (2004) «Cross layer design for medium access control in cdma ad-hoc networks», DOI:
- Camp T., Boleng J., et al. (2002).«A survey of mobility models for ad hoc network research». *Wireless Communication & Mobile Computing (WCMC)*, 2(Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications),483-502.
- Capka J. et Boutaba R. (2004). «Mobility prediction in wireless networks using neural networks». *IFIP/IEEE international Conference on the Management of Multimedia Networks and Services (MMNS'04)*, San Diego, California,

- Caplice C. (2003). *Esd.260, demand forecasting*.
http://www.cocw.net/mit/NR/rdonlyres/Engineering-Systems-Division/ESD-260JFall2003/E09127E4-7613-4502-A67F-6C2BFF31BBC5/0/102_3demandfcst.pdf.
- Chan J. et Seneviratne A. (1999). «A practical user mobility prediction algorithm for supporting adaptive qos in wireless networks».
- Chellapa R., Jennings A., et al. (2003). «A comparative study of mobility prediction in fixed wireless networks and mobile ad hoc networks».
- Chiang (1998). *Wireless networks multicasting*. Departement of Computer Science. Los Angeles, USA, University of California.
- CNAM. *Cours b11: Transmission des telecommunications - partie2*.
http://www.cnam.fr/elau/polycop/images/B11_Caract%E9risation.pdf.
- Corson S. Rfc 2501, mobile ad hoc networking (manet) : Routing protocol performance issues and evaluation considerations».
- Gaertner G. et Cahill V. (2004).«Understanding link quality in 802.11 mobile ad hoc networks». *IEEE Internet computing*,
- Garcia-Luna-Aceves J.J. et Fullmer C.L. (1999).«Floor acquisition multiple access (fama) in single-channel wireless networks». *Mobile Networks and Applications*,
- Gavrilovska L.M. (2005).«Ad hoc networking towards 4g: Challenges and qos solutions». *IEEE*,
- Goff T., Abu-Ghazaleh N.B., et al. (2001). «Premtive routing in ad hoc networks». *Mobile computing and networking (MOBICOM 2000)*, spinger verlag,
- Herrmann K. (2003). «Modeling the sociological aspects of mobility in ad hoc networks». *Proceedings of the 6th ACM international workshop on Modeling analysis and simulation of wireless and mobile systems*, San Diego, CA, USA,
- Ilyas M.U. et Radha H. (2005). The influence mobility model: A novel hierarchical mobility modeling framework. *Wireless Communications and Networking Conference*. IEEE. 3: 1638-1643 Vol. 3.
- Janacek G. et Swift L. (1993). *Time series, forecasting, simulation, application*. Ellies Horwood.
- Jardosh A., Belding-Royer E.M., et al. (2003). «Towards realistic mobility models for mobile ad hoc networks». *Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*, San Diego, CA, USA, ACM Press.
- Jiang S. (2004).«An enhanced prediction-based link availability estimation for manets». *Communications, IEEE Transactions on*, 52(2),183-186.
- Jianxin W., Yiqun T., et al. (2001). «Qos routing with mobility prediction in manet».

- Johansson P., Larsson T., et al. (1999). «Routing protocols for mobile ad-hoc networks - a comparative performance analysis». *proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM)*,
- Johansson P., Larsson T., et al. (1999). «Scenario-based performance analysis of routing protocols for mobile ad-hoc networks». *In Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*,
- Jones H.M., Xu S., et al. (2005).«Link ratio for ad hoc networks in a rayleigh fading channel». *Papers presented at the 2005 workshop on Wireless traffic measurements and modeling*,
- Ju H. et Rubin I. (2005). «Performance analysis and enhancement for backbone based wireless mobile ad hoc networks».
- Ju H. et Rubin I. (2005). «Performance analysis of mobile backbone topology synthesis algorithm for wireless ad hoc networks».
- Kadoch M. (2004). *Protocoles et réseaux locaux : Accès à internet*. Press ETS.
- Karn P. (1990). «Maca - a new channel access method for packet radio». *ARRL/CRRL Amateur Radio 9th computer Networking Conference*,
- Katz R.H. (1996). *Cs 294-7: Radio propagation, university of california, berkley*. <http://www.sss-mag.com/pdf/1propagation.pdf>.
- Knoblauch R., Pietrucha M., et al. (1996). Field studies of pedestrian walking speed and start-up time, *Transportation Research Record* 1538.
- Kwak B.-J., Song N.-O., et al. (2003).«A standard measure of mobility for evaluating mobile ad hoc networks performance». *IEICE Trans. Commun.*, E-86-B(11),3236-3243.
- Lee S.-J., Su W., et al. (1999). «Ad hoc wireless multicast with mobility prediction».
- Li V.O.K. et Zhenxin L. (2004). «Ad hoc network routing».
- Liang B. et Haas Z.J. (2006).«Hybrid routing in ad hoc networks with a dynamic virtual backbone». *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 5(6),1392-1405.
- Liu T., Bahl P., et al. (1998).«Mobility modeling, location tracking, and trajectory prediction in wireless atm networks». *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 16(6),922-936.
- Madsen T.K., Fitzek F.H.P., et al. (2004). «Impact of different mobility models on connectivity probability of a wireless ad hoc network».
- Mauve M., Widmer A., et al. (2001).«A survey on position-based routing in mobile ad hoc networks». *Network, IEEE*, 15(6),30-39.
- McDonald A. et Znati T. (2000). «Predicting node proximity in ad hoc networks: A :East overhead adaptive model for selecting stable routes». *First Annual Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing MobiHoc 2000*, Boston,

- Meng L.M., Zang J.X., et al. (2005). «A novel ad hoc routing protocol research based on mobility prediction algorithm».
- Meraihi R. (2005). Gestion de la qualité de service et controle de topologie dans les réseaux ad hoc Paris, Ecole Nationale Supérieure des Telecommunications.
- Meraihi R., Le Grand G., et al. (2004). «Improving ad hoc network performance with backbone topology control».
- Murthy C.S.R. et Manoj B.S. (2004). *Ad hoc wireless networks*. Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series.
- Musolesi M., Hailes S., et al. (2004). «An ad hoc mobility model founded on social network theory ». *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, Venice, Italy, CM Press.
- Navidi W. et Camp T. (2004). «Stationary distributions for the random waypoint mobility model». *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 3(1),99-108.
- PalChaudhuri S., Le Boudec J.Y., et al. (2005). «Perfect simulations for random trip mobility models». *Simulation Symposium, 38th Annual*,
- Pathirana P.N., Savkin A.V., et al. (2003). «Mobility modelling and trajectory prediction for cellular networks with mobile base stations». *Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, Annapolis, Maryland, USA, ACM Press.
- Pathirana P.N., Savkin A.V., et al. (2004). «Location estimation and trajectory prediction for cellular networks with mobile base stations». *IEEE Transactions on Vehicular Technology*,
- Proxim. (2003). *802.11a white paper by proxim wireless networks*.
<http://www.proxim.com/learn/library/whitepapers/80211a.pdf>.
- Qin L. et Kunz T. (2004) «Survey on mobile ad hoc network routing protocols and cross-layer design», DOI:
- Raisinghani V.T. et Iyer S. (2006). «Cross-layer feedback architecture for mobile device protocol stacks». *Communications Magazine, IEEE*, 44(1),85-92.
- Rajaraman R. et Richa A. *Algorithmic foundations of ad hoc networks: Part ii*.
www.ccs.neu/home/rrai/AdHocTutorial.ppt.
- Rappaport T.S. (2002). *Wireless communications*. Prentice Hall.
- Ravikiran G. et Singh S. (2004). «Influence of mobility models on the performance of routing protocols in ad-hoc wireless networks».
- Ray S., Carruthers J.B., et al. (2003). «Rts/cts-induced congestion in ad hoc wireless lans». *WCNC*,
- Riera M. et Aspas J. (1998). «Variable channel reservation mechanism for wireless networks with mixed types of mobility platforms». *in roceeding of the IEEE VTC'98*,

- Rong B., Amoussou G., et al. (2005). «Mobility prediction aided dynamic multicast routing in manet». *Advances in Wired and Wireless Communication, 2005 IEEE/Sarnoff Symposium on*,
- Safwat A.M., Hassanein H.S., et al. (2002). *Structured proactive and reactive routing for wireless mobile ad hoc networks*.
http://www.cs.queensu.ca/home/safwat/sample%20publications/Safwat_HAWN_CH13.pdf.
- Samaan N. et Karmouch A. (2005).«A mobility prediction architecture based on contextual knowledge and spatial conceptual maps». *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 4(6),537-551.
- Sheltami T. (2003). Efficient routing schemes for wireless mobile ad hoc networks. Electrical and Computer Engineering. Ontario, Queen's University.
- Shum K.W. et Sung C.W. (2003).«Kalman-filter-based predictive location management for pcs networkks». *Vehicular Technology Conference*,
- Soh W.-S. et Kim H.S. (2003).«Qos provisioning in cellular networks based on mobility prediction techniques». *IEEE Communications Magazine*,
- Srivastava V. et Motani M. (2005).«Cross-layer design: A survey and the road ahead». *Communications Magazine, IEEE*, 43(12),112-119.
- Storer R.H. (2001). *Forecasting using simple methods*.
www.lehigh.edu/~rhs2/ie409/BasicForecastingMethods.ppt.
- Su W. (2000). Motion prediction in mobile/wireless networks, University of California, Los Angeles: 117.
- Su W., Lee S.-J., et al. (2001).«Mobility prediction and routing in ad hoc wireless networks». *International Journal of Network Management*, v.11 n.1(p.3-30.
- Su W., Lee S.J., et al. (2000). «Mobility prediction in wireless networks».
- Sungsoon C. et Hayes J.P. (2005). «Impact of mobility on connection in ad hoc networks».
- T. F. Dictionary. (2006). *Artcile about : Race walking*.
<http://encyclopedia.thefreedictionary.com>.
- T. F. Dictionary. (2006). *Article about : Orders of magnitude (speed)*.
<http://encyclopedia.thefreedictionary.com/>.
- Tanenbaum A. (2003). *Computer networks, fourth edition*. Prentice Hall.
- Theoleyre F. et Valois F. (2005). «Virtual structure routing in ad hoc networks».
- Tian J., Hahner J., et al. (2002). «Graph-based mobility model for mobile ad hoc network simulation». *Proceedings of 35th Annual Simulation Symposium, in cooperation with the IEEE Computer Society and ACM*, San Diego, California, ACM.

- Toh C.-K. (1997). «Associativity-based routing for ad-hoc networks». *Wireless Personal Communications Journal, Special Issue on Mobile Networking and Computing Systems*,
- Wang F., Min M., et al. (2005). «On the construction of stable virtual backbones in mobile ad-hoc networks».
- Wang R. et Cox D.C. (2003). «Understanding cellular ad hoc networks: How much an accurate physical layer model matters».
- Wei D. et A. C.H. (2005). «A survey on cluster schemes in ad hoc wireless networks».
- Weiss E., Kurowski K., et al. (2003). «Avoiding route breakage in ad hoc networks using link prediction».
- Wikipedia. (2006). *Ad hoc protocol list*.
http://en.wikipedia.org/wiki/Ad_hoc_protocol_list.
- Wu K. (2002). Effective routing in wireless mobile ad hoc networks. Department of Computing Science. Edmonton, Alberta, University of Alberta.
- Xiaolong L., Agrawal D.P., et al. (2004). «Impact of mobility on the performance of mobile ad hoc networks».
- Xiaoyan H., Kaixin X., et al. (2002). «Scalable routing protocols for mobile ad hoc networks». *Network, IEEE*, 16(4),11-21.
- Yang N., Sankar R., et al. (2005). «Improving ad hoc network performance using cross-layer information».
- Yazbeck S. (2003). Ieee 802.11 and bluetooth: An architectural overview. Book chapter in : The handbook of ad hoc wireless networks, CRC Press.
- Yih-Chun H. et Perrig A. (2004). «A survey of secure wireless ad hoc routing». *Security & Privacy Magazine, IEEE*, 02(3),28-39.
- Yu D. et Hui L. (2003). «Influence of mobility models on node distribution in ad hoc networks». *Communication Technology Proceedings, 2003. ICCT 2003. International Conference on Communication Technology*
- Yu J.Y. et Chong P.H.J. (2005). «A survey of clustering schemes for mobile ad hoc networks». *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 7(1),32-48.
- Zaidi Z.R. et Mark B.L. (2003). «A mobility tracking model for wireless ad hoc networks». *Wireless Communications and Networking Conference*,
- Zaidi Z.R. et Mark B.L. (2004). «Mobility estimation for wireless networks based on an autoregressive model». *IEEE Global Telecommunications Conference*,