


# THÈSE

**En vue de l'obtention du**

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

**Délivré par** *L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE*
**Discipline ou spécialité :** *Réseaux et Télécommunications*

---

**Présentée et soutenue par** *Cholatip YAWUT*
**Le** *28/09/2009*

**Titre :** *Adaptation à la mobilité dans les réseaux ad hoc*

---

**JURY**

| | | | |
|---|---|---|---|
| *M.* | *Michel DIAZ* | *Président* | *Directeur de recherche du CNRS* |
| *M.* | *Congduc PHAM* | *Rapporteur* | *Professeur Université de PAU et des Pays de l'Adour* |
| *Mme.* | *Monique BECKER* | *Rapporteur* | *Professeur Télécom Sud Paris* |
| *Mme.* | *Véronique VEQUE* | *Examinateur* | *Professeur Université de Paris XI* |
| *Mme.* | *Béatrice PAILLASSA* | *Examinateur* | *Professeur INPT-ENSEEIHT* |
| *M.* | *Riadh DHAOU* | *Examinateur* | *Maître de conférences INPT-ENSEEIHT* |

---

**Ecole doctorale :** *MATHEMATIQUES, INFORMATIQUE ET TELECOMMUNICATIONS DE TOULOUSE*
**Unité de recherche :** *Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (UMR 5505)*
**Directeur(s) de Thèse :** *Mme. Béatrice PAILLASSA*
**Co-Encadrant :** *M. Riadh DHAOU*

# Adaptation à la mobilité dans les réseaux ad hoc

**Cholatip YAWUT**

Thèse dirigée par

**Béatrice PAILLASSA** Professeur-Directrice de thèse

**Riadh DHAOU** Maître de conférence-Co encadrant

*"If you think you can or you think you can't, you are probably right"*
Henry Ford

*"If you Think You Can, You Can!"*
Denis Waitley

*"Success is not the key to happiness. Happiness is the key to success. If you love what you are doing, you will be successful"*
Albert Schweitzer

*"There are no gains without pains"*
Benjamin Franklin

# Remerciements

Mes premiers remerciements iront à Béatrice PAILLASSA et Riadh DHAOU avec qui j'ai travaillé dés mon mastère pour soutien permanent pendant ma thèse. J'aimerais leur adresser mes plus vifs remerciements pour tout leur dynamisme, leur tolérance, leur disponibilité, leurs compétences scientifiques et leurs exceptionnelles idées que j'ai pu apprécier tout au long de ma thèse. Ce travail n'aurait jamais pu aboutir sans eux, qui ont toujours su me consacrer des moments de leur temps, me guider et me conseiller et me témoigner leur soutien et leur confiance. Je souhaite leur transmettre l'expression de ma plus profonde et sincère gratitude. J'ai beaucoup appris en travaillant avec eux et je les remercie de tout mon cœur. Je voudrais leur dire que tous deux sont parmi les meilleurs professeurs que j'ai rencontrés et je pense que c'était une occasion unique pour moi de travailler avec eux.

Mes très vifs remerciements s'adressent aux membres du jury de thèse qui ont accepté de juger ce travail. Je suis profondément reconnaissant à mes deux rapporteurs, Madame Monique BECKER et Monsieur Congduc PHAM, d'avoir accepté de lire et évaluer ma thèse. Leurs remarques pertinentes sur une première version de ce manuscrit m'ont permis d'en améliorer la clarté et de considérer de nouvelles perspectives de mon travail. Je voudrais aussi exprimer ma gratitude à Monsieur Michel DIAZ pour avoir assuré la charge de président du jury. Je tiens également à remercier Madame véronique VEQUE qui m'a fait l'honneur d'accepter de participer au jury.

Merci pour les aides permanentes reçues du personnel du laboratoire, de l'INPT et de l'UPS. Je remercie en particulier Stéphane Jublin, Violette, Sylvie et Sam qui ont été disponibles à chaque fois que j'ai eu besoin d'une aide. Je remercie Nicole Causero pour sa grande gentillesse et ses encouragements, Sylvie Carcasses et Martine Labruyère qui m'ont toujours diffusé les informations administratives importantes dont j'ai eu besoin, Monsieur Haffad qui s'occupe de mon bureau et Corinne Lahille qui m'a accueilli depuis ma première arrivée en France.

Je remercie également l'ensemble des enseignants et doctorants qui m'ont offert un excellent cadre de travail ainsi qu'un séjour extrêmement agréable. Merci à Michel Daydé, André-Luc Beylot, Emmanuel Chaput, Jérôme Ermont, Julien Fasson, Christian Fraboul, Jean-Luc Scharbarg, Benoît Escrig, Marie Chabert, Sreng

Sokchenda, Amadou Baba Bagayoko, et Houssam Kaddoura. Merci à Alexandra Niculae, Rahim Kacimi, Wasimon Panichpattanakul, Warodom Werapun et sa femme qui m'ont aidé à faire un pot exceptionnel. De plus, merci en particulier à Ravelomanana Maholy qui m'a beaucoup aidé durant le mastère. Toutes mes amitiés à Farid Jaddi pour sa gentillesse et les codes de protocole CSR que j'ai utilisés dans ma thèse.

Merci à Masashi Ueda qui m'a donné l'occasion de recherche en internship à National Institute of Informatics (NII) au Japon. Merci à mes amis thaïlandais, mes amis japonais et l'ensemble du personnel de NII. Merci mille fois au Docteur Teruhipe Inoue qui a réservé un appartement à Tokyo pour moi et m'a amené partout au Japon.

Merci au personnel du restaurant Thaïlandais BAAN SIAM, Bernard Cormon et sa famille, P'Boon, Jeab et Damien, Jai et Christophe, Noi, Ji et Xavier, Ed et Stéphane, Pair et sa famille, P'Por et P'Jean, P'Kai et Jek, Nong Kay et sa famille qui m'ont offert d'agréable moments et repas. Merci infiniment à "maman Da" que je considère comme ma mère et qui m'a beaucoup soutenu.

Merci au gouvernement Thaïlandais qui a supporté mes études, à tous les personnels de l'Office of Educational Affairs de l'Ambassade Royale de Thaïlande à Paris, en particulier à Madame Pongpit Baron-Renault.

J'aimerais remercier également l'ensemble du personnel de l'Université de la Thaïlande pour leur professionnalisme et l'esprit de service qu'ils ont toujours eu à mon égard. Merci à Teravuti Boonyasaopon, Monchai Tiantong, Phayung Meesad, Utomporn Phalavonk, Udom Jeenpradub, Premporn Khemavuk, Somchai Prakancharoen, Charun Sanrach, Narong Wesnarat, Anan Phonphoem, Kanchana Kanchanasut et bien d'autres qui ont contribué au bon déroulement de cette thèse. Merci à Monsieur Jean-Pierre Delsol pour m'avoir conseillé de venir dans cette école, à Watcharee Paisat de son aide et à Supawadee Suhkyot pour sa gentillesse et son aide à remplir les dossiers.

Je voudrais adresser aussi un grand merci à tous mes amis thaïlandais. Merci à Sakuna Charoenpanyasak, P'Jan, P'Nee, P'Anchalee, P'Hlun, P'Puk, P'Za, P'Khag, P'Noy et Chol, Pang, Dome et Toiy (internships de Béatrice), Khakhai, Amorn, Nong, Wim, Golf, Korn, Joey, O, Wit, Nan, Nim, Mai. Merci également au Docteur Sibeny Souvanny de m'avoir si bien soigné, à Nuttapol Prayongpun de sa grande gentillesse et de son aide permanente en France, à Nong Pang pour m'avoir aidé à trouver une excellent école pour ma nièce.

J'adresse mes chaleureux remerciements à ma grande famille et notamment mes parents, mes grand-pères, mes grand-mères, mes sœurs, ma nièce, et ma fiancée Manunya Srirat pour la patience dont ils ont fait preuve à mon égard et pour leurs encouragements dans les moments délicats. Cette page serait loin de suffire pour vous exprimer toute ma reconnaissance et mon affection.

Enfin, tous mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de cette thèse, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde sympathie.

Merci infiniment encore à tous.

# Table des matières

**Introduction** **1**

**1 Adaptation dans un réseau ad hoc** **5**
1.1 Notion d'adaptation . . . 6
1.1.1 Objectif de l'adaptation en réseaux ad hoc . . . 6
1.1.1.1 Energie limitée des nœuds . . . 6
1.1.1.2 Débit limité et variabilité du débit des liens . . . 6
1.1.1.3 Charge de trafic . . . 7
1.1.1.4 Topologie dynamique et mobilité . . . 7
1.1.2 Processus d'adaptation . . . 9
1.1.2.1 Eléments du processus d'adaptation . . . 9
1.1.2.2 Architecture protocolaire . . . 10
1.1.2.3 Portée des paramètres pour le calcul des métriques : la vue . . . 13
1.2 Travaux sur l'adaptation en réseaux ad hoc . . . 16
1.2.1 Synthèse . . . 16
1.2.2 Adaptation à l'énergie disponible : métrique énergie . . . 17
1.2.3 Adaptation à l'état de la liaison : métrique canal . . . 20
1.2.3.1 Métrique sur la force du signal . . . 20
1.2.3.2 Métrique sur le taux de perte . . . 25
1.2.4 Adaptation à la charge de trafic : métriques de QOS . . . 28
1.2.5 Adaptation à la dynamique de la topologie : métriques de densité et de mobilité . . . 32
1.3 Conclusion . . . 36

**2 Proposition de taxinomie des métriques de mobilité et analyse qualitative** **37**
2.1 Généralités . . . 38
2.1.1 Influence de la mobilité sur la performance . . . 38
2.1.2 Modèles de mobilité . . . 39
2.1.2.1 Random Walk . . . 39

2.1.2.2 Random Waypoint . . . 40
2.1.2.3 RPGM . . . 40
2.1.2.4 Freeway . . . 41
2.1.2.5 Manhattan . . . 42
2.1.3 Méthode d'analyse : Critères d'appréciation des métriques pour de l'adaptation . . . 44
2.2 Types de métriques et point de vue . . . 45
2.2.1 Sociologie du déplacement . . . 46
2.2.1.1 Vue locale : vitesse et déplacement . . . 46
2.2.1.2 Vue voisinage : corrélation du déplacement . . . 46
2.2.1.3 Vue réseau : approches analytique et géométrique . 48
2.2.2 Prédiction du déplacement . . . 51
2.2.2.1 Par mesure locale : densité, erreurs de route et puissance . . . 51
2.2.2.2 Par positionnement et modélisation du mouvement de voisinage . . . 53
2.2.2.3 Par modélisation des routes . . . 56
2.2.3 Sociologie du lien . . . 58
2.2.3.1 Modélisation à longue échelle : Contact et rencontre 58
2.2.3.2 Modélisation stochastique . . . 60
2.2.3.3 Calcul déterministe : métriques de durée, changement et stabilité de lien . . . 63
2.3 Caractéristiques de la fonction calcul de métrique . . . 67
2.3.1 Mesure et/ou Modélisation analytique . . . 67
2.3.2 Méthode de mesure avec/sans GPS . . . 67
2.3.3 Niveau protocolaire d'origine des informations mesurées . . . 67
2.3.4 Type d'objet mesuré . . . 67
2.4 Synthèse et choix de métriques . . . 69
2.5 Conclusion . . . 72

**3 Evaluation des métriques de mobilité 73**
3.1 Calcul des métriques . . . 74
3.1.1 Link State Changes (LC) . . . 74
3.1.2 LinkDuration (LD) . . . 75
3.1.3 Link Stability . . . 76
3.1.4 Discussion . . . 77
3.2 Méthodologie d'évaluation . . . 79
3.2.1 Métriques de performance . . . 79
3.2.2 Cœfficient de corrélation . . . 79
3.2.3 Relations prévues entre métriques de mobilité et performance 80
3.3 Paramètres d'évaluation . . . 82
3.3.1 Modèle de mobilité . . . 82
3.3.2 Modèle de simulation . . . 82
3.4 Résultats et discussion . . . 85
3.4.1 Relation entre les métriques de mobilité et la vitesse de simulation . . . 85

3.4.2 Calibration . . . 87
3.4.3 Relation entre la performance et la métrique de mobilité . . . 89
3.4.3.1 Cas 1 étude sur 10 nœuds . . . 89
3.4.3.2 Cas 2 étude sur 50 nœuds . . . 92
3.4.3.3 Cas 3 étude sur un scénario . . . 96
3.5 Conclusion . . . 99

**4 Propositions d'amélioration des performances de routage par métriques de mobilité 101**
4.1 Aperçu général . . . 102
4.1.1 Types d'adaptations . . . 102
4.1.2 Stratégie d'adaptation . . . 102
4.1.3 Méthode d'évaluation . . . 103
4.1.3.1 Modèle de la simulation . . . 103
4.1.3.2 Métriques de performance . . . 103
4.1.3.3 Interprétation des résultats . . . 104
4.2 OLSR : Adaptation de paramètres . . . 105
4.2.1 Précisions sur OLSR . . . 105
4.2.2 Proposition d'adaptation pour l'algorithme de sélection MPR 109
4.2.2.1 Heuristique originale de choix des relais multipoint dans OLSR . . . 110
4.2.2.2 Améliorations des heuristiques . . . 112
4.2.3 Résultats d'évaluation des stratégies d'élection et discussions . 116
4.2.3.1 Choix du LD . . . 116
4.2.3.2 Résultats en environnement basse densité . . . 118
4.2.3.3 Résultats en environnement moyenne densité . . . 119
4.2.3.4 Résultats en environnement haute densité . . . 120
4.2.3.5 Synthèse . . . 121
4.3 CSR : Adaptation de mode et de paramètres . . . 123
4.3.1 Précisions sur CSR . . . 123
4.3.2 Intérêt du changement adaptatif du mode routage . . . 127
4.3.3 Résultats d'évaluation des stratégies de changement de mode et discussions . . . 128
4.3.4 Proposition d'adaptation pour le choix des Chefs de Cluster et Serveurs . . . 129
4.3.4.1 Heuristique de choix des Chefs de Cluster et Serveurs dans CSR original . . . 130
4.3.4.2 Stratégies de choix des Chefs de Cluster et Serveurs sur critères de Densité et Mobilité . . . 130
4.3.5 Résultats d'évaluation des stratégies d'élection et discussions . 130
4.3.5.1 Résultats en environnement basse densité . . . 131
4.3.5.2 Résultats en environnement de densité moyenne . . . 132
4.3.5.3 Résultats en environnement haute Densité . . . 133
4.3.5.4 Synthèse . . . 134
4.4 Conclusion . . . 136

**5 Etude expérimentale des modèles de mobilité** **137**
5.1 Manhattan . . . . . 138
5.2 RPGM . . . . . 141
5.3 Random Waypoint . . . . . 143
5.4 Adaptation au modèle de mobilité . . . . . 146
5.5 Conclusion . . . . . 149

**Conclusion générale** **151**

**Bibliographie** **155**

**Publications** **163**

# Table des figures


1.1 Transmission radio multi débit . . . . . 7
1.2 Synopsis du processus d'adaptation . . . . . 10
1.3 Modélisation modulaire strictement hiérarchique . . . . . 11
1.4 Classification des architectures inter-couches . . . . . 12
1.5 Vues des paramètres pour le calcul des métriques . . . . . 14
1.6 Choix de route adaptatif à l'énergie dans MMBCR . . . . . 18
1.7 Schéma fonctionnel de SBM . . . . . 20
1.8 Modèle de stabilité du signal pilote dans le routage ABR . . . . . 21
1.9 Schéma fonctionnel de ASBM . . . . . 22
1.10 Exemple d'opération du routage DLAR . . . . . 28

2.1 Influence de la mobilité sur la performance de routage MANET . . . 38
2.2 Mouvements de trois nœuds mobiles en utilisant le modèle de mobilité RPGM. . . . . 40
2.3 Carte utilisée dans le modèle de mobilité Freeway. . . . . 42
2.4 Carte utilisée dans le modèle de mobilité Manhattan. . . . . 42

3.1 Exemple de calcul de LC moyen et LD moyen . . . . . 75
3.2 Impact de la mobilité sur les métriques LC, LD et LS . . . . . 76
3.3 Problème de LS . . . . . 77
3.4 Résultats attendus de PDR et surcoût selon la mobilité . . . . . 81
3.5 Scénario particulier avec 3 nœuds . . . . . 83
3.6 Relation entre les métriques de la mobilité et la vitesse maximum . . 86
3.7 Calibration les métriques de mobilité pour 10 nœuds . . . . . 88
3.8 Performances pour 10 nœuds relativement aux métriques de mobilité pour un temps de simulation 3000s . . . . . 90
3.9 Cœfficient de corrélation RWP 10 nœuds et RPGM 5 groupes des 2 nœuds pour un temps de simulation 3000s . . . . . 91
3.10 Performances pour 50 nœuds relativement aux métriques de mobilité pour un temps de simulation 1000s . . . . . 93
3.11 Cœfficient de corrélation dans RWP 50 nœuds et RPGM 5 groupes des 10 nœuds . . . . . 94

3.12 Cœfficient de corrélation dans RWP 50 nœuds et RPGM 5 groupes des 10 nœuds . . . 95
3.13 Performances pour 3 nœuds relativement aux métriques de mobilité pour un temps de simulation 1000s . . . 97
3.14 Cœfficient de corrélation dans le cas 3 . . . 98

4.1 Exemple de routage OLSR. . . . 105
4.2 Détection de voisinage pour l'échange de messages HELLO. . . . 107
4.3 Exemple d'information de voisinage maintenue par OLSR. . . . 108
4.4 Optimisation de l'inondation par des relais multipoint . . . 109
4.5 Sélection des voisins possédant un seul lien avec un nœud du second niveau. . . . 110
4.6 Illustration de l'algorithme de choix des relais multipoint. . . . 111
4.7 A propos d'optimalité du choix des MPRs . . . 111
4.8 Calcul de LD par ajout de champs dans le tuple lien . . . 114
4.9 Calcul de LD local et global. . . . 114
4.10 Exemple de valeurs de LD pour 1 nœud . . . 117
4.11 Comparatif de performances entre le plus long LD et le plus court LD pour 10 et 50 nœuds . . . 117
4.12 Les performances comparatives pour 10 nœuds des stratégies 1D+2LD et OLSR standard (1D) . . . 118
4.13 Les performances comparatives pour 50 nœuds des stratégies 1D+2LD et OLSR standard (1D) . . . 119
4.14 Les performances comparatives pour 150 et 200 nœuds . . . 120
4.15 Domaine d'application des stratégies OLSR selon la densité . . . 122
4.16 Comparaison des performances DSR et CSR . . . 123
4.17 Modèle CSR. . . . 124
4.18 Changement de mode CSR. . . . 124
4.19 Intérêt du changement de mode CSR . . . 128
4.20 Les performances CSR comparatives pour 50 nœuds des stratégies 1D+2E et CSR original . . . 132
4.21 Les performances CSR comparatives pour 100 nœuds des stratégies 1D+2E et CSR original . . . 133
4.22 Les performances CSR comparatives pour 150 nœuds des stratégies 1D+2E et CSR original . . . 134
4.23 Domaine d'application des stratégies CSR selon la densité . . . 135

5.1 Mobilité de modèle Manhattan . . . 138
5.2 Degré moyen de modèle Manhattan . . . 138
5.3 Durée des liens de modèle Manhattan . . . 139
5.4 Nombre moyen de changements de liens de modèle Manhattan . . . 139
5.5 PDR et Overhead pour le modèle Manhattan . . . 140
5.6 Mobilité de modèle RPGM . . . 141
5.7 Degré moyen de modèle RPGM . . . 141
5.8 Durée des liens de modèle RPGM . . . 142
5.9 Nombre moyen de changements de liens de modèle RPGM . . . 142
5.10 Mobilité de modèle RWP . . . 143

5.11 Degré moyen de modèle RWP . . . . . 143
5.12 Durée des liens de modèle RWP . . . . . 144
5.13 Nombre moyen de changements de liens de modèle RWP . . . . . 144
5.14 Proposition de processus d'adaptation . . . . . 148

# Liste des tableaux

1.1 Synthèse des travaux sur l'adaptation en réseaux ad hoc . . . . . 16

2.1 Synthèse des caractéristiques des métriques bibliographies étudiées . . 70

3.1 Relation entre les métriques de mobilité et la vitesse maximale . . . . 80
3.2 Relation entre les métriques de performance et les métriques de mobilité . . . . . 80

4.1 Signification de sigles résultats de l'adaptation . . . . . 104

# Introduction

## A. Contexte réseaux ad hoc

Précisons en premier lieu le contexte de la thèse. Un réseau ad hoc est un ensemble autonome et coopératif de nœuds mobiles qui se déplacent et communiquent par une transmission sans fil qui ne suppose pas d'infrastructure préexistante [1]. Le réseau ad hoc se forme de manière spontanée et provisoire dès que plusieurs nœuds mobiles se trouvent à portée radio les uns des autres. Les nœuds communiquent, selon la distance qui les séparent, par deux modes de communication : soit les nœuds mobiles peuvent directement communiquer (en transmission ad hoc) car ils sont à portée de transmission, soit ils doivent utiliser d'autres nœuds mobiles comme des relais pour acheminer les paquets à destination (la transmission est multi-sauts).

Le choix des éléments relais dans un réseau ad hoc mobile (nommé également par l'instance de standardisation internet (IETF), Mobile Ad hoc Network : MANET), s'effectue par un protocole de routage. Plusieurs protocoles de routage sont standardisés à l'IETF, à savoir : AODV [2], DSR [3], OLSR [4] et TBRF [5] ; notons également le protocole de routage DYMO [6] qui est actuellement en phase d'études mais non encore finalisé par un label de Request for Comments (RFC). Les principales différences entre ces protocoles concernent leur mode et leur architecture [1].

AODV et DSR fonctionnent dans un mode réactif c'est-à-dire qu'ils établissent une route lorsque le terminal souhaite émettre une donnée, alors que TBRF et OLSR, sont en mode proactif, le protocole établit les routes dans le réseau avant qu'une demande de transfert ait lieu. Des nombreux travaux et évaluations de performances effectués dans le domaine du routage, il apparaît que l'intérêt d'un mode est lié à l'environnement. Ainsi, un protocole proactif est efficace dans des réseaux de grande taille avec une mobilité faible (la notion de mobilité faible, de grande taille n'est généralement pas quantifiée), alors qu'un protocole réactif conviendra mieux à un réseau de petite taille.

De nombreuses optimisations ont été proposées pour diminuer le trafic de contrôle généré par le routage MANET qui est traditionnellement transmis en inondation. La mise en place d'une architecture de routage, qui dédie la diffusion des données à

certains éléments, est un moyen adapté aux réseaux à grande échelle pour diminuer l'inondation. Sur de petits réseaux, le coût en terme d'échange de données pour la mise en place de la structure favorise les topologies sans architectures, qualifiées de plates. Pour les grands réseaux, deux grandes familles d'architectures ont été étudiées, les architectures dites par réseau dominant (Connecting Dominating Set [7]) qui permettent de mettre en place un réseau d'arrière plan chargé de propager l'information, et les architectures de clusters, où les chefs de clusters prennent en charge des fonctions particulières telle la propagation d'information.

# B. Motivations

Au delà de l'intérêt d'étudier le domaine des réseaux multi-sauts mobiles, qui ont suscité une activité intense de recherche protocolaire ces 10 dernières années en raison de leurs caractéristiques fort différentes des réseaux filaires traditionnels, nous nous intéressons à la mécanique protocolaire de l'adaptation dynamique au contexte. Les premiers protocoles ont traité de l'accès partagé à la liaison sans fil, du routage multi-sauts et de la mobilité, du passage à l'échelle, avec très vite des propositions d'améliorations de la performance du réseau qui lient le comportement du protocole à sa dynamique d'évolution. Un facteur de dynamique caractéristique des réseaux ad hoc mobiles est naturellement la mobilité ; c'est celui que nous étudions dans cette thèse.

Nous souhaitons exprimer la mobilité pour qu'elle soit utilisable pour des optimisations protocolaires. Par exemple un protocole qui cherche à mettre en place une architecture, que ce soit un cluster ou une passerelle d'accès à internet, peut avoir intérêt a choisir un élément *"peu mobile"* qui tiendra sa place dans l'architecture de façon à éviter de consommer de la bande passante, de l'énergie, par une remise en place fréquente de l'architecture pour cause de déplacement.

Il s'agit dans ce document de préciser le contexte mobilité par sa représentation sous forme de métriques qui permettent d'optimiser les performances du réseau par adaptation dynamique. Nous devons déterminer des métriques et en évaluer l'intérêt.

# C. Principales contributions

Dans cette thèse, nous développons une définition novatrice de la mobilité qui contrairement à de nombreux travaux ne tend pas à reproduire des mouvements de mobilité pour des outils d'évaluation. Nous appréhendons la mobilité de façon similaire à la notion de qualité de services car c'est une notion qui se définit à plusieurs niveaux, et par plusieurs paramètres. De même que la qualité de service est définissable au travers de sa perception par l'application, nous avons défini la mobilité par son influence sur le routage et considéré son expression selon plusieurs métriques.

Cette étude a nécessité un travail de synthèse bibliographique important, pour identifier au cours des nombreux travaux protocolaires les propositions se rapportant à la notion de mobilité. A partir de celui-ci, nous proposons une taxinomie originale des métriques de mobilité (publiée dans : Mobility Metrics Evaluation for

Self-Adaptive Protocols. : Journal of Networks, Volume 3 N°1, p. 53-64, janvier 2008).

Nous tentons de définir la mobilité de façon indépendante du contexte système, par une seule métrique. Nous avons choisi de procéder par une approche expérimentale reposant sur la simulation pour laquelle nous élaborons une méthodologie d'évaluation et d'analyse des résultats. Si notre tentative se révèle être infructueuse elle n'en contribue pas moins à mieux définir la mobilité (celle-ci n'est pas réduite à une métrique, elle se définit en fonction du contexte) et, à en trouver une représentation acceptable selon le protocole (publié dans On Metrics for Mobility Oriented Self Adaptive Protocols. International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC 2007), IEEEed).

Nous avons également étudié la mobilité dans un contexte bien défini pour lequel nous développons deux applications d'adaptation. Nous montrons alors que si le nombre d'éléments dans le réseau est un facteur prépondérant, le critère de densité associé au critère de mouvement est une bonne mesure de mobilité quel que soit le contexte (publié dans Mobility Versus Density Metric for OLSR Enhancement Lecture Notes in Computer Science, Volume 4866, p. 2-17, 2007).

Finalement, notre contribution est un processus global d'adaptation à la mobilité qui considère les métriques et le mouvement de mobilité. Nous proposons à chaque terminal de mesurer son environnement simplement et d'en déduire à partir de conditions environnementales l'adaptation à appliquer.

# D. Organisation du document

La présentation des travaux s'organise en 5 chapitres :

- Chapitre1- Adaptation dans les réseaux ad hoc. Ce chapitre présente un état de l'art de l'adaptation protocolaire dans un réseau ad hoc (adaptation à l'énergie disponible, à l'état de la liaison, à la charge de trafic, à la dynamique de la topologie).
- Chapitre2-Proposition de taxinomie des métriques de mobilité et analyse qualitative. Ce chapitre présente l'influence de la mobilité sur les performances, les modèles de mobilité, les critères d'appréciation des métriques pour l'adaptation, les différents types de métriques et points de vues ainsi que les caractéristiques de la fonction de calcul de métrique. Il met en évidence l'intérêt d'utiliser des métriques obtenues par mesure.
- Chapitre3-Evaluation des métriques de mobilité. Sont apportées des précisions sur le calcul des métriques retenues, la définition de la méthodologie et des paramètres d'évaluation. Puis sont présentés les résultats et interprétations des évaluations par simulation avec une étude de la corrélation et une discussion des relations entre les performances protocolaires et les métriques de mobilité utilisées.
- Chapitre4-Proposition d'amélioration des performances de routage par la métrique de mobilité. Ce chapitre présente deux études sur l'adaptation à la mobilité de deux protocoles de routage (OLSR et CSR (Cluster Head Source Routing)) utilisant les métriques de durée de liaison et densité dégagées dans le chapitre 3.

– Chapitre5-Etude expérimentale des modèles de mobilité. Etude de l'influence des modèles de mobilité et proposition d'un processus d'adaptation prenant en compte le modèle de mouvement.

Chapitre

# 1 Adaptation dans un réseau ad hoc

Dans ce chapitre nous présentons le concept d'adaptation protocolaire en réseau ad hoc, en précisant la notion d'adaptation puis en l'illustrant par des travaux effectués dans le domaine. Nous présentons ces travaux en référence aux objectifs de l'adaptation et aux métriques utilisées.

## 1.1 Notion d'adaptation

Précisons maintenant le concept d'adaptation en abordant les questions suivantes :

- Pourquoi de l'adaptation ?
- Comment un protocole adapte-t-il son comportement ?
- Quelles sont les données qui lui permettent de le faire ?

### 1.1.1 Objectif de l'adaptation en réseaux ad hoc

L'objectif de l'adaptation est de lier le comportement d'un protocole à l'environnement dynamique du réseau afin d'en améliorer les performances.

Dans le cas des réseaux ad hoc, les caractéristiques principales de l'environnement qui conduisent à proposer des adaptations protocolaires sont : l'énergie, le débit des liens, la qualité de service et la topologie.

#### 1.1.1.1 Energie limitée des nœuds

Les nœuds mobiles disposent d'une énergie limitée par la capacité de leur batterie qui est difficilement rechargeable en cours de déploiement. Pour prolonger la vie du réseau il est alors nécessaire de chercher à réduire la consommation d'énergie. Ainsi, dans le but de conserver le plus d'énergie possible, les nœuds ajustent dynamiquement la puissance de leur transmission en fonction de la distance à parcourir et du bruit environnant. Une autre façon d'économiser l'énergie et de diminuer le nombre d'émissions que doit faire un nœud. Pour ce faire, l'algorithme de routage en charge de la sélection des nœuds de relayage et cherche à adapter la sélection de ceux-ci en fonction de la puissance disponible.

#### 1.1.1.2 Débit limité et variabilité du débit des liens

Les réseaux ad hoc se connectent généralement en utilisant une transmission radio à courte portée comme 802.11a, b, g [8], Bluetooth [9] ou Zigbee [10]. La plupart de ces radios sont conçues pour adapter le débit de la couche physique en fonction de la qualité de la chaîne de transmission, par exemple ; le débit de transmission d'un signal radio 802.11a peut varier de 6 Mbps à 54 Mbps selon la mesure de la force du signal reçue (Received Signal Strength - RSSI).

La figure 1.1 [11] illustre la façon dont un appareil radio 802.11b teste les différents débits possibles en se connectant à ses voisins situés à différentes distances. Si un nœud veut utiliser le débit 11 Mbps, seuls les nœuds situés dans le cercle intérieur peuvent décoder correctement, avec un SNR suffisant (Signal-to-Noise Ratio), l'information. S'il choisit d'utiliser un débit plus bas, comme 1 Mbps, la distance de transmission sera beaucoup plus grande.

Le routage est également adaptable à la variation du lien radio. En réseau fixe, la variation d'environnement concerne essentiellement la bande passante. Les pannes de liens et de nœuds sont des évènements et non des états évolutifs. En réseau filaire, soit la ligne existe soit elle est rompue, alors qu'en réseau ad hoc la liaison est caractérisée par un état évolutif de fonctionnement ; le débit d'émission de chaque

lien radio change selon le temps et l'emplacement du nœud, voire peut devenir nul. Le protocole de routage adapte par construction le choix d'une route à l'existence d'une liaison, et peut également prendre en compte le débit réel de celle-ci.

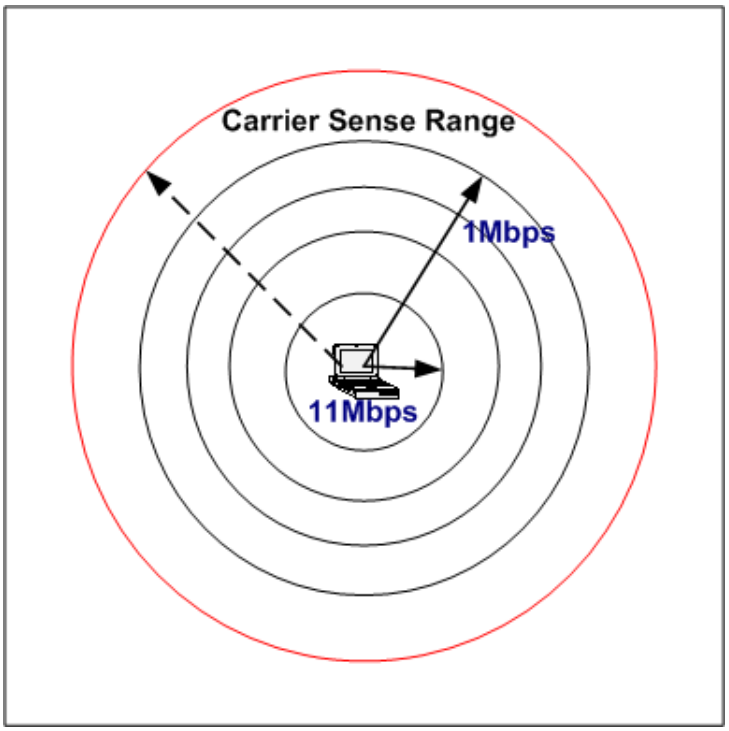



FIG. 1.1 – Transmission radio multi débit

#### 1.1.1.3 Charge de trafic

Les utilisateurs de réseaux ad hoc ont généralement besoin d'utiliser plusieurs applications comme la vidéo, le son ou des transferts temps réel. Par exemple, sur un théâtre d'opération d'urgences où est déployé un réseau ad hoc, les utilisateurs envoient des vidéos pour évaluer une situation, ou encore ont recours à des vidéo conférences pour établir des plans d'actions. Pour supporter la Qos requise par ces applications, il est nécessaire de prendre en compte la charge du trafic sur le réseau. Le protocole de routage cherchera à emprunter un réseau peu chargé de façon à accélérer la délivrance des informations. La notion de réseau chargé se traduit par un délai important, un taux de congestion ou encore un taux de paquet en émission...

L'évaluation de ces caractéristiques, ou le respect de contraintes les concernant, s'avère plus difficile dans un réseau ad hoc que dans un réseau filaire en raison du manque d'administration centralisée et de la grande variabilité de la bande passante (due à l'environement et à l'adaptation de débit de la transmission).

#### 1.1.1.4 Topologie dynamique et mobilité

Une caractéristique particulière aux réseaux ad hoc est la variation de leur topologie. Au-delà de la qualité de liaison qui peut être à l'origine de variation (la qualité de transmission est telle que la liaison est considérée comme inexistante) la mobilité

des éléments génère des changements de connectivité. Un nœud d'un réseau ad hoc se déplace, il peut joindre ou quitter un réseau ad hoc à tout moment, c'est-à-dire se retrouver hors de portée d'émission d'un nœud du réseau. Le protocole de routage, via une procédure de maintenance de routes, est en charge de la gestion de ces changements de topologie. De par sa conception il s'adapte naturellement à ceux-ci.

Une adaptation de routage, plus élaborée, consiste à prendre en compte le niveau de mobilité d'un élément de façon à choisir des routes stables, la stabilité de la route pouvant amener un gain de performance. En effet, si une route se rompt, le protocole de routage est à même (si cela est possible) d'en trouver une autre, mais il y aura eu des pertes de données générant une baisse de performances, et donc, en évitant de passer par des routes qui sont peut-être rapides mais de courte durée, le protocole de routage peut espérer augmenter son taux de délivrance d'informations. Le problème pour la mise en place de cette adaptation est d'évaluer la stabilité d'un lien, par exemple avec la mobilité d'un élément.

### 1.1.2 Processus d'adaptation

Nous proposons un schéma du processus global de l'adaptation (figure 1.2) en considérant trois ensembles d'éléments :

- l'environnement réseau, qui est perceptible au travers de métriques,
- le comportement à adapter, c'est-à-dire les algorithmes à appliquer selon les valeurs des métriques, et
- les performances que l'on cherche à optimiser.

#### 1.1.2.1 Eléments du processus d'adaptation

1. **Métrique**
   Précisons en premier lieu l'environnement réseau au travers du terme *"métrique"*, qui est l'objet principal de cette thèse. La métrique est une mesure indiquant l'état d'un nœud, de son voisinage, ou bien de l'ensemble du réseau par exemple la puissance d'énergie, la puissance de transmission, la force du signal, le trafic et la mobilité.
   La mesure peut consister en une combinaison de plusieurs paramètres comme le nombre des nœuds, le nombre des liens, l'état d'énergie etc... ; enfin, la métrique donne des valeurs qui peuvent être utilisées pour adapter un comportement de protocole.
   Plusieurs métriques sont utilisables par l'algorithme d'adaptation, par exemple un protocole de routage adapte son fonctionnement à la densité du réseau et à la mobilité [12].

2. **Types et Politique des algorithmes d'adaptation**
   Considérons à présent la typologie des algorithmes d'adaptation :
   *Auto-adaption et adaptation inter-couches* : les paramètres pris en compte dans le calcul de la métrique peuvent provenir d'une seule couche protocolaire ou de plusieurs couches. Dans le premier cas l'adaptation est qualifiée d'auto-adaptation alors que dans le second cas il s'agit d'adaptation inter-couches (cross-layer).

   Pour ces deux types d'adaptation, nous différencions deux politiques : paramètres et mode.
   *Adaptation de paramètres* : le protocole fixe ses paramètres en fonction de l'état de son environnement. Des exemples d'une telle adaptation sont :
   (1) le protocole de transport qui calcule sa fenêtre d'émission en fonction du paramètre taux d'engorgement ;
   (2) le protocole de routage qui choisit des voisins, liens, ou routes selon le paramètre de stabilité ou de délai ou encore ;
   (3) le protocole de routage qui ajuste son timer de diffusion d'annonces (pour les routages proactifs) en fonction de la mobilité du réseau : si le réseau est très mobile, le timer de diffusion est de courte durée alors qu'il est important en cas de faible mobilité [13].
   *Adaptation de mode* : le protocole change son comportement selon l'état de son environnement. Par exemple :

(1) le protocole de transport arrête d'augmenter son timer de retransmision s'il détecte un niveau de mobilité important [14] ;
(2) le protocole de routage travaille dans un mode (par exemple réactif, sans architecture) puis le nombre de mobiles augmente et il change de mode (par exemple proactif, avec architecture de cluster).

3. Performances
   Finalement, précisons les performances que l'adaptation cherche à optimiser. Nous retrouvons les caractéristiques de performances classiques des réseaux fixes : débit, délai, auquel se rajoute l'énergie.

Détaillons à présent la figure 1.2 qui montre le synopsis du processus d'adaptation.

- Initialement (figure 1.2-a), un nœud donné obtient une information (un ensemble de paramètres) qui peut provenir d'une seule couche protocolaire ou de plusieurs couches.
- Ensuite (figure 1.2-b), les paramètres sont pris en compte dans le calcul de métrique.
- Les résultats de calcul de métriques sont utilisés (figure 1.2-c) pour l'adaptation du comportement du protocole.
- Après cette adaptation, les paramètres du réseau évoluent, donnant lieu à de nouvelles informations. (figure 1.2-d).

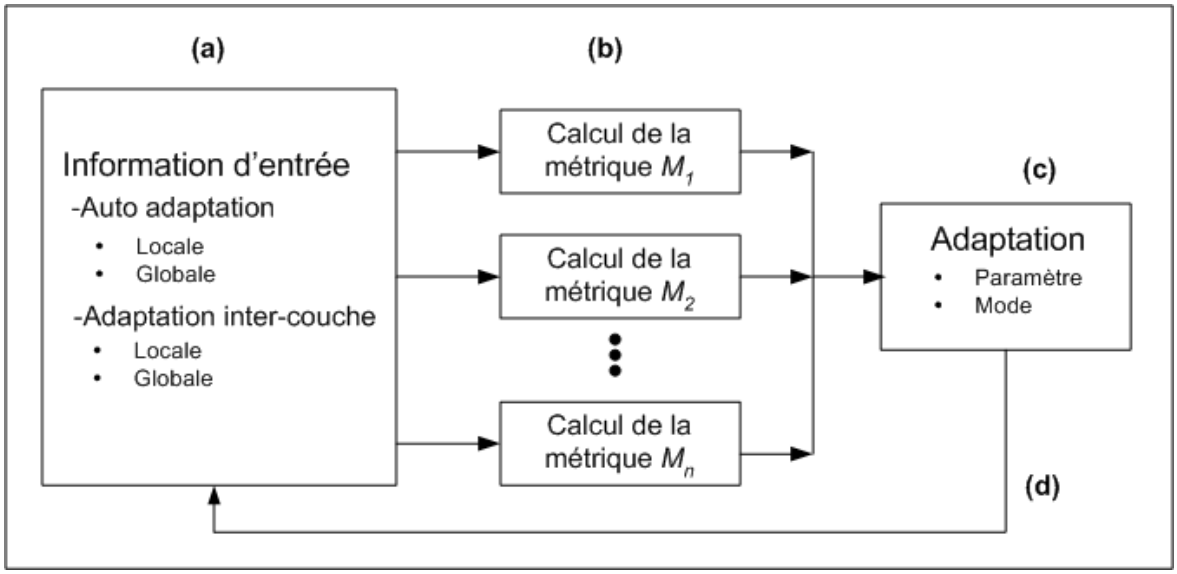



FIG. 1.2 – Synopsis du processus d'adaptation

#### 1.1.2.2 Architecture protocolaire

En ce qui concerne les modèles d'architectures protocolaires pour mettre en œuvre les deux types d'adaptations nous relevons 2 modèles : auto-adaptation et adaptation inter-couches.

**auto-adaptation**
L'auto-adaptation est une fonction classique des protocoles de communication, et

la nouveauté des travaux en réseaux ad hoc réside dans les objectifs de l'adaptation et non dans sa mise en œuvre. Les informations utilisées proviennent d'une seule couche du modèle OSI (ou TCP/IP) comme les couches physique, LLC/MAC, réseau, transport. Conformément au modèle protocolaire de ces architectures, les couches sont indépendantes de façon à garantir l'évolutivité de l'architecture. Un protocole peut être modifié sans avoir à changer les autres éléments. Pour satisfaire à cette exigence, les couches sont considérées comme séparées, chacune gère son espace mémoire avec ses informations. Les interfaces d'échanges entre couches sont standardisées, elles permettent le passage des paramètres nécessaires au fonctionnement du protocole, mais pas nécessairement des informations nécessaires à son optimisation. La conception des protocoles sous forme de modules hiérarchiques cache les paramètres locaux aux modules. Chaque protocole est optimisé indépendamment. La figure 1.3 présente la notion de *"couches séparées"* selon une modélisation par modules fonctionnels strictement hiérarchique.

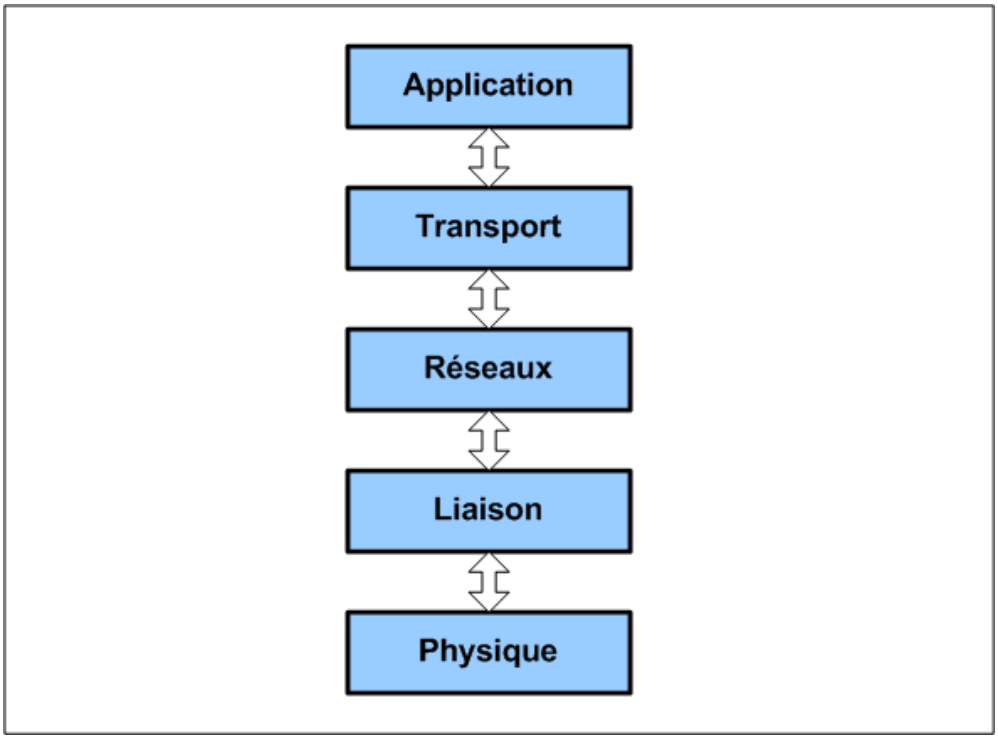



FIG. 1.3 – Modélisation modulaire strictement hiérarchique

L'auto-adaptation s'appuie sur une signalisation à même de fournir les informations d'environnement. Elle est relativement facile à mettre en œuvre dans la mesure où elle n'implique pas de grandes modifications sur l'architecture. Cependant l'ajout d'une signalisation supplémentaire et le temps nécessaire à sa prise en compte sont des facteurs limitatifs du gain de performances obtenu. L'approche inter-couches, présentée ci-après est une solution à ces limitations qui a fait l'objet de nombreux travaux.

### Adaptation inter-couches

La notion de *"cross-layer"* que nous traduisons par inter-couches, introduit une rup-

ture avec l'axiome de séparation des couches du modèle ISO. Elle suppose un échange d'informations entre des couches, éventuellement non adjacentes. La modélisation protocolaire, la méthodologie d'échanges ne sont actuellement pas normalisées, bien que certains standards, en particulier de l'IEEE, mettent en place un plan de contrôle ou un plan de gestion qui facilite la conception protocolaire inter-couches. L'avantage de l'inter-couche est comme en atteste les travaux présentés dans la section suivante, un gain de performance ; cependant, ces systèmes sont plus difficiles à mettre en place dans les architectures existantes, et à maintenir, que les auto-adaptations.

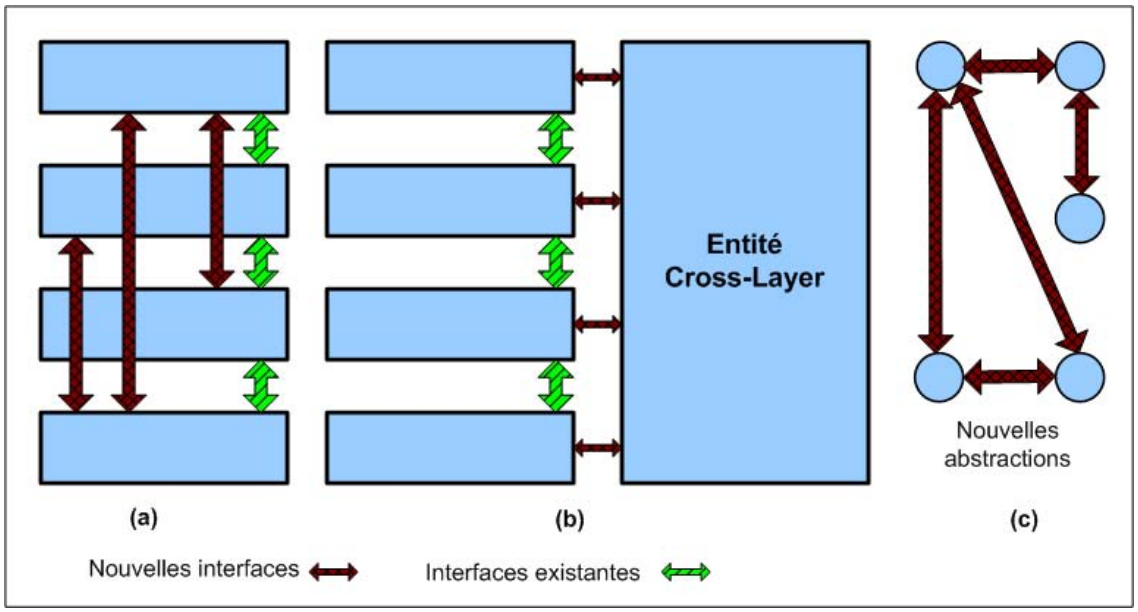



FIG. 1.4 – Classification des architectures inter-couches

**Architectures inter-couches existantes**

Trois catégories d'architectures sont proposées en [15] et [16] ; elles sont illustrées sur la figure 1.4 [17]. Leur mode de communication s'effectue par :

1. **Communication directe entre couches :** cette architecture (figure 1.4-a) permet aux couches, même non adjacentes, de coopérer par une communication directe. De nouvelles procédures sont intégrées aux couches traditionnelles pour permettre la réception et le traitement des données inter-couches.
2. **Interactions vers une entité intermédiaire :** Cette architecture (figure 1.4-b) utilise l'ensemble des entités qui assurent le fonctionnement normal de la pile protocolaire tout en définissant une entité intermédiaire pour gérer les interactions inter-couches. Plusieurs projets de recherche ont utilisé ce modèle avec des dénominations et des fonctionnalités exactes de cette entité qui varient [18][19][20]. Les avantages de cette modélisation sont de :
   - garder une compatibilité complète avec l'architecture classique en couches puisque aucune modification de ses fonctionnalités n'intervient ;
   - maintenir les avantages de l'architecture modulaire en couches isolées en offrant ainsi un environnement robuste de mise à jour, permettant l'addition,

suppression ou la modification des protocoles des différentes couches, sans avoir à modifier les autres couches ;
- garantir une évolution continue de l'entité intermédiaire en lui incorporant d'autres fonctionnalités sans gêner les autres protocoles.

3. **Nouvelles abstractions :** Cette architecture (figure 1.4-c) est particulièrement distincte des deux autres car elle présente des abstractions complètement nouvelles [21]. Elle adopte le concept de l'architecture protocolaire sans couche *"non-layered protocol architecture"*. Son intérêt est sa grande flexibilité obtenue avec un minimum de problèmes d'interactions et de communications entre ses différents composants. Ce type d'architecture se réalise par une conception orientée services.

**Cohérence d'adaptations multiples**

Un problème de cohérence se pose dans le cas des architectures protocolaires ayant des adaptations multiples qui sont situées à différents niveaux de la pile protocolaire et qui sont soit, inter-couches, soit, mixtes : inter-couches et auto-adaptation (le cas des auto-adaptations ne pose pas de problème). Détaillons :

Si un protocole de niveau $N$ modifie des paramètres également utilisés dans le calcul d'une métrique par un niveau supérieur, la véracité de la métrique, c'est-à-dire sa capacité à refléter l'environnement, est remise en cause. Une façon de régler ce problème, proposée dans l'architecture Widdens [22] est de déclencher une adaptation de niveau $N$ si celles de niveau *N-1* se sont révélées inefficaces. Nous proposons d'introduire un état de prise en compte (limité par timer) de l'optimisation d'un niveau $N$ pour déclencher des optimisations d'un niveau *N+1*. Notons que dans les architectures traditionnelles, ce problème ne se pose pas car chaque protocole auto-adapte son comportement à partir de paramètres internes, les performances ne sont peut-être pas optimisées mais elles ne sont pas non plus dégradées.

#### 1.1.2.3 Portée des paramètres pour le calcul des métriques : la vue

Les informations utilisées pour l'adaptation, outre leur niveau protocolaire dans l'architecture logicielle, se différencient par leur niveau dans l'architecture matérielle du réseau. Nous considérons 3 niveaux (figure 1.5) selon la portée, que nous appelons encore vue, de l'environnement qu'ils décrivent : niveau nœud, niveau voisinage, niveau réseau.

- **Vue nœud :** la figure 1.5-a présente la vue locale d'un nœud donné, le nœud connaît ses états, par exemple, l'énergie disponible, la puissance de transmission, sa position, et sa vitesse.

L'avantage de travailler à partir d'une vue locale est la facilité de la mise en œuvre de l'adaptation car il n'y a pas besoin de modifier l'architecture logicielle de toutes les entités. Cependant pour de nombreux objectifs d'adaptation il est nécessaire d'avoir également une connaissance minimale du réseau et donc de son voisinage.

- **Vue voisinage locale avec entité modifiée :** la figure 1.5-b présente la vue du voisinage local à un nœud donné : le nœud connaît ses états relativement à ses voisins par des échanges de messages. Ces échanges se font à l'occasion de l'envoi de messages de la pile de protocole que l'on cherche à adapter. Par

exemple, l'échange d'un message HELLO dans le protocole AODV ou dans le protocole OLSR. Grâce à ces échanges le nœud obtient des informations, telles que la durée de connexion, la fréquence de changements des liens, la force du signal, le nombre des voisins, ou encore le trafic en entrée par le voisin. Pour que le nœud puisse utiliser ces informations, il doit les enregistrer et modifier ses entités pour ce faire.

L'avantage de définir l'adaptation à ce niveau est qu'il n'y a pas besoin de modifier l'entête des message, il n'y a pas de surcoût de signalisation ; en contrepartie l'adaptation est faite à partir d'une approximation de l'état du réseau et l'optimisation des performances reste locale.

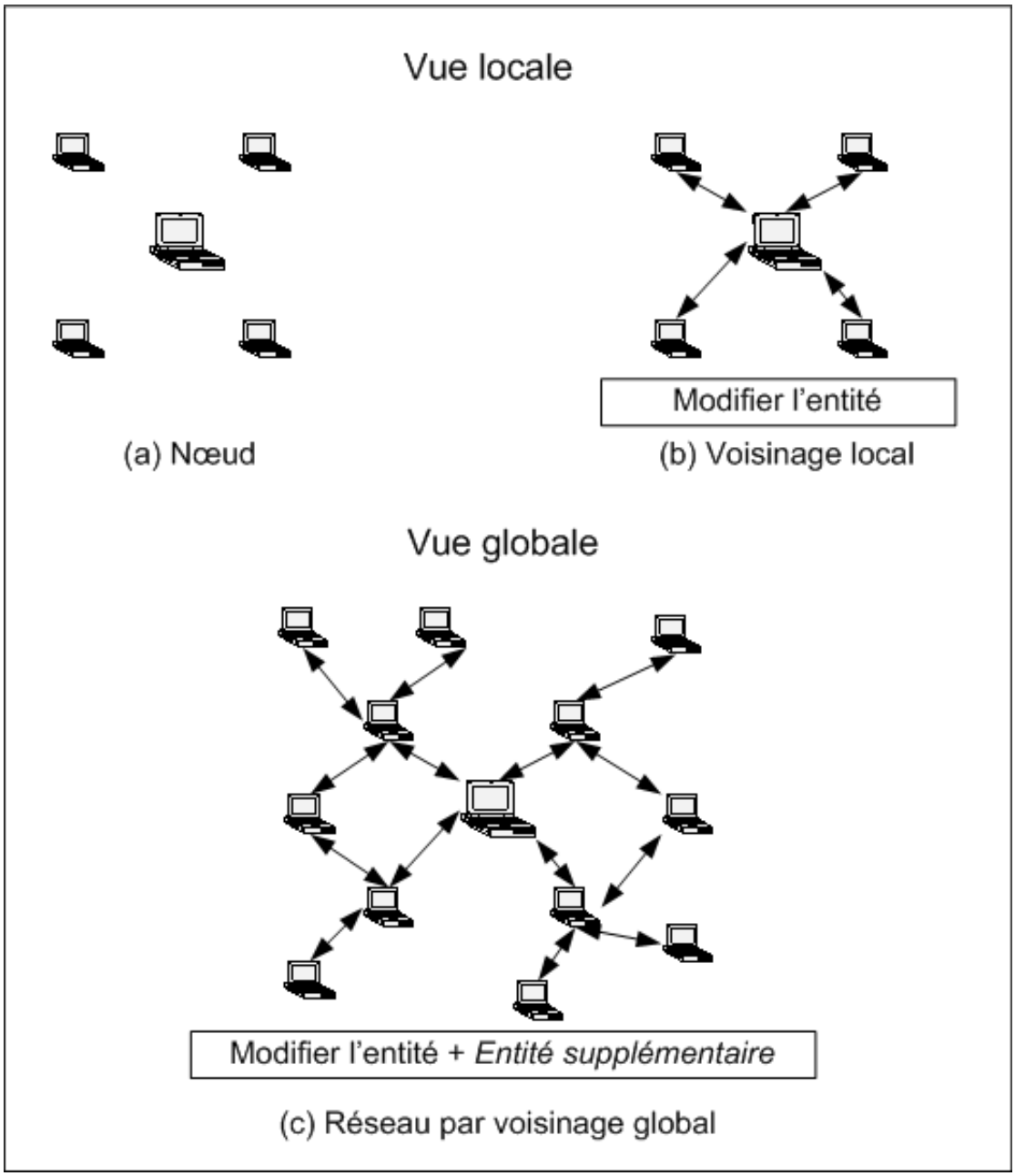



FIG. 1.5 – Vues des paramètres pour le calcul des métriques

– **Vue réseau  avec entité et message modifiés :** la figure 1.5-c présente la vue de tous le voisinage d'un nœud donné. Un réseau ad hoc n'ayant pas d'administration centralisée, la connaissance est répartie sur tous les nœuds et se propage par des échanges d'informations additionnels. Généralement, le nœud connaît ses états relatifs à ses voisins par des échanges de messages qui ont été modifiés pour prendre en compte les informations nécessaires. Pour mettre en place une nouvelle adaptation, en reutilisant les standards existants, le nœud doit modifier ses entités et ses protocoles.

## 1.2 Travaux sur l'adaptation en réseaux ad hoc

Maintenant que nous avons synthétisé le processus d'adaptation protocolaire, nous l'illustrons au travers d'exemples extraits de la littérature.

Le but de cette présentation est davantage de dégager les métriques utilisées que les algorithmes d'adaptation. Elle sera l'occasion d'illustrer les problèmes de cohérence entre des adaptations effectuées à plusieurs niveaux.

### 1.2.1 Synthèse

En s'appuyant sur les caractéristiques que nous avons dégagées dans la section précédente nous classifions les travaux menés sur les protocoles adaptatifs en réseau sans fil dans le tableau 1.1. Nous allons présenter à la suite ces travaux en les ordonnant selon leur objectif d'adaptation : l'énergie disponible, l'état du canal, la charge de trafic et la dynamique de la topologie.

TAB. 1.1 – Synthèse des travaux sur l'adaptation en réseaux ad hoc

| **Adaptation à** | **Métrique** | **Nom de protocole ou l'algorithm** |
|---|---|---|
| **Energie disponible** | **Energie** | Minimum Battery Cost Routing (MBCR)<br>Min-Max Battery Cost Routing (MMBCR)<br>MRPC (Maximizing network lifetime for reliable routing in wireless environments) |
| **Etat de la liaison** | **-Force du signal** | Signal Stability-based Adaptive Routing (SSA)<br>Associativity-Based Routing (ABR)<br>Advanced signal strength based link stability estimation modèle (ASBM)<br>Link quality of route |
| | **-Taux de perte** | Auto-Rate Fallback (ARF)<br>Loss-Differentiating ARF (LD-ARF)<br>Collision-Aware Rate Adaptation (CARA)<br>Receiver-Based Auto Rate (RBAR)<br>Differential Rate Adaptation (DRA) |
| **Charge de trafic** | **QOS** | Dynamic Load-Aware Routing (DLAR)<br>Load-Balanced ad hoc Routing (LBAR)<br>Free-Degree Adaptive Routing (FDAR) |
| **Dynamique de la topologie** | **Densité et Mobilité** | Adaptive Zone Routing Protocol (AZRP)<br>Fast Optimized Link State Routing (F-OLSR)<br>Adaptive Routing Protocol (ARPM)<br>Cluster Source Routing (CSR) |

### 1.2.2 Adaptation à l'énergie disponible : métrique énergie

Nous présentons trois exemples d'adaptation au niveau routage qui reposent sur un calcul de métrique prenant en compte l'état de l'énergie disponible sur un nœud.

- Le premier exemple, **Minimum Battery Cost Routing (MBCR)**, calcule sa métrique à partir de l'information locale au nœud : sa puissance disponible.
- Le second exemple, **Min-Max Battery Cost Routing (MMBCR),** utilise la même information mais nécessite une vue globale pour faire son adaptation : le choix d'une route se fait en ayant la connaissance de l'énergie disponible sur tous les nœuds.
- Le troisième exemple, utilise une métrique dont le calcul repose sur deux informations : la puissance disponible mais également l'état du canal. C'est l'état du canal qui permet de calculer l'énergie nécessaire à la transmission. La métrique est alors le ratio puissance disponible sur puissance nécessaire.

#### Minimum Battery Cost Routing (MBCR)

MBCR [23] est un protocole de routage qui calcule la somme de la puissance résiduelle des nœuds mobiles puis choisit la route avec la somme maximale de puissance résiduelle. La métrique d'adaptation est la puissance disponible sur un nœud, nommée encore capacité résiduelle.

La formulation du problème pour choisir la route, définit la fonction coût de la pile d'un nœud $i$, à l'instant $t$, compris entre *0* à *100* par :

$$f_i(c_i^t) = \frac{1}{(c_i^t)} \tag{1.1}$$

La valeur de la fonction de coût pour le nœud $n_i$ augmente avec la diminution de capacité de pile. Le coût de pile $R_j$ pour la route $i$, comprenant $D$ nœuds, est

$$R_j = \sum_{i=0}^{D_j - 1} f_i(c_i^t) \tag{1.2}$$

$$R_i = min\left\{R_j | j \varepsilon A\right\} \;\; (A\, est\, l'ensemble\, des\, routes\, possibles) \tag{1.3}$$

La route choisie est celle qui a un coût $R_i$ minimal parmi toutes les routes possibles. Avec ce critère de sélection la route choisie peut passer par des équipements ayant beaucoup de batteries alors que certains équipements auront une batterie très faible qui sera épuisée par les premiers relayages.

#### Min-Max Battery Cost Routing (MMBCR)

MMBCR [24] utilise une métrique équivalente à celle de MBCR mais propose un critère différent pour choisir une route, afin d'éviter d'avoir une route qui va se rompre rapidement si certains des nœuds qui la composent ont des batteries faibles. Le coût d'une route est défini à partir de la capacité disponible minimale

sur les nœuds qui la composent. La fonction de coût d'une route (Equation. 1.2) est modifiée comme suit :

$$R_j = \underset{i \varepsilon route\, j}{max}\, f_i(c_i^t) \tag{1.4}$$

et le critère de choix de la meilleure route est également modifié par

$$R_i = min\,\{R_j | j \varepsilon A\} \tag{1.5}$$

La durée de vie de la route ayant le coût de batterie le plus important est plus petite que celle de toutes les autres routes. Elle est déterminée par le premier nœud de la route qui épuise sa batterie. L'objectif est alors d'éviter la route avec les nœuds ayant le moins de capacité parmi tous les nœuds dans toutes les routes possibles. Bien qu'il ne puisse pas être certain que la consommation totale de puissance soit optimisée, la vie de la route est notablement augmentée par rapport au cas précédent.

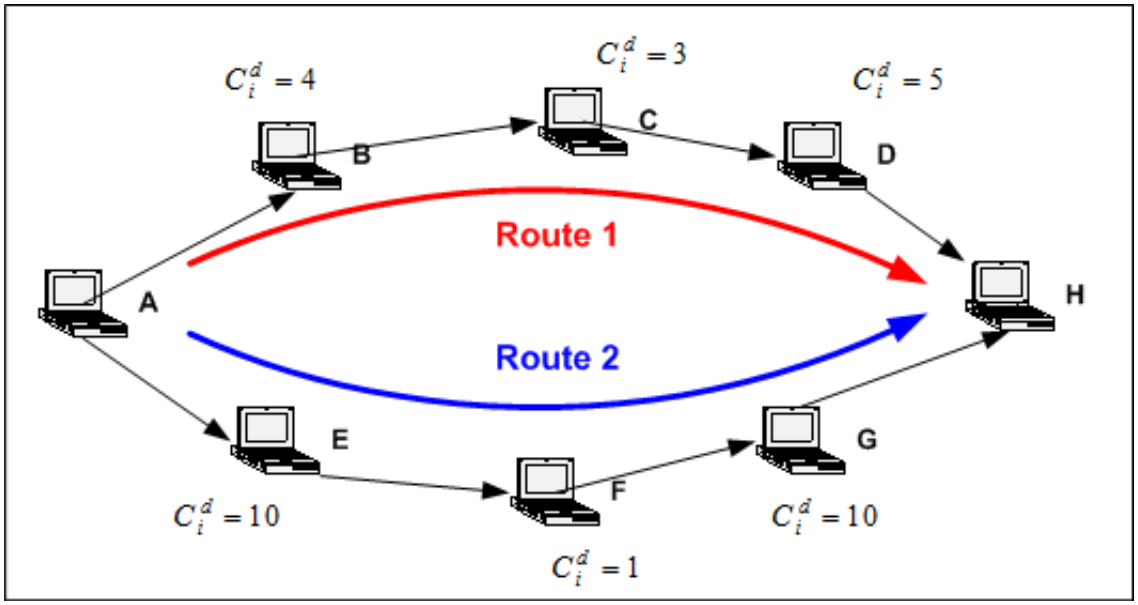



FIG. 1.6 – Choix de route adaptatif à l'énergie dans MMBCR

Sur la figure 1.6 [25], la source A dispose de deux routes pour atteindre la destination H. Elle choisit la route 1 car la capacité minimale de la route 1 (= 3 au nœud C) est plus importante que celle de la route 2 (= 1 au nœud F).

### MRPC (Maximizing network lifetime for reliable routing in wireless environments)

Une autre métrique de l'état de l'énergie disponible est définie dans MRPC [26], elle prend en compte l'énergie qui sera dépensée pour émettre un paquet sur un lien spécifique. MRPC choisit le chemin qui a la plus grande capacité à émettre de futurs paquets au nœud *"critique"* : le nœud qui a la plus petite capacité résiduelle de transmission de paquet.

La formulation de la capacité est :

$$C_{i,j} = \frac{B_i}{E_{i,j}} \tag{1.6}$$

Où $B_i$ est la puissance résiduelle de pile dans le nœud $i$ et $E_{i,j}$ est l'énergie nécessaire à la transmission entre le nœud $i$ et le nœud $j$. Notons que cette expression rend compte du coût de transmission lié à la distance entre les nœuds, c'est-à-dire du bruit de la liaison. Le fonctionnement de l'algorithme est alors le même que MMBCR, sauf qu'il maximise le minimum du $C_{i,j}$. La distinction est simplement liée à une formulation inverse de la métrique (c.-à-d. avec $\frac{1}{C_{i,j}}$, l'algorithme serait identique). De cette façon il maximise la vie du réseau.

$$Life = \underset{(i,j)\varepsilon P}{min} \{c_{i,j}\} \tag{1.7}$$

$$P_{candidate} = arg\,max\,\{Life_p | P\,\varepsilon\,toutes\,les\,routes\,possibles\} \tag{1.8}$$

**Réflexions : à propos de l'obtention de la métrique**

Les travaux présentés proposent des algorithmes classiques de calcul de routes avec contraintes qui ont été élaborés dans le cadre des réseaux fixes pour prendre en compte la qualité de services ou pour mettre en œuvre de l'ingénièrie de trafic. Leur principale innovation concerne la métrique qu'ils utilisent, l'état de puissance, calculée à partir du paramètre *"capacité de la batterie"* et *"puissance d'émission sur un lien"*. Concernant les problèmes posés par l'adaptation, nous pouvons remarquer que dans la mesure où l'adaptation ne modifie pas la valeur de la métrique, elle n'a pas pour effet d'augmenter la puissance de la batterie mais uniquement d'éviter une décroissance trop rapide. Il ne se pose pas de problème de cohérence d'adaptations multiples. Notons néanmoins que les travaux présentés peuvent poser un problème de sécurité. Alors que la connaissance de la bande disponible peut être utilisée pour bloquer un nœud et le congestionner, celui-ci a toujours le recours de détruire les informations. Par contre, la connaissance de l'état de puissance d'un nœud peut être utilisée pour des attaques visant à détruire un nœud. Il est alors important de sécuriser la signalisation relative aux valeurs de la puissance disponible de chaque nœud. Nous verrons pour la suite des exemples de signalisation par protocole de routage de type DSR qui est un routage par la source qui permet à un nœud d'avoir la connaissance des états des nœuds de la route.

### 1.2.3 Adaptation à l'état de la liaison : métrique canal

Pour prendre en compte la variabilité des débits des liens, le calcul des métriques s'appuie principalement sur deux informations : la force du signal, et le taux de perte. Nous illustrons comment elles sont utilisées pour des adaptations de routage et de niveau physique.

#### 1.2.3.1 Métrique sur la force du signal

La force du signal transmis rend compte de l'état du canal, et plus précisément de sa *"stabilité"*. Son calcul est effectué soit à partir de mesures réelles du signal (SSA, ABR, ASBM) soit à partir de modèle analytique (Link quality of route).

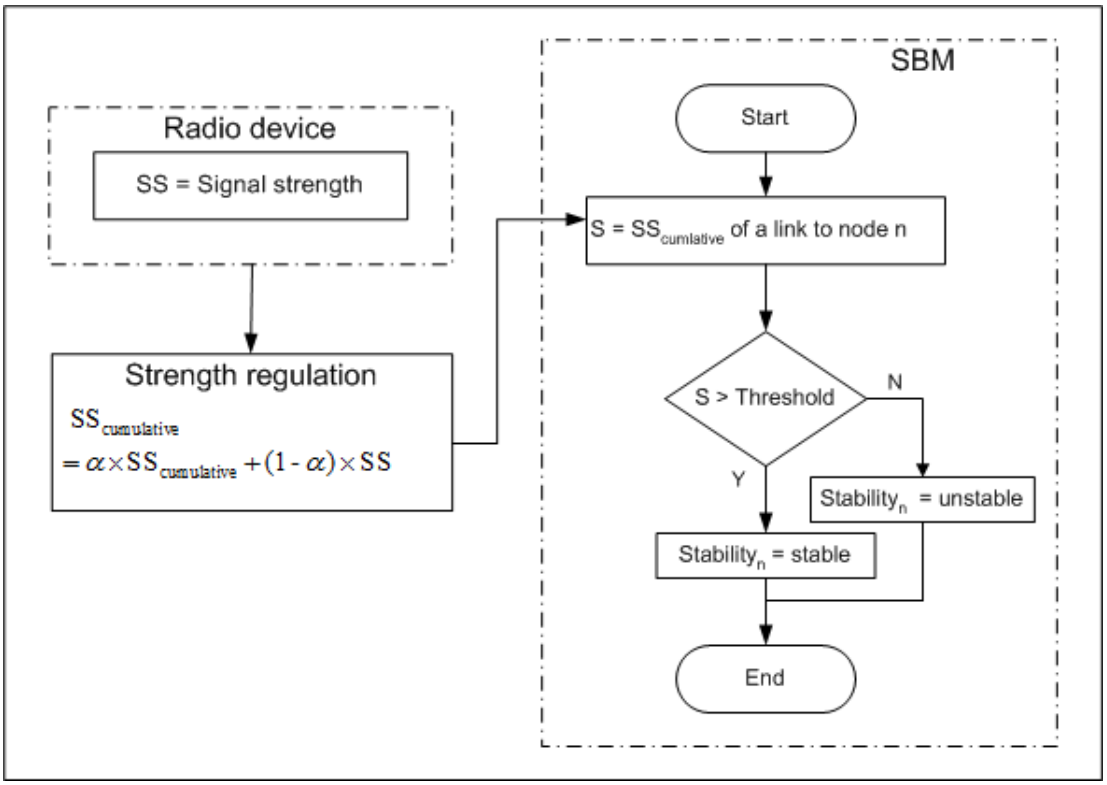



FIG. 1.7 – Schéma fonctionnel de SBM

**Signal Stability-based Adaptive Routing (SSA)** SSA [27] utilise l'information de force du signal pour estimer la stabilité du lien selon le modèle *"Signal strength Based link stability estimation model (SBM)"* (figure 1.7). Chaque nœud mobile mesure la force du signal des autres nœuds. Si un nœud reçoit un signal fort d'un voisin, alors les deux nœuds sont proches et le lien entre eux peut être considéré comme stable. La notion de fort est définie à partir d'un seuil. L'hypothèse de ce travail est que généralement plus les nœuds sont rapprochés plus il y a de chances que le lien soit fort, (il peut y avoir des obstacles sur la liaison qui rendent caduque cette proposition). Le protocole de routage se propose de choisir des routes constituées de liens courts (considérés comme stables). Le nombre de nœuds n'est alors pas minimisé contrairement aux algorithmes classiques. Cependant il est montré que

cette approche améliore le délai. S'il échoue, SSA cherche une route sur tous les liens disponibles, en utilisant un algorithme de requête réponse par la source similaire au routage standard DSR.

**Associativity-Based Routing (ABR)** ABR [28] utilise une information différente de celle de SBM pour calculer sa métrique. La force du signal n'est pas déterminée sur tous les signaux reçus mais sur un signal spécifique (le signal pilote) émis périodiquement. Ce qui présente l'avantage d'avoir l'état de la liaison même s'il n'y a pas de trafic à émettre, et en contrepartie l'inconvénient de consommer de la bande passante. La stabilité du lien est déterminée par l'envoi de signaux pilote avec le modèle *"Pilot signal based link stability estimation model (PBM)"* (figure 1.8). Chaque nœud émet périodiquement un signal pilote. Quand un nœud reçoit de ses voisins le signal pilote, il l'enregistre. S'il reçoit continuellement des signaux d'un voisin et que le nombre de signaux reçus consécutivement dépasse un certain seuil, il considère le lien entre eux comme stable. Si un nœud ne peut pas recevoir de signal pilote d'un lien dans une limite de temps, il considère alors ce lien comme instable. En raison de différence dans le calcul de métrique, ABR se différencie de SSA par le type de route sélectionné. Dans SSA, une route est composée des liens les plus courts avec des signaux forts, dans ABR, un long lien avec une force de signal faible peut être utilisé s'il est stable, (si les deux nœuds d'extrémité, sont des nœuds stables sans mobilité).

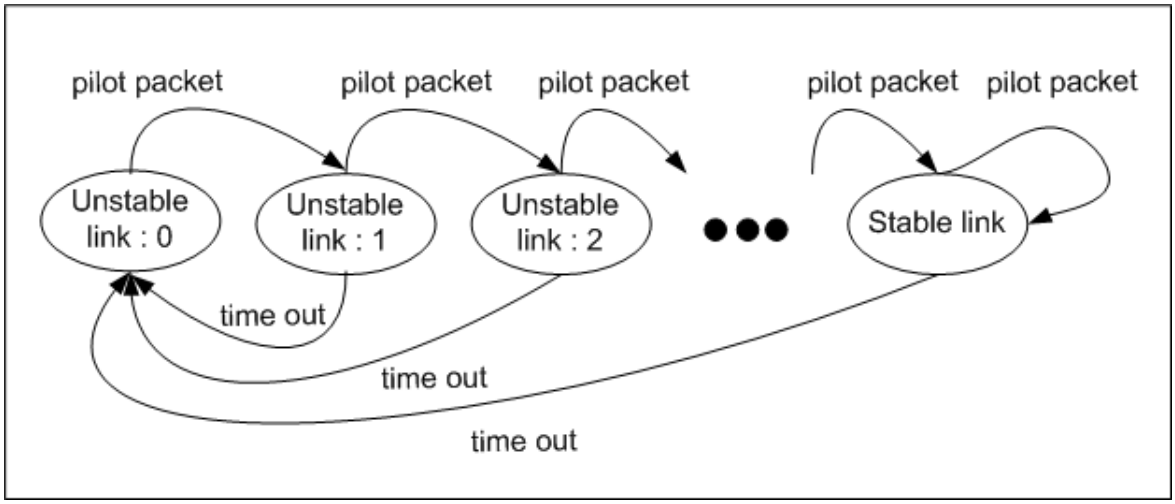



FIG. 1.8 – Modèle de stabilité du signal pilote dans le routage ABR

**Advanced signal strength based link stability estimation modèle (ASBM)** ASBM [29] est proposé (figure 1.9) pour améliorer la méthode d'évaluation de la stabilité de lien du protocole SSA grâce à un nouveau calcul de métrique. Le modèle SBM est légèrement modifié pour prendre en compte, en sus de la force de signal, la dérivée de sa mesure : la force différenciée du signal (differentiated signal strength - DSS). DSS indique si la force du signal augmente ou diminue. S'il augmente, cela est interprété par le fait que les deux nœuds se sont rapprochés, et que le lien entre eux aura une durée de vie plus longue. Alors que dans SSA, seuls les liens dont la force

du signal dépasse une certaine limite, sont considérés comme stables ; dans ASBM les liens ayant un signal faible mais qui augmente, cas de nœuds qui se rapprochent, sont également considérés comme stables.

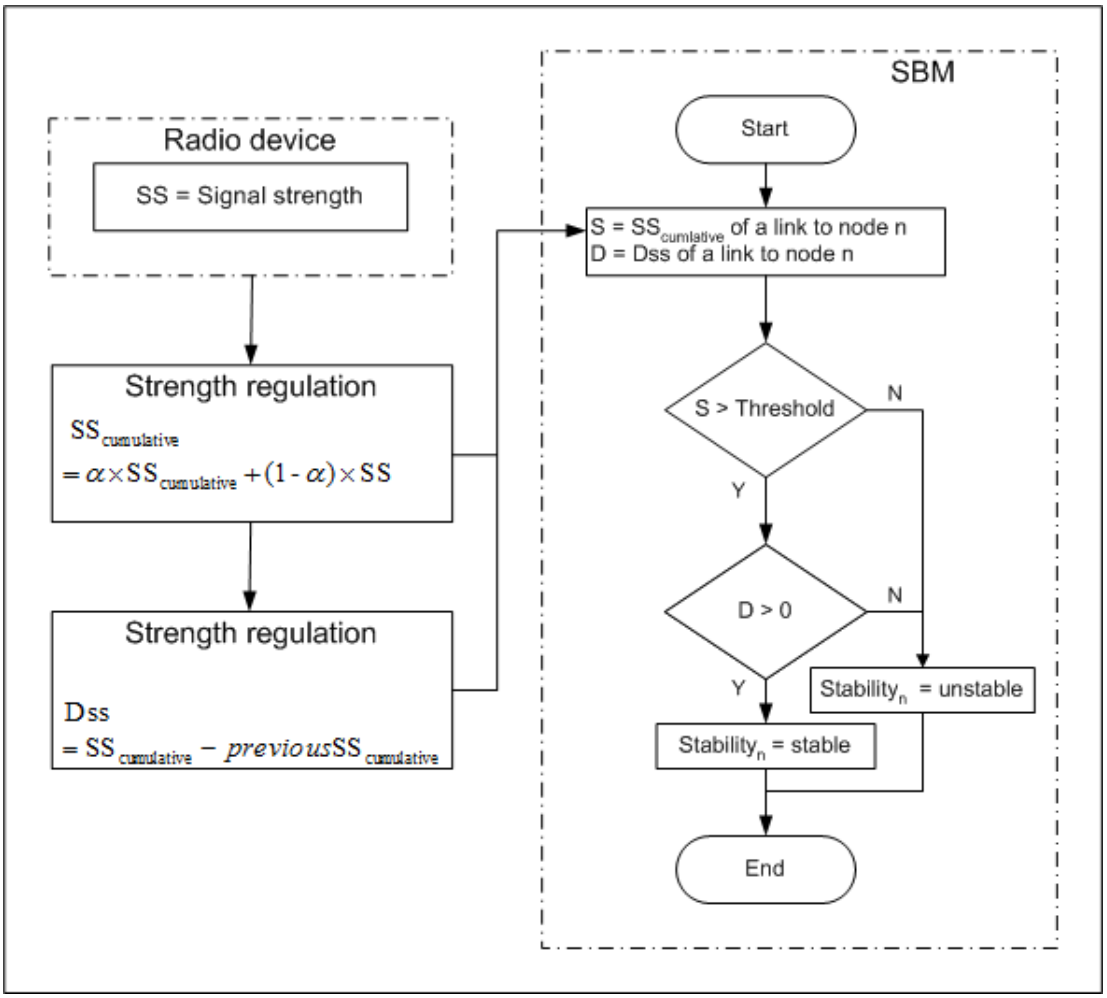



FIG. 1.9 – Schéma fonctionnel de ASBM

Comme pour SSA, le routage ASBM utilise deux étapes. Dans la première étape, le nœud source essaie de chercher une route, la plus courte avec les liens stables. Si ceci échoue, il entre dans une deuxième étape qui cherche une route avec tous les liens disponibles. Après avoir trouvé une route, le protocole surveille la validité de celle-ci. Si la route est invalide, il cherche cycliquement une nouvelle route.

**Réflexions : à propos de la validité de la métrique**

Les études présentées cherchent à évaluer la stabilité d'un lien en espérant qu'un lien stable à l'instant $t$ restera stable dans le futur. Ainsi dans SSA il est supposé que si la force du signal augmente c'est que le mobile se déplace. Mais selon le déplacement cela peut également dire que le nœud va croiser le nœud mesureur puis sortir hors de la zone de transmission. L'échelle de mesure est alors un facteur clé de la pertinence de la métrique. Il devrait pouvoir être associé si c'est possible à la connaissance du mouvement. ASBM introduit la notion de dérivée dans son calcul de métrique de

stabilité de façon à refléter le mouvement, mais il ne prend cependant pas en compte la variation de la qualité du canal pour cause de perturbations environnementales. Si deux nœuds qui se déplacent sont perturbés par un obstacle géographique, il se peut que, l'obstacle passé, le lien redevienne stable. Là encore la connaissance du mouvement permettrait de résoudre ce problème d'interprétation. Par ailleurs nous relevons un problème de cohérence lié à la métrique et aux adaptations qui l'affectent. Puisque la stabilité repose sur l'évaluation d'un rapport signal sur bruit elle est influencée par les perturbations de la qualité de la liaison intrinsèques à la propagation sans fil, qui peuvent être corrigées par une technique de modulation adaptative. Un signal de bonne qualité peut alors être obtenu au prix d'un débit d'émission faible, la route sera stable mais lente. De plus comme la couche physique, niveau 1, modifie un paramètre d'une métrique utilisée par la couche réseau, niveau 3, ceci risque de provoquer un mécanisme d'oscillation peu efficace.

**Link quality of route** [30] utilise la force du signal pour prédire la distance entre deux nœuds. Le calcul de la métrique utilise un modèle analytique, pour des nœuds mobiles ayant un déplacement continu prédictible, tels des trains ou des avions. Lorsque l'on considère des nœuds mobiles, le maximum de la force du signal est atteint lorsque les nœuds se croisent alors que le minimum est atteint lorsqu'ils sont le plus éloignés. Le facteur de qualité de lien $L$ pour une route à $M$ sauts est défini comme :

$$L = \prod_{s=0}^{s=M} (1 - Q((P_{pred_s} - P_{th})/\sigma)) \tag{1.9}$$

Où Q(x) est une Q-FONCTION standard (Q(x) est la probabilité qu'une variable aléatoire normal, moyenne nulle et variance de *1* excède $x$), $P_{pred_s}$ est la valeur prédite par le nœud $N$ du signal qu'il recevra de la part du nœud *N-1* ; $P_{th}$ est le seuil de réception et $\sigma$ est la variance du signal (un modèle de Gauss est supposé). Le facteur de qualité de lien est le produit de probabilités calculées pour chaque saut à un instant donné pour que dans le futur le signal ait une force plus importante que celle du seuil de réception. Les nœuds utilisent une extrapolation de position linéaire basée sur la position géographique actuelle et l'information de vélocité pour estimer les positions de tous les nœuds dans un futur de 1 seconde. Ces positions, avec l'équation 1.9, ont été utilisées pour obtenir $P_{pred_s}$.

$$P_{pred_s} = P_t G_t G_r \Gamma_c \Gamma_d \begin{cases} \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} \; si \; d < \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda} \\ \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \; si \; d > \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda} \end{cases} \tag{1.10}$$

Où : $P_t$ est la puissance d'émetteur, $G_t$ est le gain de l'antenne d'émission, $G_r$ est le gain de l'antenne de réception, $\Gamma_c$ est le facteur de perte pour les avances d'antenne, $\lambda$ est la longueur d'ondes, $\Gamma_d$ est le cœfficient de pertes de diffraction sur le chemin direct, $d$ est la longueur du chemin direct (la distance entre les nœuds), $h_t$ et $h_r$ sont les hauteurs de l'émetteur et du récepteur.

Cette étude prend en compte le mouvement grâce à une connaissance à priori de la vitesse de déplacement, du positionnement, et des caractéristiques d'antennes du récepteur. L'intérêt de la métrique est d'éviter les problèmes de transmissions

plutôt que de les réparer. Son inconvénient est de nécessiter des ressources matérielles (GPS) et de signalisation. Par ailleurs la véracité de la prédiction est liée à l'hypothèse de linéarité du déplacement qui peut ne pas être vérifiée.

#### 1.2.3.2 Métrique sur le taux de perte

Les travaux précédents mesurent l'évolution de la force du signal. Nous indiquons à la suite une autre façon de représenter la variabilité des liens ad hoc en utilisant le taux de perte. Ce taux de perte est utilisé pour adapter le débit de la transmission.

Le mécanisme d'adaptation de débit qui n'est pas normalisé par les spécifications 802.11 [8], est conçu de différentes manières selon l'information utilisée pour définir le taux de perte. Les mécanismes sont divisés en deux catégories : boucle ouverte et boucle fermée. Dans une approche de boucle ouverte, l'expéditeur prend la décision seulement en se fondant sur sa propre perception, comme le résultat d'une transmission précédente de donnée ou la qualité de réception d'un acquittement. Dans une conception en boucle fermée, l'expéditeur sollicite explicitement le récepteur pour qu'il estime la chaîne et lui renvoie cette information. En boucle ouverte la métrique est en vue locale, en boucle fermée elle a une portée voisinage.

- Le premier exemple, ARF [31], est une auto-adaptation boucle ouverte de la couche physique, elle utilise des informations, en vue locale. Après une perte de données, l'émetteur retransmet sa trame avec un débit plus faible. L'adaptation suppose implicitement que les problèmes de transmission sont dus à un mauvais état du canal de propagation et qu'ils peuvent être résolus par une diminution du débit. Mais il se peut que les données soient perdues suite à des collisions provoquées par les accès multiples au canal.
- Les exemples suivants, LD-ARF [32], CARA [33] et DRA [34], proposent des adaptations inter-couches qui utilisent un calcul sur des informations de la couche MAC pour différentier les causes ayant provoqué la perte de données. En cas de perte de données l'émetteur ne diminuera son débit que s'il croit que la perte a été causée par une mauvaise qualité de la chaîne de transmission ; autrement, il retransmet simplement la trame au même débit.
- Finalement, RBAR et DRA sont des adaptations avec boucle fermée qui nécessitent une signalisation pour obtenir la métrique d'adaptation calculée au récepteur.

**Auto-Rate Fallback (ARF)** ARF de Lucent Technologies [31] est une adaptation de débit en boucle ouverte très largement adoptée dans les appareils 802.11. Le mécanisme est analogue à celui de TCP qui augmente son débit d'émission tant qu'il n'y a pas de perte. Dans AFR, après un certain nombre (10 par défaut) de transmissions de données consécutives réussies à un débit fixé, s'il y a un débit plus élevé de disponible, l'expéditeur l'utilise pour les transmissions suivantes. Si, une transmission de données échoue (un nouvel essai est par défaut autorisé pour chaque débit) l'émetteur diminue ce débit pour retransmettre la même trame de données. Le débit est diminué jusqu'à ce que la transmission réussisse.

**Loss-Differentiating ARF (LD-ARF)** [32] utilise deux méthodes de différenciation de perte, selon que le mécanisme RTS/CTS (Request to Send/Clear to Send) du 802.11 est ou non utilisé. Dans le mode de RTS/CTS, la perte d'une trame après une réception réussie d'un CTS est considérée comme étant due à une mauvaise qualité de chaîne, car, comme la bande passante a été réservée par l'échange RTS/CTS,

il ne peut y avoir de collision. Dans ce cas, un débit plus faible doit être utilisé. D'autre part, si un CTS attendu n'est pas reçu, ceci est interprété comme une collision qui ne doit pas entraîner une diminution de débit. Dans le mode normal où RTS/CTS est désactivé, en supposant qu'il n'y ait pas de terminaux cachés, une trame de données mal reçue mais dont l'entête a pu être décodée déclenche de la part du récepteur l'émission d'un acquittement négatif. Le raisonnement de LD-ARF est alors de dire que dans de mauvaises conditions de chaînes, en général le taux d'erreur binaire est tel que sur une série de bits très courte comme l'entête de la trame il est toujours possible de la reconstruire et donc d'envoyer un acquittement négatif ; sa réception est alors interprétée comme une mauvaise qualité de chaîne et déclenche une réduction de débit. Par contre, la perte d'une donnée sans réception de non acquittement est interprétée comme une collision et ne provoque pas de baisse de débit.

**Collision-Aware Rate Adaptation (CARA)** L'idée clé de CARA [33] est que la station émetteur combine adaptativement un échange RTS/CTS avec la fonction Clear Channel Assessment (CCA) qui détecte que le canal est libre ou occupé. CARA a deux méthodes pour détecter des collisions. La première est similaire à celle de LD-ARF, c'est-à-dire, un échange réussi de RTS/CTS suivi par une trame de données ; pour limiter l'utilisation du RTS/CTS (consommateur d'énergie, et généralement pas activé), celui-ci n'est activé que suite à un test de RTS effectué après une perte de données. La deuxième méthode pour différencier les collisions des erreurs de transmission utilise CCA (c'est le mécanisme de base des algorithmes CSMA/CA : la chaîne est déclarée occupée lorsque le niveau d'énergie mesuré à l'antenne dépasse une valeur de seuil). Après la fin de son émission, la station (après une durée SIFS) écoute le support. Si elle détecte que le canal est occupé alors qu'elle ne reçoit pas d'acquittement, elle en déduit qu'il y a eu collision ; le débit n'est alors pas diminué. Selon les longueurs de trames qui sont concernées par la collision, il est possible que ce mécanisme soit inutile car la collision ne sera pas entendue, le mécanisme de test de RTS est alors déclenché.

**Receiver-Based Auto Rate (RBAR)** [35] est un des premiers mécanisme d'adaptation par boucle fermé pour les réseaux IEEE 802.11. L'augmentation de débit est effectuée que si le récepteur indique sa faisabilité. Dans RBAR, l'expéditeur transmet toujours une trame RTS avant d'émettre une trame de données. A sa réception, le récepteur mesure le SINR (Signal to Interference-plus-Noise Ratio) instantané et en se basant sur le taux d'erreur binaire acceptable (BER) il détermine le débit le plus élevé qui peut être utilisé. Cette information est retransmise à l'expéditeur par une trame CTS modifiée.

**Differential Rate Adaptation (DRA)** [34] utilise une approche hybride de boucle ouverte et fermée. Il y a un seul échange de RTS/CTS pour plusieurs échanges de trames de données, acquittement. Chaque acquittement contient un bit positionné par le récepteur pour indiquer à l'émetteur la possibilité d'augmenter le débit.

**Réflexions : à propos du niveau protocolaire à l'origine de la mesure**
Nous avons décrit des mécanismes d'adaptation entre la couche MAC et la couche physique permettant de prendre en compte l'état du canal et de le faire évoluer. Si nous y ajoutons dans un même système des adaptations de routage reposant sur la mesure de liens telles que vues précédemment, se pose un problème de cohérence dans les adaptations : quand faut-il mesurer pour obtenir une mesure représentative et éviter les oscillations ? Nous proposons de simplifier ce problème en ne mesurant plus des paramètres de niveau 1 pour qu'ils soient utilisés par le niveau 3 mais des paramètres de niveau 2. Le routage s'adapte en fonction du taux d'erreur de niveau trame pour mesurer la stabilité du lien plutôt qu'en fonction de la force de signal. Ainsi l'adaptation de niveau 3 n'est pas liée à la mesure du canal mais à la mesure de la liaison. A charge pour cette mesure de refléter tant l'environnement que la mobilité. Un exemple d'adaptation du protocole de routage à partir de paramètres de niveau 2 est proposé dans [36]. Il s'agit de choisir une route en fonction de la qualité des liens représentée par la métrique *ETX* qui est mesurée à partir du nombre de paquets et d'aquittement 802.11 qui sont reçus. Plus généralement, nous proposons de lier le choix du niveau de la mesure pour des adaptations de niveau *N* à l'existence d'adaptations de niveau *N-1*.

### 1.2.4 Adaptation à la charge de trafic : métriques de QOS

La charge du trafic qui circule sur le réseau influence la qualité du service fournie par le réseau car en cas de trafic important le délai de transmission dans le réseau et le taux de perte, seront plus importants. Elle est un paramètre important de performances des protocoles de routage [37] et a été prise en compte dans plusieurs travaux. Leur objectif est de sélectionner une route la moins chargée, et/ou de répartir le trafic.

- Le premier exemple utilise une métrique de charge calculée à partir du nombre de paquets en attente sur un nœud, la métrique est calculée localement et transmise sur le réseau par la signalisation de routage.
- Le deuxième exemple calcule sa métrique à partir du nombre de routes passant dynamique par un nœud et ses voisins.
- Le troisième exemple utilise une métrique calculée selon un taux d'émission et un taux de réception qui reflète le débit résiduel d'un nœud.

#### Dynamic Load-Aware Routing (DLAR)

DLAR [38] est une extension du protocole standard DSR qui équilibre la charge sur le réseau en sélectionnant les routes sur le critère d'état de charge des nœuds intermédiaires. La charge d'un nœud est définie comme le nombre de paquets contenus dans les tampons mémoire associés à une ligne, et la charge d'une route est définie comme constituée des différentes charges des nœuds de la route. Comme DSR, DLAR est un protocole de routage réactif qui a deux mécanismes principaux : la découverte de route et la maintenance de la route. La figure 1.10 illustre l'opération de protocole DLAR pour la sélection de route.

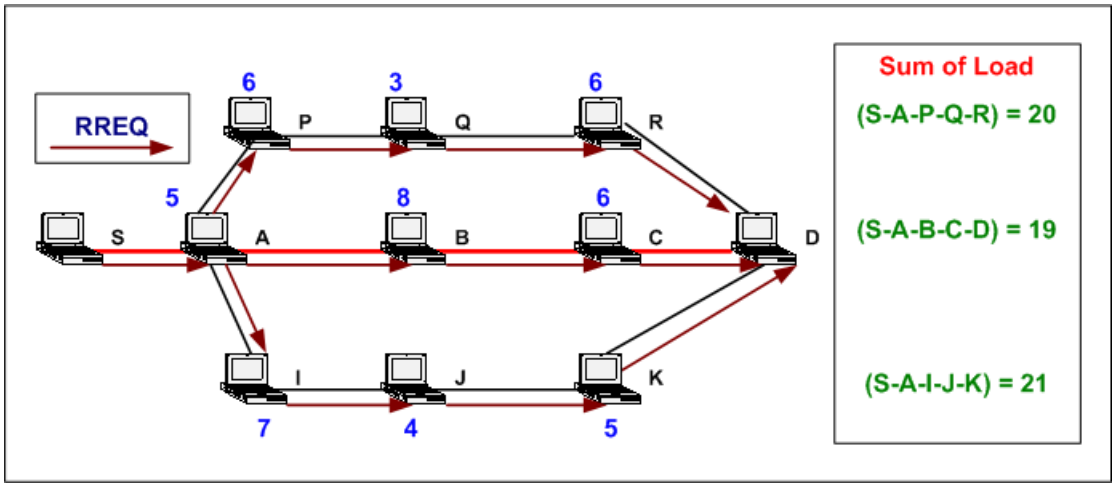



FIG. 1.10 – Exemple d'opération du routage DLAR

Dans la procédure de découverte de route de DLAR, le nœud source, S, diffuse un paquet de recherche de route RREQ (Route Request) à ses voisins. Quand un nœud intermédiaire reçoit le paquet RREQ, il attache sa propre information de charge, avant de le retransmettre. Contrairement à DSR, un nœud intermédiaire n'envoie pas de paquet de réponse RREP (Route Reply) s'il connaît une route vers

la destination ; seul le nœud de destination répond de façon à garantir la fraîcheur des informations de charge de la route. Le nœud destination D peut recevoir plusieurs paquets RREQ par différentes routes durant un certain temps (le temps maximal est celui associé à la route la plus longue), il choisit la meilleure route comme étant celle qui est le moins chargée, et envoie un paquet RREP au nœud source via le chemin inverse. Dans la figure, la route S-A-B-C-D est choisie comme étant la moins chargée (= 19 dans la figure).

Dans la procédure de maintenance de route de DLAR, les nœuds intermédiaires qui sont sur une route supportant une session de données active, ajoutent périodiquement leur information de charge aux paquets de données. Si le chemin actif est considéré comme engorgé, la source recommence la procédure de découverte de route et trouve une route alternative. Quand un nœud intermédiaire détecte une rupture de lien, il envoie un paquet d'erreur au nœud source qui relance alors la procédure de découverte de route.

La définition de charge adoptée par DLAR est classique, et semble bien adaptée à une exécution en environnement de travail réel (par opposition à simulé). Cependant, elle ne reflète pas entièrement la véritable charge du réseau, puisque les paquets mémorisés peuvent avoir des tailles variables et que par ailleurs elle ne considère pas l'effet d'attente du à la compétition d'accès dans la couche de gestion de l'accès au support (MAC).

### Load-Balanced ad hoc Routing (LBAR)

LBAR [39] est également un protocole réactif pour des applications sensibles au délai qui cherche un chemin, peu chargé, pour que les paquets de données soient transmis avec un faible délai. [39] définit, la charge d'un nœud, comme le nombre total de routes passant par le nœud et ses voisins. Plus précisément, en notant $P_i$ le nombre total de routes passant par le nœud $i$, la métrique de routage d'une route $r$ : $M_r$ est définie comme suit :

$$M_r = \sum_{i \varepsilon r} \left( P_i + \sum_{j \varepsilon N(i)} P_j \right) \tag{1.11}$$

Où $N(i)$ est l'ensemble des voisins à un saut du nœud $i$. Chaque nœud utilise l'information de ses voisins, qu'il obtient par la lecture de sa table de routage et par signalisation périodique de type HELLO ; le protocole ne prend pas en compte la variation de la longueur des paquets ni les sources de délai provoquées par le mécanisme de compétition de la couche MAC. Cet aspect est traité dans les travaux suivants avec l'introduction de nouveaux paramètres pour le calcul de la charge.

### Free-Degree Adaptive Routing (FDAR)

FDAR [40] allie les deux objectifs : rechercher une route avec un délai faible, en évitant les routes congestionnées, et conserver une charge moderée sur l'ensemble du réseau. Pour ce faire il utilise deux métriques, *Free-Degree (FD) of Nodes et Free-Degree of Routes.*

*Le Free-Degree of Nodes* du nœud, noté, $\phi(i)$ est :

$$\phi(i) \stackrel{def}{=} \frac{\alpha_i}{(\beta_i)^2} \tag{1.12}$$

Où $\alpha_i$ indique le taux de transmission du nœud $i$ et $\beta_i$ indique le taux de réception de nœud $i$. Pour les auteurs, l'équation 1.12 exprime la disponibilité du nœud par rapport à l'activité de communication, dans le sens où : 1) il reste de la place si le taux de réception est suffisamment faible par rapport au débit maximal et 2) pour un taux de réception fixe, la place disponible devient plus grande en augmentant le taux de transmission. Chaque nœud met à jour périodiquement ses taux de transmission et réception pour chaque unités de temps T, selon la méthode *exponentially weighted moving average (EWMA)*, de la manière suivante :

$$\begin{cases} \alpha_i \text{ <-- } w \times \alpha_i + (1-w) \times \widetilde{\alpha_i} \\ \beta_i \text{ <-- } w \times \beta_i + (1-w) \times \widetilde{\beta_i} \end{cases} \tag{1.13}$$

Où $w$ est un poids avec $0 < w < 1$, $\widetilde{\alpha_i}$ et $\widetilde{\beta_i}$ sont respectivement les valeurs courantes de $\alpha_i$ et $\beta_i$. Dans ce schéma, ces taux sont mesurés en nombre d'octets et non en nombre de paquets. Plus concrètement, la variable $\widetilde{\alpha}$ est calculée comme suit ($\widetilde{\beta}$ est calculé de façon similaire) :

$$\widetilde{\alpha} = \frac{1}{T} \times (\alpha_{data} + h + \alpha_{head}) \tag{1.14}$$

Où $\alpha_{data}$ représente la quantité de données transmises pendant les unités de temps passées $T$ (en octets), $\alpha_{head}$ est le nombre de trames ayant été transmises durant $T$, y compris les trames erronées, et $h$ est la taille de l'en-tête de trame. L'équation 1.14 reflète l'effet de compétition de la couche MAC en comptant le nombre de trames erronées.

Le *Free-Degree of Route r* ($\phi(r)$) représente l'activité globale de la route, (une plus grande valeur de FD indique une plus grande liberté pour la communication), il est défini comme suit :

$$\phi(r) = \sum_{i \varepsilon r} (\phi(i) + \psi(i)) = \sum_{i \varepsilon r} \left( \phi(i) + \sum_{j \varepsilon N(i)} \phi(j) \right) \tag{1.15}$$

Où $N(i)$ est l'ensemble des voisins à un saut du nœud $i$, et $i$ est un nœud de la route différent de la source et de la destination.

En cas de congestion, la charge de trafic d'un nœud dépend également de la charge de ses voisins, car ils doivent se partager la bande passante (par le protocole MAC). Ceci est pris en compte par la variable *traffic interference* autour du nœud $i$: $\psi(r)$, définie par :

$$\psi(r) = \sum_{j \varepsilon N(i)} \phi(j) \tag{1.16}$$

Les nœuds peuvent obtenir les degrés de liberté de leurs voisins par échange de messages HELLO. Après avoir calculé la valeur de fonction $\phi$ pour chaque route

connectant la source et la destination, l'algorithme choisit celle avec un degré de liberté, FD, maximum ; en cas d'égalité sur plusieurs routes le choix se fait sur le critère nombre de sauts.

**Réflexions : à propos de signalisation et mesure**

Les adaptations présentées sont de niveau 3 et utilisent des métriques calculées avec des paramètres de niveau 3 (route) pour une auto-adaptation, DLAR, LBAR, ou de niveau 2 (trames) pour une adaptation inter-couches, FDAR. Cette dernière permet de prendre en compte la spécificité du réseau ad hoc concernant l'accès sans fil partagé. Pour les deux types d'adaptation une signalisation de niveau 3 (dans la mesure où elle concerne le routage) est employée pour obtenir les paramètres en vue voisinage et réseau. Le protocole par la source DSR est utilisé pour une vue réseau et le protocole HELLO est utilisé pour une vue voisinage. Le protocole HELLO qui émet périodiquement des paquets entre voisins est utilisé également pour détecter la qualité d'une liaison. Cependant en raison de la nature stochastique du canal il se peut que la mesure sur un paquet HELLO ne soit plus valable sur le paquet suivant.

### 1.2.5 Adaptation à la dynamique de la topologie : métriques de densité et de mobilité

Les protocoles de routage MANET, sont naturellement conçus pour gérer les modifications de topologie : apparition, disparition d'un lien. L'optimisation recherchée par l'adaptation s'intéresse davantage à la dynamique d'évolution : apparition rapide de liens, nombre d'apparitions important.

Introduire des techniques d'adaptation consiste alors pour le protocole à utiliser des paramètres d'environnement pour choisir ses routes, pour choisir ses éléments architecturaux (exemple d'un choix de chef de cluster en fonction du nombre de voisins), ou bien à modifier son mode de fonctionnement, avec ou sans architecture, réactif versus proactif, selon l'environnement, la dynamique d'évolution de la topologie.

Les exemples d'adaptation que nous présentons sont des adaptations de paramètres et de mode :

- Le premier et le deuxième exemple, AZRP et F-OLSR, adaptent leurs paramètres pour prendre en compte la mobilité. La métrique utilisée est une métrique de voisinage *"étendu"* qui comptabilise les voisins à $k$ sauts, pour le premier alors que pour le second la métrique peut être, si une implantation inter-couches existe, locale calculée avec des paramètres fournis sur le signal radio par les couches inférieures. Dans le cas d'une implantation en couches traditionnelles la métrique reflète le changement de voisinage.
- Les deux derniers exemples, ARPM et CSR adaptent leur mode de fonctionnement : l'un passe d'un fonctionnement proactif à un fonctionnement réactif alors que l'autre adapte son architecture et passe d'un modèle plat à un modèle de cluster.

#### Adaptive Zone Routing Protocol (AZRP)

AZRP [41] adapte dynamiquement la structure de la topologie de routage proposée par ZRP [42]. A la manière des systèmes autonomes de routage de l'internet, la structure du routage divise le réseau en zones de routage disjointes. Des protocoles de routage indépendants travaillent en intra et inter zones. Une zone regroupe l'ensemble des nœuds se trouvant à une distance maximale de X sauts du nœud de référence. Chaque nœud peut choisir un rayon de zone différent. Le routage au sein d'une zone se fait en mode proactif à l'aide d'un protocole à état des liens, le routage vers des nœuds extérieurs à cette zone se fait en mode réactif. Plus précisément, trois protocoles sont spécifiés : le protocole IARP (Intra-Zone routing Protocol) qui fonctionne dans une zone et apprend toutes les routes possibles, le protocole IERP (Inter-Zone routing Protocol) qui est réactif et émet des messages de recherche de route aux nœuds frontières de zone, et, le protocole BRP (Bordercast Resolution Protocol) qui sert à définir la frontière des zones. La valeur du rayon de zone détermine la performance du protocole [43] ; il s'agit alors d'améliorer les performances de ZRP en déterminant une taille de zone adaptée qui assure un bon équilibre entre le routage proactif et le routage réactif, et cette valeur dépend directement du réseau lui même, et de l'environnement.

AZRP définit un rayon de zone variable fonction de la mobilité et de l'état du

trafic pour chaque nœud en utilisant l'information fournie de l'IARP et l'IERP. Lorsqu'un nœud se déplace peu et que son trafic est faible, le rayon de zone est petit afin de diminuer le trafic de contrôle de l'IARP. Dans le cas contraire, AZRP augmente le rayon de zone pour fournir une meilleure connaissance du réseau autour du nœud et pour que le nœud de frontière puisse acheminer les paquets d'acquisition/réponse de route. En augmentant le rayon de la zone, la probabilité que le nœud de destination soit inclus dans la zone augmente, le temps d'acquisition de route est alors diminué (le routage est proactif dans la zone). Le changement de rayonnement se fait par un mécanisme de seuil par pas de 1. Si $R(t)$ est le rayon de zone actuel, le prochain le rayon de zone sera : $R(t+T)$ où $R(t+T) = R(t) \pm 1$. La métrique, utilisée pour le seuil, est le taux d'erreur de route que le protocole d'IERP rapporte, normée par un nombre de nœuds à $Z+3$. Les nœuds qui sont pris en compte sont ceux qui se situent dans une surface située à maximum 3 sauts de la zone considérée. AZRP considère que la densite est 'constante', et connaissant celle-ci dans sa zone, chaque nœud extrapole le nombre de nœuds dans un voisinage extérieur à 3 nœuds de sa zone.

Un mécanisme d'adaptation de zone local à chaque nœud, selon sa mobilité est également proposé par [44], mais il est inverse. Dans cette étude le rayon de zone est augmenté lorsque la mobilité diminue, et diminué lorsqu'elle augmente. L'hypothèse étant que si le nœud se déplace vite il est inutile qu'il connaisse ses voisins, l'information n'étant pas valide. Notons que dans l'étude ci-dessus la mobilité est considérée à partir de l'effet qu'elle provoque (la rupture de chemins) alors que dans le second cas elle est comptée en fonction de la vitesse de déplacement, en pratique une information de mobilité fournie par l'utilisateur. Des résultats de simulation montrent l'intérêt de l'adaptation que nous nommons inverse (zone croissant inversement à la vitesse) en modèle RWP.

**Réflexions :**

Nous retiendrons de ces deux exemples de travaux la difficulté de mettre en place une adaptation *"optimale"*, et la difficulté de comparer plusieurs propositions à partir d'une étude bibliographique. Les deux propositions améliorent ZRP, par une adaptation qui considère que les nœuds ne sont pas homogènes et qu'ils peuvent être de mobilité différente, mais elles sont apparemment contradictoires, l'une diminue un paramètre, alors que l'autre l'augmente. Deux raisons à ceci : soit des mécanismes influents différents, soit des mesures non représentatives. La première raison est de considérer que les mécanismes proposés dans chaque article pour diminuer le trafic de contrôle masquent le gain/perte obtenu par l'adaptation de rayonnage, et dans ce cas l'adaptation n'est pas une optimisation majeure de performance, et son intérêt en regard de la complexité de mise en œuvre n'est pas avéré. La deuxième raison que nous avançons est que les mesures ne reflètent pas l'environnement, le cycle d'adaptation n'est pas opérationnel.

### Fast Optimized Link State Routing (F-OLSR)

F-OLSR [45] est conçu comme une extension du protocole standard OLSR à état de liaison, pour améliorer la localisation des nœuds qui se déplacent rapidement. L'idée de base est que les nœuds en déplacement rapide doivent 1) maintenir à jour un sous-ensemble restreint de leur voisinage rafraîchi plus fréquemment que des nœuds ayant une mobilité plus faible et 2) choisir un nombre limité de relais multipoints pour maintenir la connectivité avec les autres nœuds. (Les relais multipoints sont chargés de diffuser les informations de routage dans le protocole OLSR, ce qui évite que tous les nœuds le fassent et diminue ainsi l'inondation). Dans F-OLSR les messages de voisinage (messages HELLO), concernant les nœuds en déplacement rapide sont diffusés avec une fréquence plus élevée, pour détecter les ruptures de liens et les nouveaux liens plus rapidement. Tout changement de lien avec un relais multipoints engendre la diffusion immédiate d'un message de contrôle à travers le réseau OLSR, ce qui permet de mettre à jour les tables de topologie et donc les tables de routage (le routage OLSR est proactif, dès qu'un nœud apparaît il est signalé). Si le nœud dispose des informations issues des couches inférieures à IP, tel l'affaiblissement du signal radio, lui indiquant qu'il se déplace rapidement, il déclenche un mode de fonctionnement dit *"rapide"*. En absence d'information notifiée par des couches inférieures, la détection de mobilité se fait en observant les changements de voisinage.

### Adaptive Routing Protocol (ARPM)

ARPM [46] adapte le mode de routage, proactif versus réactif, en fonction du degré de mobilité des nœuds. Le protocole commence en mode proactif au niveau de chaque nœud. Chaque nœud construit des tables de routage et envoie les variations de ces tables aux nœuds voisins. Si un nœud détecte une mobilité locale qui dépasse un certain seuil il cesse son activité et passe à un mode d'opération réactif. De cette façon ARPM réduit le délai pour établir une route quand la topologie est relativement statique (faible mobilité) et limite le volume de trafic de contrôle lorsque la topologie devient très dynamique (haute mobilité). L'auteur propose d'utiliser une métrique de mobilité reposant sur le changement de voisinage

### Cluster Source Routing (CSR)

CSR [12] est une extension du protocole DSR qui améliore le passage à l'échelle, en mettant en place une architecture hiérarchique de cluster à deux niveaux qui évite l'inondation du réseau lors des découvertes de routes. Le chef de cluster de plus haut niveau agit comme un cache de routes centralisé qui traite les requêtes de route issues des chefs de clusters du réseau. En cas d'absence de route dans le cache, une découverte de routes est alors effectuée via des communications unicast entre les chefs de clusters. L'originalité de CSR réside dans l'adaptation distribuée du mode de routage (plat ou hiérarchique) selon les conditions du réseau : chaque nœud adapte son mode de routage de manière autonome en fonction de ses critère d'adaptation. Le mode de routage, avec/sans cluster, est choisi en fonction : 1) du nombre de voisins estimé via le cache de routes 2) du nombre de paquets d'erreurs

de route générés.

**Réflexions :**

Les exemples d'adaptations proposés utilisent des métriques de mobilité qui reposent sur de nombreux paramètres : des informations locales au nœud, sa vitesse de déplacement ou bien la force du signal, des informations de voisinage, le changement de voisins ou encore des informations globales sur la rupture de chemins. Concernant ces dernières notons que leur véracité peut être sujette à caution. En effet dans les protocoles standards DSR et AODV, qui utilisent des messages d'erreur de route, il est prévu des optimisations internes qui bloquent la réception d'erreurs de routes : en cas de rupture de chemins un nœud intermédiaire répare la route sans prévenir le nœud qui génère le trafic. Plus généralement, concernant l'intérêt d'optimiser le routage par une adaptation à la mobilité, il apparaît que la mobilité influence les performances du routage et donc qu'il faut s'y adapter. L'adaptation peut porter sur des paramètres comme Fast-OLSR ou sur le mode de routage comme ARPM ou CSR.

## 1.3 Conclusion

De nombreux travaux de recherches proposent d'améliorer les performances protocolaires des réseaux par une adaptation dynamique à leur environnement. Nous avons analysé ce processus dans les réseaux mobile ad hoc en en dégageant les caractéristiques, intérêts et limitations. Les caractéristiques relevées sont le type d'adaptation, de paramètres ou de mode, l'origine protocolaire, de même niveau que l'adaptation (auto-adaptation) ou non (adaptation inter-couches) et la nature des informations (a vue locale, voisinage ou réseau) qui déclenchent l'adaptation.

Les travaux de la littératures sont synthétisés selon leur objectif d'adaptation : énergie, état de la liaison, charge de trafic et dynamicité de la topologie. Nous en retenons des limitations à l'adaptation qui proviennent pour une part du surcoût de signalisation nécessaire à l'obtention des informations, qui limite les gains de performance de l'adaptation, et d'autre part, de la mise à jour non synchronisée entre l'état du réseau, déterminé par un ensemble de variables, et les adaptations qui en modifient la valeur. Le problème se produit lorsque plusieurs adaptations, qui ne sont pas toutes du type auto-adaptation existent dans le système. Nous préconisons alors de mettre en place soit des auto-adaptations soit des adaptations inter-couches utilisant des paramètres provenant de la couche protocolaire directement inférieure et ce en définissant un état de *"temps de prise en compte"* pour stabiliser l'adaptation et éviter des oscillations intempestives.

Parmi les adaptations présentées celle à la mobilité nous parait particulièrement intéressante pour le routage qui est par définition en charge de la gestion de la topologie. Définir une adaptation revient à modifier les paramètres du routage ou son mode de fonctionnement en fonction de la mobilité des éléments du réseau. Une adaptation largement étudiée du routage est celle à la taille du réseau qui permet de mettre en place une structure de routage adaptée à la densité du réseau (de type cluster ou réseau d'arrière plan) et à celle-ci peut se rajouter la prise en compte de la mobilité obtenue par différentes métriques, comme en attestent les exemples proposés.

Par la suite nous cherchons à préciser la notion de mobilité et comment celle-ci peut être utilisée pour l'adaptation.

Chapitre 2

# Proposition de taxinomie des métriques de mobilité et analyse qualitative

Le premier chapitre a présenté et illustré la notion d'adaptation en réseaux ad hoc en fonction de différentes métriques : énergie, canal, charge et mobilité. Il a relevé l'intérêt de l'adaptation à la mobilité pour les réseaux ad hoc et a souligné la difficulté à exprimer la notion de mobilité. Dans ce chapitre nous étudions plus précisément les métriques de mobilité en proposant une analyse qualitative.

Après avoir présenté les critères d'appréciation que nous prenons en compte, nous analysons différents travaux de recherche ayant pour objet la mobilité et ses métriques dont nous proposons une taxinomie originale. Nous terminons ce chapitre en déterminant de *"bonnes"* métriques parmi celles que nous avons étudiées et dont nous avons synthétisé les caractéristiques dans un tableau.

## 2.1 Généralités

### 2.1.1 Influence de la mobilité sur la performance

L'importance de la mobilité est explicitée dans le RFC 2501 [47] qui concerne l'évaluation des protocoles de routage pour les réseaux MANET. Une illustration de son impact sur la performance est présenté sur la figure 2.1 que nous avons obtenue en simulant les protocoles standards IETF : AODV, DSR et OLSR sous l'outil NS2 [48].

Ainsi, quand la mobilité, exprimée sous forme de la vitesse dans la figure 2.1, augmente, le nombre de paquets délivrés (PDR : Packet Delivery Ratio) diminue. Le surcoût (overhead), c'est-à-dire la quantité d'information de contrôle échangée, augmente réduisant ainsi la bande passante disponible pour le transfert de données.

Certains protocoles sont plus sensibles que d'autres à la mobilité. Cependant le fait qu'un nœud se déplace n'entraîne pas forcément de grandes baisses de performances si la connectivité du graphe n'est pas ou est faiblement atteinte lorsqu'il est nécessaire de transmettre du trafic. C'est pourquoi nous cherchons à exprimer la mobilité par une autre métrique que la vitesse de déplacement.

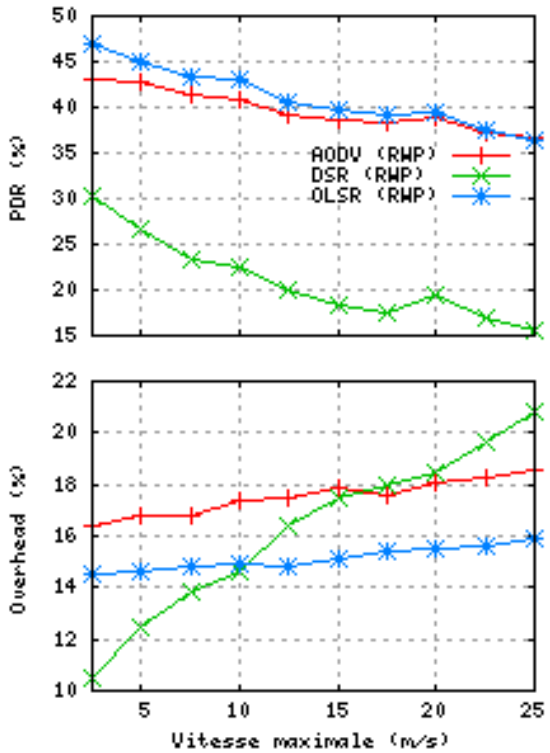



FIG. 2.1 – Influence de la mobilité sur la performance de routage MANET

Dans l'exemple présenté la mobilité est exprimée par une vitesse qui est un paramètre du modèle de mobilité utilisé par la simulation (on l'occurrence le RWP : Random Waypoint). Nous précisons à la suite les modèles de mobilité de base qui sont utilisés dans les travaux que nous analysons dans ce chapitre.

### 2.1.2 Modèles de mobilité

L'un des paramètres de simulation les plus critiques est le modèle de mobilité [49][50]. La manière de le modéliser influence directement le comportement des protocoles étudiés [51][52]. Le choix du modèle de mobilité doit être suffisamment réaliste afin de prendre en compte le comportement des unités mobiles et relativement simple pour ne pas générer une charge de calcul trop importante. Il dépend principalement des applications simulées et des scénarios utilisés. Par exemple, il peut servir à représenter le comportement des unités mobiles dans une zone métropolitaine, lors d'une conférence ou sur un terrain d'opération militaire. La représentation de la mobilité varie énormément selon les environnements considérés et de nombreux modèles de mobilité ont été mis au point pour couvrir les divers comportements possibles. Ils se divisent en deux catégories :

- les modèles individuels, où les déplacements de chaque nœud sont déterminés indépendamment les uns des autres.
- les modèles de groupe, qui prennent en compte la corrélation de déplacements entre certains nœuds. Ces modèles divisent les nœuds en plusieurs groupes et définissent une relation entre les unités mobiles appartenant à un même groupe.

De plus, il existe trois types de loi de mouvement : aléatoire, déterministe et hybride

- les modèles aléatoires présentent des déplacements arbitraires et sans contraintes d'environnement. Ce sont des modèles simples à mettre en œuvre et par conséquent très utilisés.
- les modèles déterministes, quant à eux, s'appuient sur des traces (comportements d'utilisateurs observés dans des systèmes réels).
- des modèles hybrides réalisent un compromis entre simplicité et réalisme mais restent difficiles à mettre en place.

Parmi les modèles individuels, nous pouvons citer les modèles Random Waypoint, Random Direction, Boundless Simulation Area et Gauss-Markov. RPGM (Reference Point Group Model) et les modèles de Sanchez sont les modèles de mobilité de groupe les plus utilisés. Les modèles Manhattan (représentant le mouvement des nœuds dans une zone urbaine) et Freeway (modélisant les déplacements de véhicules sur un réseau routier) sont des modèles hybrides basés sur l'utilisation de cartes. Nous allons décrire plus précisément dans la suite, les modèles Random Walk, Random Waypoint, RPGM, Freeway et Manhattan.

#### 2.1.2.1 Random Walk

Dans le modèle de mobilité Random Walk[53], un nœud mobile (MN) se déplace de son emplacement actuel vers un nouvel emplacement en choisissant aléatoirement une direction et une vitesse de déplacement. La nouvelle vitesse et la direction sont choisies parmi des gammes prédéfinies, *[speedmin, speedmax]* et *[0, 2π]*, respectivement. Chaque mouvement est dans un intervalle de temps constant $t$ ou une distance $d$, à la fin de laquelle une nouvelle direction et une nouvelle vitesse sont calculées. Si un nœud mobile qui se déplace en fonction de ce modèle atteint une limite de simulation, il *"rebondit"* sur les frontières de la simulation avec un angle déterminé par la future direction. Il continue son déplacement selon ce nouveau chemin.

Le modèle de mobilité Random Walk est un schéma de mobilité sans mémoire : la vitesse et la direction d'un nœud mobile sont indépendantes de son passé.

#### 2.1.2.2 Random Waypoint

Le modèle de mobilité Random Waypoint (RWP)[49] définit un temps de pause entre les changements de direction et/ou de vitesse. Les nœuds mobiles sont initialement répartis de manière aléatoire autour de la zone de simulation. Un nœud mobile commence par séjourner dans un endroit pendant une certaine période de temps (c'est-à-dire, un temps de pause). Une fois cette période terminée, le nœud mobile choisit une destination aléatoire et une vitesse qui est répartie uniformément entre *[minspeed, maxspeed]*. Le nœud mobile se déplace alors vers sa nouvelle destination à la vitesse sélectionnée. À l'arrivée, il s'immobilise pour la période de temps spécifiée, puis réitère le processus. Ce mouvement est similaire au modèle de mobilité Random Walk si le temps de pause est nul et *[minspeed, maxspeed]* = *[speedmin, speedmax]*.

#### 2.1.2.3 RPGM

Dans les applications possibles des MANET, la notion de groupe intervient à de nombreuses reprises (équipes de secours, détachements militaires, conférences). Dans les modèles de groupe, l'ensemble des nœuds est divisé en plusieurs groupes et il existe une relation entre les déplacements des unités appartenant à un même groupe.

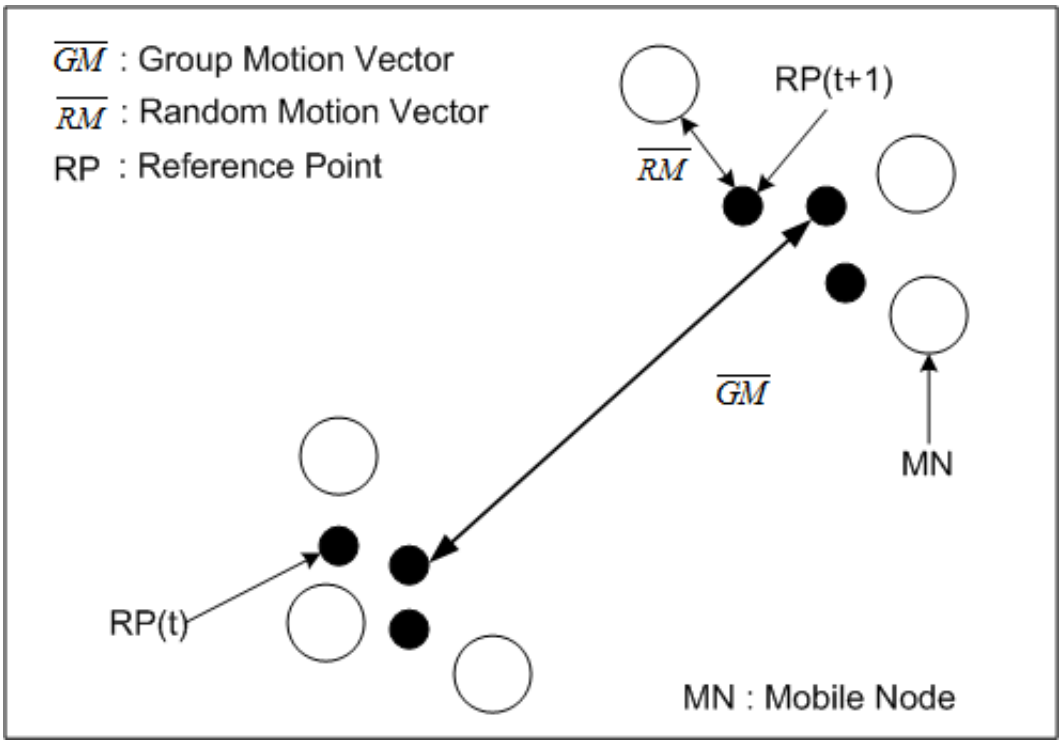



FIG. 2.2 – Mouvements de trois nœuds mobiles en utilisant le modèle de mobilité RPGM.

Les modèles de Sanchez [49] proposent trois fonctionnements, chacun représente une application bien précise :

- le modèle en colonne reproduit une recherche d'objets ou personnes (battue pour retrouver un disparu). Les membres d'un groupe forment une ligne et se déplacent suivant le même vecteur de déplacement.
- le modèle de poursuite : il sert à modéliser un ensemble de nœuds à la recherche d'une cible (des officiers de police cherchant à appréhender un suspect). Les membres du groupe suivent les déplacements de la cible.
- le modèle de la communauté nomade représente les mouvements d'un ensemble de nœuds qui se déplacent ensembles. Les membres du groupe se déplacent autour d'un point de référence commun au groupe.

Le modèle RPGM défini en [54] permet de reproduire tous les modèles de Sanchez. Il utilise la notion de centre logique pour déterminer le déplacement du groupe (position, vitesse, direction).

Un exemple de fonctionnement de RPGM est schématisé sur la figure 2.2 qui donne une illustration de trois nœuds mobiles (MNs) se déplaçant avec le modèle RPGM. La figure illustre que, à l'instant $t$, trois points noirs existent pour représenter les points de référence, *RP (t)*, pour les trois nœuds mobiles. Le modèle RPGM utilise un vecteur de motion d'un groupe $\overrightarrow{GM}$ pour calculer le nouveau point de référence de chaque nœud mobile, *RP (t +1)*, à l'instant *t+1*, comme indiqué ; $\overrightarrow{GM}$ peut être choisi au hasard ou être prédéfini. La nouvelle position de chaque nœud mobile est alors calculée en additionnant un vecteur de motion aléatoire, $\overrightarrow{RM}$, avec le nouveau point de référence. La longueur de $\overrightarrow{RM}$ est distribuée uniformément dans un rayon centré sur *RP (t +1)* et sa direction est répartie uniformément entre *0* et $2\pi$. Chaque nœud possède un point de référence qui suit le mouvement du centre logique du groupe. A l'intérieur d'un même groupe, tous les points de référence connaitront un déplacement identique. Dans un second temps, chaque unité mobile va se déplacer aléatoirement dans le voisinage (un rayon maximal est spécifié) de son point de référence. Le chemin suivi par le centre logique est caractérisé par une suite de points de contrôle qui correspondent à des intervalles de temps donnés. L'utilisation d'une séquence de point de contrôle, qui peut être obtenue à partir de données réelles (cartes, ...), permet de générer de nombreux scénarios. L'aire de simulation peut être partitionnée en assignant un groupe à chaque région (modèle In-Place). Des groupes peuvent exécuter des taches différentes dans la même aire de simulation et être amenés à se croiser (modèle Overlap).

#### 2.1.2.4 Freeway

Le modèle de mobilité Freeway [50] est utilisé pour émuler le comportement de nœuds mobiles sur une autoroute. Il peut être utilisé dans l'échange de trafic ou de suivi d'un véhicule sur une autoroute. Dans ce modèle, les auteurs utilisent des cartes comme dans la figure 2.3.

Il y a plusieurs autoroutes sur la carte et chaque autoroute a des voies dans les deux directions. Les différences entre RWP et Freeway sont les suivantes :

- chaque nœud mobile est limité à sa voie sur l'autoroute.
- la vitesse d'un nœud mobile dépend de sa vitesse précédente.

– si deux nœuds mobiles sont sur la même voie de l'autoroute et sont à distance de sécurité (SD), la vitesse du nœud suivant ne peut pas dépasser la vitesse du nœud précédent.

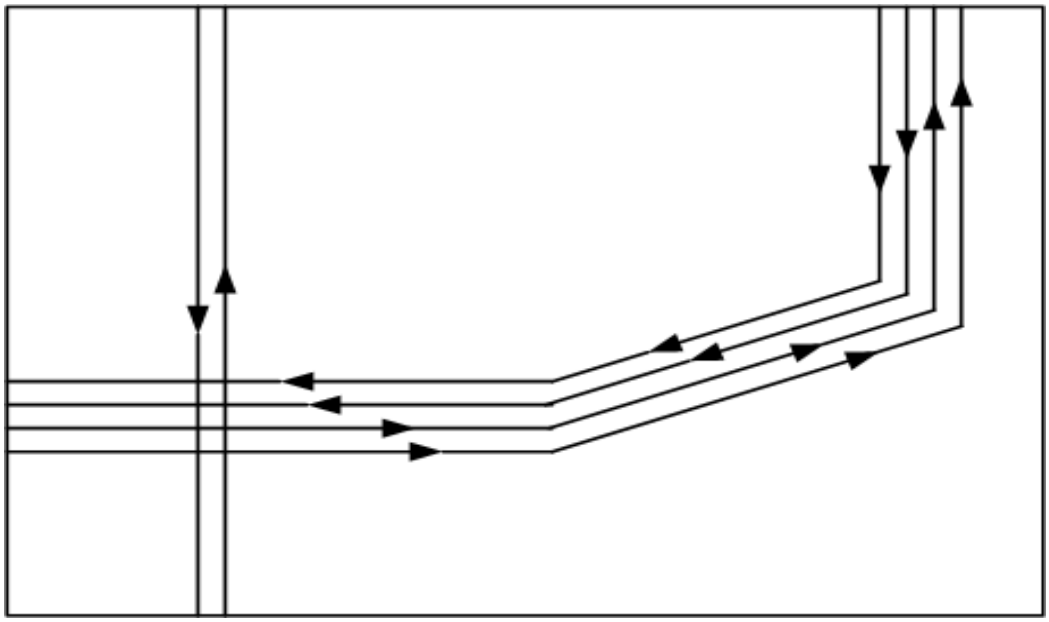


FIG. 2.3 – Carte utilisée dans le modèle de mobilité Freeway.

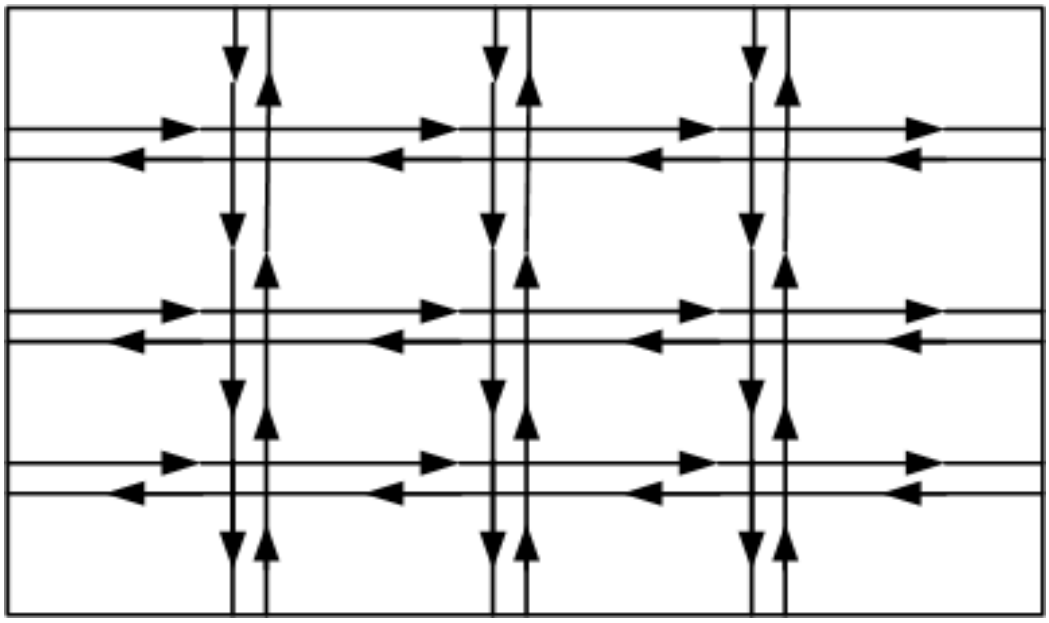


FIG. 2.4 – Carte utilisée dans le modèle de mobilité Manhattan.

#### 2.1.2.5 Manhattan

Le modèle de mobilité Manhattan [50] est utilisé pour émuler le modèle de circulation des nœuds mobiles dans des rues définies par des cartes. Un exemple de la

carte de Manhattan utilisée est présenté dans la figure 2.4. Ce modèle peut être utile dans la modélisation de circulation dans une zone urbaine où un service d'échange informatique entre appareils portables est prévu.

Une carte est composée d'un certain nombre de rues horizontales et verticales. Chaque rue a deux voies dans chaque direction (les directions Nord et Sud en rues verticales, l'Est et l'Ouest en rues horizontaux). Le nœud mobile est autorisé à se déplacer selon la grille des rues horizontales et verticales sur la carte. À l'intersection d'une rue horizontale et d'une rue verticale, le nœud mobile peut tourner à gauche, à droite ou aller tout droit. Ce choix est probabiliste : la probabilité de passer dans la même rue est de *0,5*, la probabilité de virage à gauche est de *0,25* et la probabilité de tourner à droite est de *0,25*. La vitesse d'un nœud mobile durant une tranche horaire dépend de la vitesse lors de la dernière tranche horaire, elle est limitée par la vitesse du nœud précédent sur la même voie de la rue. Les relations inter-nœud sont les mêmes que dans le modèle Freeway. Cependant, il diffère du modèle Freeway en donnant la liberté au nœud de modifier sa direction.

### 2.1.3 Méthode d'analyse : Critères d'appréciation des métriques pour de l'adaptation

Pour évaluer les métriques décrites dans la littérature, nous avons retenu les critères d'appréciation proposés en [52]. Pour qu'un protocole soit adaptable dans un réseau ad hoc selon une métrique de mobilité, celle-ci doit présenter les propriétés suivantes :

1. **C1 : Calculable dans un environnement distribué sans la connaissance globale du réseau.** Une métrique qui requiert pour son calcul des informations issues d'autres nœuds du réseau puis agrège cette information demande une bande passante supplémentaire qui peut s'avérer très importante.
2. **C2 : Calculable dans des implantations réelles de réseau.** Une métrique de mobilité doit pouvoir être obtenue par les éléments d'un réseau réel par opposition à un réseau simulé. Ainsi, par exemple, les mouvements de mobilité réels ne sont généralement pas ceux d'un modèle ou d'un relevé de mouvements antérieurs.
3. **C3 : Calculable avec des ressources limitées.** L'énergie limitée des éléments, ainsi que leur mémoire disponible contraint la capacité de traitement des nœuds. Par exemple, une métrique de mobilité qui exige une communication fréquente, consommatrice de puissance, ne sera pas considérée comme facilement calculable.
4. **C4 : Un bon indicateur des performances des protocole.** Une métrique de mobilité doit pouvoir indiquer ou prédire les performances du protocole (le nombre de paquets délivrés (*PDR : packet Delivery Ratio)*, délai de bout en bout, surcoût, etc.). Par exemple, quand la valeur de métrique de mobilité change, ceci se traduit par un changement correspondant de la valeur du *PDR* par le réseau. Quand le réseau est stable, le *PDR* devrait être plus grand et quand le réseau est plus mobile, le *PDR* devrait être plus faible.
5. **C5 : Indépendant de protocole spécifique.** Une bonne métrique de mobilité devrait pouvoir être utilisée par n'importe quel protocole pour son adaptation.

Si les propriétés 1, 2 et 3 peuvent être examinées grâce à l'analyse qualitative des travaux de recherches, il n'en n'est pas de même pour les propriétés 4 et 5. Nous étudierons plus précisément celles-ci par une analyse quantitative dans les prochains chapitres. Dans celui-ci nous nous attachons aux critères C1, C2 et C3.

## 2.2 Types de métriques et point de vue

L'analyse bibliographique est ordonnée par la classification suivante. Nous définissons deux catégories de métriques de mobilité selon qu'elles se rapportent à la *sociologie du déplacement*, c'est-à-dire relative à l'historique du déplacement, ou à la *prédiction du déplacement*. De plus parmi celles que nous classons dans la catégorie sociologie nous mettons en avant celles qui concernent l'histoire du lien entre deux éléments que nous catégorisons en métriques de *sociolologie du lien*. Par ailleurs une métrique de mobilité est relative au statut de mobilité d'un élément qui peut être un nœud, un groupe de nœuds, un lien, ou encore le réseau lui-même. Aussi pour chacune des catégories sus nommées, nous considérons la portée des métriques : *vue locale, voisinage* ou *réseau*.

Nous analysons en premier lieu les métriques de sociologie et de prédiction du déplacement puis celles de sociologie du lien.

### 2.2.1 Sociologie du déplacement

La mesure reflète un état de réseau avéré. Elle est locale, de voisinage, ou réseau.

#### 2.2.1.1 Vue locale : vitesse et déplacement

La mobilité d'un nœud s'obtient en environnement réel soit à partir d'une information de vitesse accessible au nœud s'il est embarqué sur un objet roulant, ou volant, soit, à partir d'une information de distance s'il est en relation avec un système de positionnement de type Global Positionning System (GPS) ou par d'autres solutions (exposées par exemple en [55] et [56]). Dans ce dernier cas, la vitesse est dérivée de mesures de positionnement échantillonnées à des instants proches (synchronistion globale du système). En environnement simulé, les informations sont généralement les paramètres d'entrée du modèle de mobilité. Une métrique couramment utilisée dans les évaluations de performances de protocoles par simulation est le temps de pause qui est déduit du modèle de mobilité, tels les modèle Random Waypoint (RWP) ou le Random Trip modèle [57] et [58]. Dans [59], les auteurs comparent les performances des protocoles de routage MANET en fonction du temps de pause, ce après avoir indiqué que le nombre de changements de connexions est une fonction décroissante du temps de pause. Notons que le temps de pause est également mesurable en environnement réel (vitesse, ou déplacement nul).

#### 2.2.1.2 Vue voisinage : corrélation du déplacement

**2.2.1.2.1 Vitesse relative** La vitesse relative entre deux nœuds, $i$ et $j$ [50] est définie par

$$RS(i,j,t) = \mid \overrightarrow{V_i}(t) - \overrightarrow{V_j}(t) \mid \tag{2.1}$$

La moyenne Average Relative Speed, est alors définie comme la moyenne sur l'ensemble des tuples *(i, j, t)* des vitesses relatives des nœuds.

$$ARS(i,j,t) = Moy_{(i,j,t)}\left(RS(i,j,t)\right) \tag{2.2}$$

Elle apporte une indication sur la dynamique du réseau, c'est-à-dire des nœuds les uns par rapport aux autres. Elle est relativement simple (même si elle nécessite un système de positionnement) et peut servir localement à privilégier un voisin plutôt qu'un autre dans l'établissement d'une route parce que son comportement (sa vitesse relative) en fera un voisin stable.

**2.2.1.2.2 Degré de dépendance spatiale** Cette métrique également définie dans [50] indique la similarité de déplacement entre deux nœuds qui ne sont pas trop éloignés :

$$D_{spatial}(i,j,t) = RD\left(\overrightarrow{V_i}(t), \overrightarrow{V_j}(t)\right) * SR\left(\overrightarrow{V_i}(t), \overrightarrow{V_j}(t)\right) \tag{2.3}$$

Où $RD\left(\overrightarrow{V_i}(t), \overrightarrow{V_j}(t)\right) = \frac{\overrightarrow{V_i}(t).\overrightarrow{V_j}(t)}{\left|(\overrightarrow{V_i}(t)\right|*\left|(\overrightarrow{V_j}(t)\right|}$ représente le cosinus de l'angle entre $a$ et $b$ et $SR\left(\overrightarrow{V_i}(t), \overrightarrow{V_j}(t)\right) = \frac{min\left|(\overrightarrow{V_i}(t)\right|,\left|(\overrightarrow{V_j}(t)\right|}{max\left|(\overrightarrow{V_i}(t)\right|,\left|(\overrightarrow{V_j}(t)\right|}$ représente le rapport de vitesse entre les deux vecteurs.

La valeur $D_{spatial}(i,j,t)$ est importante lorsque les nœuds $i$ et $j$ se dirigent vers une même direction à des vitesses presque similaires. $D_{spatial}(i,j,t)$ diminue si la direction relative ou le rapport de vitesse diminue.

Cette métrique en amène une autre : Average Degree of spatial dependance. C'est la moyenne arithmétique du degré de dépendance sur l'ensemble des paires de nœuds du réseau et sur le temps.

$$AD_{spatial} = Moy_{pareest}\left(D_{spatial}(i,j,t)\right) \tag{2.4}$$

Elle détermine si les nœuds du réseau ont un mouvement fortement corrélé ou non. En effet, si les nœuds se déplacent globalement dans la même direction et à la même vitesse alors $AD_{spatial}$ sera grand, au contraire, si les nœuds ont un mouvement totalement aléatoire les uns par rapport aux autres, la métrique aura une valeur très petite voire nulle.

Cette métrique, ainsi que la suivante, le degré de dépendance temporelle, ont été introduites par les auteurs pour mesurer l'impact de la mobilité sur les performances des protocoles de routage. Sachant que les protocoles de routage sont généralement conçus pour un environnement donné, l'objectif est de mesurer l'environnement pour déterminer le protocole adapté à celui-ci.

**2.2.1.2.3 Degré de dépendance temporelle** Cette métrique décrit la similarité de deux nœuds entre deux instants qui ne se sont pas trop éloignés [50].

$$D_{temporal}(i,t,t') = RD\left(\overrightarrow{V_i}(t), \overrightarrow{V_i}(t')\right) * SR\left(\overrightarrow{V_i}(t), \overrightarrow{V_i}(t')\right) \tag{2.5}$$

Où $RD$ et $SR$ ont la même définition qu'au paragraphe précédent.

La valeur de $D_{temporal}(i,t,t')$ est grande quand les nœuds circulent plus ou moins dans la même direction et presque à la même vitesse durant un certain intervalle de temps qui peut être défini. $D_{temporal}(i,t,t')$ diminue si la direction relative ou le rapport de vitesse diminue.

Comme pour le degré de dépendance spatiale, c'est la moyenne de cette métrique qui est réellement intéressante : Average Degree of temporal dependance. C'est la valeur moyenne sur l'ensemble des nœuds $D_{temporal}(i,t,t')$.

$$AD_{temporal} = Moy_{(i,t,t')}\left(D_{temporal}(i,t,t')\right) \tag{2.6}$$

Cette métrique permet de déterminer le degré de variation de la vitesse et de la direction d'un nœud au cours du temps. Si la vitesse et la direction sont faiblement corrélées au cours du temps alors cette métrique prendra une valeur faible et inversement.

Les motivations de cette métrique sont les même que celles du *degré de dépendance spatiale*. Nous avons des métriques qui sont utilisées à postériori, une fois la mobilité effectuée, pour caractériser un environnement réseau, et, évaluer la mobilité

à partir de plusieurs caractéristiques. Une validation expérimentale des métriques est réalisée en [50] en étudiant, par simulation, la variation des métriques selon la vitesse, pour 4 modèles de mobilité (modèles RWP, RPGM, Freeway et Manhattan). Seules les métriques degré spatial et moyenne de la vitesse relative, dans la mesure où elles présentent une variation en 3 niveaux de valeurs (faible, moyennes et forte), sont considérées comme valides par leurs auteurs

#### 2.2.1.3 Vue réseau : approches analytique et géométrique

Les métriques précédentes permettent d'avoir une vue d'un nœud et de ses voisins. Les deux métriques ci-après reflètent la mobilité globale du réseau à partir d'une 'modélisation du déplacement' et d'un calcul de moyenne.

**2.2.1.3.1 Mesure de mobilité basée sur la notion d'éloignement** Le concept *"d'éloignement"* (*"remoteness"*) [60] est spécifié par une fonction de la distance entre 2 nœuds $i$ et $j$, $F\left(d_{ij}(t)\right)$ dont les caractéristiques sont les suivantes :

1. L'éloignement entre 2 nœuds situés au même endroit est 0. Si les nœuds sont séparés d'une distance infinie, leur éloignement est de 1.
   $F(0) = 0$, $lim_{x\to\infty}F(x) = 1\%$ fonction normalisée de valeur maximale 1%.
2. L'éloignement augmente avec la distance.
   $\frac{d}{dx}F(x) \geq 0\, pour\, tout\, x \geq 0\%$ fonction monotone%.
3. Pour un nœud ayant une portée de communication de $R$, un nœud situé à une distance de $3R$ peut être considéré aussi éloigné qu'un nœud situé à une distance de $10R$.
   $\frac{d}{dx}F(x)\mid_{x=0}= 0\%$ condition limite%.
4. De façon similaire, si un nœud est à une distance bien inférieure à $R$, son éloignement ne variera pas beaucoup même si sa distance est doublée.
   $lim_{x\to\infty}\frac{d}{dx}F(x) = 0\%$ condition limite%.
5. Si un nœud est à une distance proche de $R$, son éloignement variera énormément s'il se rapproche ou s'il s'éloigne.
   $\frac{d}{dx}F(x)\mid_{x=R}\geq \frac{d}{dx}F(x)\forall x \geq 0$

Une fonction $F(x)$ satisfaisant ces conditions est :

$$F(x) = \frac{1}{\Gamma(r)}\int_0^x \lambda e^{-\lambda\tau}(\lambda\tau)^{t-1}d\tau, \qquad x \geq 0,\, \tau \geq 2 \tag{2.7}$$

la fonction cumulative d'une variable gamma de paramètre $R$, $\lambda = \frac{(r-1)}{R}$ avec $r$ un nombre non obligatoirement entier.

$$f(x) = F'(x) = \frac{1}{\Gamma(r)}\left(\lambda x\right)^{r-1}\lambda e^{-\lambda x} \tag{2.8}$$

Quand des nœuds se déplacent, leur éloignement se modifie dans le temps, et, la mesure de mobilité du réseau ad hoc est définie comme suit :

$$M(t) = \frac{1}{N}\sum_{t=0}^{N-1} M_t(t) \tag{2.9}$$

où $N$ est le nombre des nœuds, et,

$$M_i(t) = \frac{1}{N-1}\sum_{t=0}^{N-1}{}_t \left| \frac{d}{dt} F\left(d_{ij}(t)\right) \right| \tag{2.10}$$

$M_i(t)$ est une mesure des déplacements relatifs des autres nœuds comme vue par le nœud $i$.

Pour valider leur métrique les auteurs vérifient, par simulation sur différents scénarios de déplacements dont les modèles de mobilité varient, que la valeur de celle-ci est linéairement dépendante du taux de changement de lien sur l'ensemble de la topologie. Leur but est d'offrir un cadre d'évaluation standard qui soit indépendant du modèle de mobilité ou du nombre de nœuds.

**2.2.1.3.2 Mobilité géométrique** Cette métrique [51] précise la mobilité d'un scénario avec une seule valeur $M$ qui est une fonction du mouvement relatif des nœuds durant une période de temps d'un scénario. Si $l\ (x,\ t)$ est la position $x$ d'un nœud à l'instant $t$, alors la vitesse relative $v\ (x,\ y,\ t)$ entre les nœuds $x$ et $y$ à l'instant $t$ est

$$v(x, y, t) = \frac{d}{dt}\left(l(x, t) - l(y, t)\right) \tag{2.11}$$

La métrique de mobilité, $M_{xy}$, entre n'importe quelle paire $(x,\ y)$ de nœuds est définie comme leur vitesse relative absolue moyennée sur une période de temps, $T$. La formule pour obtenir $M_{xy}$ est :

$$M_{xy} = \frac{1}{T}\int\limits_{t_0 \le t \le t_0+T} \left|v(x, y, t)\right| dt \tag{2.12}$$

La métrique globale de mobilité, $M$, pour un scénario, est la métrique de mobilité dans 2.12 moyennée sur toutes les paires de nœud :

$$M = \frac{1}{|x, y|}\sum_{x,y} M_{xy} = \frac{2}{n(n-1)}\sum_{x=1}^{n}\sum_{y=x+1}^{n} M_{xy} \tag{2.13}$$

Où |x, y| est le nombre de paires de nœud distinctes $(x,\ y)$ et $n$ est le nombre de nœuds dans le scénario. (Dans 2.13 les nœuds sont numérotés de *1* à *n*.) En pratique la formule de $M$ est discrétisée par pas de 0.1s.

La mobilité exprime ici la vitesse relative moyenne entre tous les nœuds dans le réseau. Ainsi, la mobilité pour un groupe de nœuds fixes ou se déplaçant en parallèle à la même vitesse, est nulle : le graphe de connectivité n'est pas modifié. Les auteurs présentent des résultats de simulation sur des scénarios en modèle Random Waypoint

qui montrent une relation quasi linéaire entre $M$ et le nombre de changements de liaisons. Ils évaluent ensuite les performances de protocoles de routage ad hoc en faisant varier $M$, ce qui revient avec des modèles de mobilité aléatoires, tel le Random Waypoint, à faire varier la vitesse maximale. Les résultats de performances des protocoles AODV et DSR en terme de délai ou de throughput, n'indiquent pas de relation claire entre la métrique et la performance. Ainsi, par exemple, le throughput de AODV est peu affecté par la croissance de $M$. L'avantage de la métrique proposée est qu'elle rend compte de la notion de lien ; cependant les moyennes effectuées en lissent l'intérêt.

**Conclusion :**

Les métriques sur la sociologie du déplacement présentées s'appuient majoritairement sur des informations de vitesse et de positionnement. Elle permettent de caractériser la mobilité d'un environnement davantage que de réaliser des adaptations protocolaires, car si elles fournissent des informations de comportement de mobilité celles-ci ne mènent pas forcément à des optimisations de performances. Par exemple le nœud avec le temps de pause le plus long, s'il est choisi pour sa stabilité dans un algorithme de cluster, ou pour être une passerelle vers un réseau fixe d'accès à internet, n'améliorera pas les performances s'il n'a pas de lien de connectivité avec les autres nœuds. Selon les critères d'appréciations C1, C2 et C3 que nous avons exprimés, nous ne les considérons donc pas comme de bonnes métriques. Retenons cependant la métrique par mobilité géométrique (plus simple à calculer que celle d'éloignement). Elle sera employée pour évaluer le degré de mobilité d'un scénario, dans le dernier chapitre.

### 2.2.2 Prédiction du déplacement

Les métriques de prédiction ont pour objectif de prédire, comme leur nom l'indique, la mobilité d'un élément. Elles sont généralement plus précises que les précédentes, car utilisant plus d'informations pour leur calcul, tout en étant par là même plus complexes à calculer. Leur valeur de vérité est liée à la modélisation du mouvement qui est supposé pour le calcul. Nous différencions les modèles de type local de ceux davantage centrés sur le voisinage puis le réseau.

#### 2.2.2.1 Par mesure locale : densité, erreurs de route et puissance

Alors que les métriques de déplacement s'intéressent aux caractéristiques physiques de celui-ci (vitesse, distance), les métriques prédictives infèrent une caractéristique de mobilité à venir à partir de la mesure d'un état du réseau ou plutôt de la topologie du réseau. Si un nœud se déplace mais qu'il a de nombreux voisins il sera par exemple considéré comme stable. La métrique est alors assimilée à une métrique de stabilité dans le graphe de connexions du réseau. Elle s'obtient à partir de mesures de densité, d'erreurs de route ou bien de puisssance.

**2.2.2.1.1 Densité** La densité locale à un nœud est son nombre de voisins à portée directe de transmission. Nous ne la considérons pas comme une métrique de voisinage mais comme une métrique avec une vue locale (les paramètres de calcul sont obtenus sans signalisation spécifique, à partir du protocole MAC ou de la table de routage, ou encore de la table de voisinage V6). Son principal intérêt est que son calcul ne demande quasiment aucun surcoût pour les nœuds. Elle remplit bien les critères C1, C2 et C3.

Concernant les critères C4 et C5 (performance et indépendance protocolaire), de nombreuses études de performance, telle celle menée en [57] indique une bonne adéquation. Ainsi, les performances des protocoles de routage AODV,DSDV et DSR, en environnement dense (de 150 à 200 nœuds) suivent l'augmentation de la métrique. Ceci se justifie : plus le nombre de nœuds est important, plus il y a de chance que la connectivité du graphe soit rapidement remise en place par le routage après un déplacement. La performance est meilleure. Et, plus le nombre de nœuds est important plus le nombre de voisins, c'est-à-dire la densité augmente (tout au moins pour une distribution des nœuds aléatoire comme en Random Waypoint). Le critère C4 est assuré : la performance est liée à la métrique (des anomalies sont constatées pour un faible nombre de nœuds mais nous pouvons supposer que la densité *"locale"* ne reflète alors pas correctement le graphe de connexion du réseau) Mais le critère C5, n'est pas satisfait car la variation de performance avec la métrique n'est pas vraie pour tous les protocoles. En [61] par exemple, il est montré que les performances de AODV déclinent lorsque la densité augmente au-delà d'un seuil, contrairement à celles du protocole OLSR. C'est que AODV utilise une technique de diffusion dont le coût augmente avec le nombre de nœuds alors que OLSR limite la diffusion.

La densité a souvent été proposée comme paramètre de choix des chefs de clusters, c'est un critère qui permet d'agréger les données. Il parait intéressant de la combiner avec un autre critère pour assurer de la stabilité et réduire le coût lié à de nombreuses élections.

**2.2.2.1.2 Nombre d'erreurs de route** Cette métrique est utilisée par CSR [12] qui est une extension pour passage à l'échelle de DSR, ainsi que dans [14] qui propose une adaptation du protocole transport à la mobilité du réseau. Elle s'obtient aisément lorsque des protocoles réactifs sont déployés, en comptabilisant le nombre de messages d'erreurs de routes reçus par le nœud. Dans la mesure où elle est calculée localement sur le nœud sans utilisation de signalisation spécifique, nous l'avons comme la précédente, la densité, classée en vue locale. Le nombre de messages d'erreurs de route reçus peut donner lieu à deux interprétations selon l'origine de l'élément qui transmet le message. Ainsi par exemple, si un nœud reçoit de nombreux messages d'erreurs de routes de la part de plusieurs de ses voisins, cela signifie que le nœud concerné se déplace ou bien qu'il y a de nombreux changements de topologie. Si par contre, l'origine des messages est principalement la même, le nœud peut en déduire que son voisin n'est pas stable et donc en changer.

L'intérêt de cette métrique est qu'elle est facile à calculer pour des protocoles réactifs et qu'elle est relativement simple à utiliser pour des auto-adaptations de niveau routage, sans provoquer de surcoût de routage conséquent ou de coût calculatoire important. Cependant cela suppose que les messages d'erreurs de routes sont recus par la source et qu'ils ne sont pas bloqués par un recouvrement de route local aux nœuds. Il y a alors un risque de mauvaise optimisation dans la mesure où pour optimiser le protocole de routage on augmente le débit consommé par le contôle, en transmettant les nombreuses erreurs de route.

**2.2.2.1.3 Puissance** [62] propose qu'un élément détermine sa mobilité à partir de la puissance des messages qu'il reçoit. En utilisant un modèle de propagation adapté, le nœud estime sa distance au voisin, sa variance. La métrique s'appuie sur la puissance reçue par un nœud $Y$ lors de l'émission d'un message *"HELLO"* par une station $X$ considérée de son entourage.

Si $RxPr_{X\to Y}$ est la puissance reçue par le nœud $Y$ lors de la réception d'un message *"HELLO"* provenant de $X$, alors la mobilité relative de $Y$ par rapport à $X$ s'écrit :

$$M_Y^{rel}(X) = 10log\frac{RxPr_{X\to Y}^{new}}{RxPr_{X\to Y}^{old}} \tag{2.14}$$

Ainsi, si $M_Y^{rel}(X) < 0$ cela signifie que les nœuds s'éloignent et si $M_Y^{rel}(X) > 0$ qu'ils se rapprochent.

Il y a alors agrégation de l'ensemble de ces métriques partielles de la mobilité de $Y$ par rapport à ses voisins afin de donner un critère de mobilité local de $Y$ dans l'environnement qui l'entoure (ses nœuds voisins).

$$M_Y = Var_0\left[M_Y^{rel}(X_j)\right]_{j=1}^{m} = E\left[(M_Y^{rel})^2\right] \tag{2.15}$$

Où *X1...Xm* sont l'ensemble des voisins de $Y$.

La métrique ainsi obtenue donne une connaissance de la mobilité du nœud $Y$ par rapport à son environnement proche ($M_Y$ petit indique une mobilité faible par rapport à ses voisins). Le problème est de déterminer quels sont les nœuds considérés comme étant dans l'entourage de $Y$. Ce dernier paramètre permet de faire varier la signification de la métrique et de lui donner une pertinence plus ou moins locale. Les

auteurs utilisent cette métrique pour former des clusters à deux sauts et trouvent un gain en terme de nombre de changements de clusters (leur proposition génère moins de changements de chefs de clusters) par rapport à l'algorithme classique qui choisit comme chef l'élément qui a le plus petit identifiant. Cette métrique repose sur la puissance du signal reçue et est donc a priori dépendante de la qualité de la transmission. Néanmoins, les mesures sont mises à jour fréquemment, et le support de transmission peut être considéré comme relativement stable (en règle générale) sur de courtes périodes de temps. Nous pouvons donc supposer que la mesure est indépendante de la qualité du support (mais pas de sa variation si celle si est brutale).

**Conclusion :**
Les trois métriques, densité, erreurs de route et puissance, satisfont aux critères. Nous privilégions l'utilisation de la densité pour l'adaptation car son calcul est indépendant du protocole de routage déployé et qu'elle est moins sensible que la métrique de puissance aux auto-adaptations de la couche physique. Sa valeur, en étant plus stable, évite les problèmes de cohérence relevés dans le chapitre précédent (de toute façon si la valeur de la densité n'arrête pas d'être modifiée la dynamicité de l'environnement est tel qu'il y a peu de chance que l'adaptation soit efficace : ce n'est pas la peine de chercher une *"bonne"* métrique).

#### 2.2.2.2 Par positionnement et modélisation du mouvement de voisinage

Nous analysons trois métriques qui s'appuient sur des informations de positionnement, et utilisent une modélisation du déplacement de leurs voisins. La métrique n'est pas comme précédemment déduite directement d'une mesure locale aux nœuds ; elle utilise également une modélisation du déplacement.

**2.2.2.2.1 Link Expiration Time (LET)** [63] propose une métrique capable de prédire la durée de liaison entre deux nœuds qui sont en liaison. Soient deux nœuds $i$ et $j$ dans la gamme de transmission $r$, les coordonnées $(x_i, y_i)$ du nœud mobile $i$ et $(x_j, y_j)$ celles du nœud mobile $j$, $(v_i)$ et $(v_j)$ sont leurs vitesses respectives, $\theta_i$ et $\theta_j (0 \leq \theta_i, \theta_j \leq 2\pi)$ sont les directions des nœuds $i$ et $j$ respectives. En supposant que les nœuds se déplacent à une vitesse et dans une direction constantes, la durée de temps pendant laquelle les nœuds vont rester connectés est

$$LET = \frac{-(ab+cd) + \sqrt{(a^2+b^2)\,r^2 - (ad-bc)^2}}{a^2+c^2} \tag{2.16}$$

Où $a = v_i cos\theta_i - v_j cos\theta_j$, $b = x_i - x_j$, $c = v_i sin\theta_i - v_j sin\theta_j$, *et* $d = y_i - y_j$. Notons que quand $v_i = v_j$ et $\theta_i, = \theta_j$, LET devient $\infty$.

LET permet d'entreprendre une reconstruction de route avant que la rupture ne se produise. Les résultats de simulation effectués avec un modèle de déplacement aléatoire continu (deplacement choisi aléatoirement à l'initialisation et avec un retour arrière lorsque les mobiles arrivent en frontière de l'aire de simulation) sur des protocoles réactifs indiquent un gain de performance. Le protocole augmente ses performances en terme de paquets transmis, en transmettant sur des routes stables, et, en anticipant la rupture de route. Cependant cette approche exige des données d'une

interface GPS pour déterminer la position, la vélocité et la direction du mouvement de tous les nœuds plus une horloge synchronisée dans tous nœuds. Elle suppose également que la vitesse et la direction des nœud soient constantes.

**2.2.2.2.2 Modèle cinétique** De façon à exprimer le mouvement dans le réseau [64] propose d'utiliser une modélisation par arbre cinétique où l'information de mouvement de l'arbre s'obtient à partir d'un système de positionnement.

En supposant un mouvement linéaire par morceaux (conformément à la modélisation de mouvement proposée en [65] et [66]) les auteurs proposent un algorithme de routage utilisant un algorithme de plus court chemin qui est optimisé par rapport à celui de Bellman Ford car les informations de routage ne sont échangées que lorsque des changements de trajectoires surviennent. L'algorithme est étendu en [67] à la détermination des clusters. La modélisation cinétique est également utilisée en [68] pour choisir les MPR dans le routage OLSR, l'idée étant de choisir les éléments les plus *"stables"* au sens qui restent en contact avec le plus de voisins. Le degré cinétique d'un nœud est la distribution de présence de ses voisins (1 voisin présent, 2 voisins présents, ...). Le nœud est capable de prédire son degré et l'utilise pour élire son MPR.

Plus précisément, en supposant une synchronisation temporelle globale aux nœuds : *x, y, les coordonnées de position, dx, dy la vitesse de déplacement* sont les paramètres utilisés pour déterminer la mobilité d'un nœud.

$$Pos_i(t) = \begin{bmatrix} x_i + dx_i.t \\ y_i + dy_i.t \end{bmatrix} \tag{2.17}$$

Où $Pos_i(t)$ est la position du nœud $i$ au temps $t$, le vecteur $[x_i, y_i]^T$ indique la position initiale de nœud $i$, et $[dx_i, dy_i]^T$ le vecteur vitesse initiale.

Les auteurs proposent une modélisation de la connexion de deux nœuds par deux sigmoides (courbe en *"S"*) d'équation :

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda x}} \tag{2.18}$$

Les instants d'entrée en contact ($t_{from}$) et de rupture de contact ($t_{to}$) sont obtenus en résolvant l'équation où la distance entre les voisins est égale au rayon de transmision ;

Pour $i$ et $j$ voisins : la distance carrée entre les nœuds $i$ et $j$ est déterminée selon un modèle de prédiction à vitesse constante (prédiction d'ordre 1) :

$$\begin{aligned} D_{ij}^2(t) &= D_{ji}^2(t) = \| \, Pos_j(t) - Pos_i(t) \, \|_2^2 \\ &= \left( \begin{bmatrix} x_j - x_i \\ y_j - y_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx_j - dx_i \\ dy_j - dy_i \end{bmatrix} .t \right)^2 \\ &= a_{ij}t^2 + b_{ij}t + c_{ij} \end{aligned} \tag{2.19}$$

Pour $r$ le rayon maximal de transmission, tant que $D_{ij}^2(t) \leq r^2$, les nœuds $i$ et $j$ sont des voisins. Donc, en résolvant

$$D_{ij}^{2}\left(t\right)-r^{2}=0$$

$$a_{ij}t^{2}+b_{ij}t+c_{ij}-r^{2}=0 \tag{2.20}$$

On obtient $t_{ij}^{from}$ et $t_{ij}^{to}$ les dates de l'intervalle de temps pendant lequel les nœuds $i$ et $j$ sont voisins. $nbrs_i$ est le nombre total de voisins détectés dans le voisinage du nœud $i$ au temps $t$, la fonction degré cinétique est alors

$$Deg_i(t)=\sum_{k=0}^{nbrs_i}\left(\frac{1}{1+exp\left(-a.(t-t_k^{from})\right)}.\frac{1}{1+exp\left(a.(t-t_k^{to})\right)}\right) \tag{2.21}$$

Finalement, le degré cinétique est obtenu en intégrant 2.21

$$\widehat{Deg}_i(t)=\int_t^{\infty}\left(\sum_{k=0}^{nbrs_i}\left(\frac{1}{1+exp\left(-a.(t-t_k^{from})\right)}.\frac{1}{1+exp\left(a.(t-t_k^{to})\right)}\right)\right) \tag{2.22}$$

**2.2.2.2.3 Prédiction des positions du prochain saut** La prédiction des prochaines positions est proposée dans le protocole de CBLR (Cluster-Based Location Routing) [69] en supposant que tous les nœuds peuvent connaître leurs positions via GPS ou quelque système de coordonnée local. Une station qui veut émettre vers une station non connue dans sa table, mémorise le paquet et émet une demande de localisation. La demande de localisation est transmise sur tout le réseau par une structure de cluster. Le destinataire recherché renvoi sa position. Le routage des données prend en compte la mobilité du prochain nœud par une méthode prédictive à court terme, où la kième position est linéairement déduite de la position connue :

$$P_{i+k}=P_j+?P*e \tag{2.23}$$

Où $P_{i+k}$ est la position future du saut prochain, $P_j$ est la position actuelle du saut prochain.

$?P$ est l'intervalle entre la position actuelle et la position précédente du saut prochain.

$e$ indique la période de temps durant laquelle les paquets sont perdus faute de route.

Chaque nœud mémorise l'information de l'emplacement de chaque voisin duquel il a reçu un message HELLO. Quand un nœud reçoit un paquet à relayer le nœud prédit les emplacements du prochain saut à partir des emplacements précédents. S'il prédit que le nœud est dans sa portée radio, il envoie le paquet directement, autrement il trouve un nœud intermédiaire plus proche de lui pour atteindre le prochain saut. Cette métrique de prédiction permet de faire face à des changements très rapides de positions, en réparant localement une route par un ajout de nœuds

intermédiaires. Nous noterons toutefois qu'il n'est pas évident qu'un gain de performances global soit apporté car il peut être plus intéressant de recalculer une route que d'utiliser une route de plus en plus longue, avec des possibilites de cycles dus aux calculs locaux.

#### 2.2.2.3 Par modélisation des routes

**Durée de vie de route** L'objectif de [70] est de définir un modèle prédictif de la durée des routes pour une mobilité en random-walk. Le réseau est modélisé par un ensemble de cellules à n niveaux. Une route est un ensemble de vecteurs, chacun représente une liaison entre des mobiles dans des cellules. Le vecteur représentant la laison est appelé état.

La modélisation est la suivante. Soit $M$ la matrice des probabilités de transition de l'état après une unité de temps. $M^k$, les probabilités de transition après $k$ unités de temps. $M^k_{i,j}$ la probabilité qu'un lien à l'état $i$ change à l'état $j$ après $k$ unités de temps. En supposant le lien sans fil dans l'état $i$ à l'unité de temps 0. $P_1(i,t)$ la probabilité que le lien soit cassé à l'unité de temps $t$ est :

$$P_1(i,t) = \sum_{j \varepsilon layer\, n+1,\, n+2} M^t_{i,j} \tag{2.24}$$

avec n le nombre de niveaux égal à une couverture radio de l'hôte.

$P_2(i,t)$ la probabilité qu'un lien sans fil dans l'état $i$ à l'unité de temps *0*, reste vivant à l'unité de temps *t-1*, et soit cassé à l'unité de temps $t$ *est :*

$$P_2(i,t) = \begin{cases} P_1(i,t) & si\, t = 1 \\ P_1(i,t) - P_1(i,t-1) & si\, t > 1 \end{cases} \tag{2.25}$$

Pour un chemin de routage qui consiste en une séquence de $k$ liens sans fil $[i_1, i_2, ..., i_k]$ à l'instant *0* il est supposé que les transitions d'état de liens adjacents sont indépendantes. $P_3(R,t)$ la probabilité que la route $R$ reste vivante à l'unité de temps $t$ est alors :

$$\begin{aligned} P_3(R,t) &= (1 - P_1(i_1,t)) \times (1 - P_1(i_2,t)) \times ... \times (1 - P_1(i_k,t)) \\ &= \prod_{j=1}^{k} (1 - P_1(i_j,t)) \end{aligned} \tag{2.26}$$

$P_4(R,t)$ la probabilité que R soit rompue l'instant $t$ est

$$P_4(R,t) = 1 - P_3(R,t) \tag{2.27}$$

$P_5(R,t)$ la probabilité que $R$ soit vivante à *t-1*, mais soit cassée à l'unité de temps $t$ *:*

$$P_5(R,t) = \begin{cases} P_4(R,t) & si\, t = 1 \\ P_4(R,t) - P_4(R,t-1) & si\, t > 1 \\ P_3(R,t-1) - P_3(R,t) & \end{cases} \tag{2.28}$$

La durée de vie moyenne d'une route $R$, $E\ (R)$, est

$$E(R) = \sum_{t=1}^{\infty} P_5(R,t)\, x\, t\, x\, (La\ longueur\ d'une\ unite\ de\ temps) \tag{2.29}$$

Cette métrique est utilisée par les auteurs pour améliorer le choix des routes de l'algorithme DSR et en améliorer ainsi les performances.

La durée de vie d'une route est également appelée Path availability dans [65]. Les auteurs utilisent dans leur formulation la probabilité qu'un lien soit disponible et non la probabilité qu'il soit cassé ($A_{i,j}(t)$ est la disponibilité pour le lien $(i,\ j)\ \epsilon$ au chemin $k$ dont on cherche à connaître la disponibilité). Les liens dans cette étude sont également considérés comme indépendants. Dans [50] la durée de route (Path duration) s'exprime comme le minimum de la durée des liens, et non comme le produit des fiabibilités des liens. La métrique se déduit de la mesure de la durée de liaison que nous présentons par la suite. Pour un chemin $P = \{n_1, n_2, ..., n_k\}$, de $k$ nœuds, à l'instant $t_1$, la durée de chemin est la longueur du plus grand intervalle $[t_1, t_2]$, pendant lequel pour les liens *k-1* entre les nœuds existent. De plus, à l'instant $t_1 - \varepsilon$ et l'instant $t_2 - \varepsilon$, $\varepsilon > 0$, au moins un des $k$ liens n'existe pas. A l'instant $t_1$, la durée de chemin est le minimum des durées des liens *k-1* $(n_1, n_2), (n_2, n_3), ..., (n_{k-1}, n_k)$ à l'instant $t_1$. $PD\,(n_1, n_k, t_1)$ la durée de chemin la plus courte entre le nœud $n_1$ et le nœud $n_k$ à l'instant $t_1$est :

$$PD\,(n_1, n_k, t_1) = \min_{l \le z \le k-1} LD\,(n_z, n_{z+1}, t_1) \tag{2.30}$$

La métrique de durée de route permet de choisir des routes stables pour une fenêtre de temps. Il est cependant nécessaire de connaître l'état de tous les liens avant de choisir une route. Son utilisation optimise les performances du routage (voir le routage SSA [27] et ABR [28]) dans la mesure où le temps de recouvrement de route est plus important que le temps perdu à utiliser une route stable mais longue. La durée de stabilité doit être suffisament grande pour que le calcul soit valable.

### Conclusion

Les métriques à base de modélisation sont naturellement plus complexes à calculer que celles à base de mesure et leur interêt dépend fortement de la connaissance du modèle de mobilité. Enrichies par des mesures (telles que celles présentées précédemment) et une signalisation adéquate, elles permettent facilement d'avoir une connaissance globale de la mobilité réseau. Cependant au vu de nos critères nous retiendrons les métriques par mesure locale.

### 2.2.3 Sociologie du lien

Les métriques de cette catégorie représentent la connectivité entre deux nœuds d'un réseau. Elles sont utilisées pour calculer des durées de route comme nous l'avons vu précédemement, ou pour choisir un protocole de routage adapté à un environnement de mobilité.

Nous avons vu précédemment une méthode prédictive du calcul de la durée de lien à partir de mesures de vitesses (*métrique LET*). Nous nous intéressons à présent à différentes modélisations de la durée de lien à partir de mesures sur l'état de connexion entre deux nœuds. Nous présentons une modélisation à longue échelle de la notion de connexion puis différentes caractérisques de l'état connexion : durée, changement et stabilité.

#### 2.2.3.1 Modélisation à longue échelle : Contact et rencontre

Afin d'étudier la mobilité à longue échelle, [71] s'inspire des travaux en épidémiologie pour l'analyse et la prédiction des maladies infectieuses. Il introduit deux notions : celle de *"contact"* et celle de rencontre *"encounter"*. Les questions auxquelles tendent de répondre les auteurs sont :

- Combien un nœud rencontre-t-il de nouveaux contacts par unité de temps ?
- Avec quelle fréquence 2 nœuds se rencontrent-ils ?
- Combien de temps une rencontre reste-t-elle établie ? Ou combien de temps un contact reste-t-il perdu ?

L'élément de base de la modélisation sont les notion de contact et de rencontres.

**Contact-Based Mobility (CBM)** Le *Contact-Based Mobility (CBM)* est defini au niveau d'un nœud puis par moyenne sur tous les nœuds. Une rencontre, $e_{mn}$, entre 2 nœuds se produit lorsque leur distance est inférieure à la portée $R$ des nœuds. Elle est représentée par le moment où elle se produit et sa durée :

$$e_{mn} = \{n,\, m,\, t,\, \triangle t\} \tag{2.31}$$

Un contact est la liste des rencontres entre 2 nœuds :

$$C_{mn} = \{e_{mn}\} \tag{2.32}$$

$C_n$ l'ensemble des contacts d'un nœud pendant le temps $T$ (la période d'observation) :

$$C_n = \{c_{mn}\} \tag{2.33}$$

$E_n$ l'ensemble des rencontres, *"encounter"*, d'un nœud pendant $T$ :

$$E_n = \{e_{mn}\}_{\forall m \neq n} \tag{2.34}$$

Les notions de contacts et rencontres amènent à définir plusieurs métriques :

1. **Taux de contact**
   Le nombre de nouveaux contacts du nœud $n$ par unité de temps :

$$ACR_n = \frac{|C_n|}{T} \tag{2.35}$$

   Sur un réseau, la moyenne du taux de contact est la moyenne du $ACR_n$ pour $N$ nœud :

$$ACR = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} ACR_n \tag{2.36}$$

2. **Fréquence de rencontre**
   La *fréquence des rencontres* (*encounter frequency)* se définit par le nombre de rencontres du nœud $n$ divisé par le nombre de contacts de ce même nœud pendant le temps $T$ :

$$AEF_n = \frac{|E_n|}{|C_n|} \tag{2.37}$$

   Sur un réseau, la moyenne est le nombre moyen de rencontre par contact :

$$AEF = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} AEF_n \tag{2.38}$$

3. **Taux de rencontre**
   Le nombre de rencontres du nœud $n$ par unité de temps :

$$AER_n = \frac{|E_n|}{T} \tag{2.39}$$

   Sur un réseau, le nombre moyen de rencontres faites par un nœud par unité de temps :

$$AER = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} AER_n \tag{2.40}$$

4. **Durée moyenne de contacts**
   Le temps moyen d'un contact pour le nœud $n$, i.e. la durée moyenne de la somme de ses rencontres, est :

$$ACD_n = \frac{\sum\limits_{e_m \varepsilon E_n} e_{mn}.\triangle t}{|C_n|} \tag{2.41}$$

   Sur un réseau, le temps moyen d'un contact est :

$$ACD = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} ACD_n \tag{2.42}$$

5. **Durée de perte de contact**
   Le temps de perte d'un contact est :

$$ACLD_n = T - \frac{\sum_{e_m \varepsilon E_n} e_{mn}.\triangle t}{|C_n|} = T - ACD_n \tag{2.43}$$

6. **Durée de rencontre**
   La durée d'une rencontre est :

$$AED_n = \frac{\sum_{e_m \varepsilon E_n} e_{mn}.\triangle t}{|E_n|} \tag{2.44}$$

   Sur un réseau, la durée moyenne d'une rencontre est :

$$AED = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} AED_n \tag{2.45}$$

Du travail expérimental présenté par [71] on retiendra les résultats suivants :
- $ACR$ varie linéairement avec la densité des nœuds et varie avec la vitesse maximale des nœuds. Mais $ACR$ sature si la vitesse maximale est très haute, puisque le nombre des nouveaux contacts est limité par le nombre de nœuds $N$.
- $AEF$ est indépendant de la densité des nœuds et augmente avec la vitesse des nœuds
- $AER \approx ACR * AEF$
- $ACD \approx AED * AEF$

[71] conclut des analyses statistiques réalisées que la moyenne de la fréquence de rencontres joue un rôle central dans l'ensemble de ces métriques. De plus, $AEF$, $AED$ et $ACD$ sont indépendants de la densité du nœud alors que $AER$ et $ACR$ augmentent linéairement avec la densité des nœuds.

$CBM$ parait bien adapté à la conception et à l'évaluation des protocoles et des applications tolérants aux délais (pour des réseaux mobiles de type Delay Tolerant Network), mais aussi au temps réel pour adapter ces protocoles et ces applications. La difficulté est d'obtenir des informations de la part des autres nœuds.

#### 2.2.3.2 Modélisation stochastique

**2.2.3.2.1 Durée de vie de lien** Les métriques relatives à la durée de connexion entre deux nœuds sont étudiées dans de nombreux travaux. Une modélisation commune s'appuie sur une décomposition du mouvement en phase [65]. Chaque phase de mouvement est une époque dont la durée est considérée comme exponentielle. Dans le modèle de base le mouvement est constant en vitesse et en direction dans une époque.

La modélisation probabiliste de la durée de liaison est employée dans [57] et [72] par :

$$LD(i,j,t) = e^{-av(i,j,t)} \tag{2.46}$$

avec *v (i, j, t)* la vitesse relative des nœuds $i$ et $j$ à l'instant $t$ et $a$ une constante fonction de la corrélation du mouvement. (Une autre notation exprimée en [73] exprime la durée de liaison pour une valeur prédite *LD(Tp)* avec *Tp= v (i, j, t))*

Elle se justifie analytiquement [73] (pour des mouvements indépendants) en supposant que le mouvement des nœuds reste constant jusqu'à ce qu'ils sortent de la zone de couverture.

Soit $n_d$ le nombre de nœuds ; la durée moyenne de la connectivité $ALD^i$ du nœud $i$ pendant le temps $T_m$ est :

$$ALD^i = \frac{1}{n_d} \int_0^{T_m} \sum_j^{n_d} LD(i,j,t)dt \tag{2.47}$$

A partir de cette définition [72] analyse l'influence des paramètres du modèle Random Waypoint sur la métrique. Il indique que la durée moyenne de connexion en état stable, (sur une période de temps infinie) est constante pour une vitesse maximale fixée ; elle ne reflète donc pas le niveau de stabilité d'un lien, ses changements, et il propose alors d'utiliser une autre métrique, celle de stabilité de lien.

**2.2.3.2.2 Disponibilité de lien** Cette métrique définie dans [65] est la probabilité qu'il y ait un lien actif entre deux nœuds mobiles à l'instant $t + t_0$, sachant qu'il y avait un lien actif entre eux à l'instant $t_0$. Un lien est considéré disponible à l'instant $t_0 + t$ même s'il a éprouvé des échecs pendant un ou plusieurs d'intervalles $t_i, t_j; t_0 < t_i < t_j < t_0 + t$. Pour les nœuds $n$ et $m$, la disponibilité de lien est définie comme :

$$A_{m,n}(t) = Pr\left(L_{m,n}(t_0 + t)) = 1 \mid L_{m,n}(t_0) = 1\right. \tag{2.48}$$

Où $L_{m,n}(t)$ présente l'état de lien du nœud n au nœud m à l'instant $t$. Si le lien est actif $L_{m,n}(t) = 1$, sinon $L_{m,n}(t) = 0$.

[65] montre la correspondance entre les résultats fondés sur l'analyse mathématique du modèle et les résultats de la simulation. Malheureusement, comme le *link availability* qui est lié à la probabilité d'activité des liens, la connectivité d'un lien entre deux nœuds évaluée est moins importante que ce qu'elle est dans la réalité pour des périodes de temps plus petites que quelques minutes. [73] approxime analytiquement par une méthode de mesure de la durée de lien réelle la durée de lien estimée (la corrélation de mouvement des nœuds est un mouvement de mobilité de type random walk/Waypoint). Leur algorithme de calcul reflète la tendance générale de la valeur de la disponibilité de lien mais ne permet pas de la calculer de façon exacte.

**2.2.3.2.3 Disponibilité de lien améliorée** La métrique *enhanced link availability* [74] améliore le modèle de disponibilité de lien utilisé par la métrique disponibilité de lien de [65], qui supposait l'indépendance du mouvement entre deux nœuds. Une stratégie d'apprentissage adaptative pour prendre en compte la corrélation du mouvement entre deux nœuds est proposée. L'objectif est de limiter le coût de prédiction inexact tout en utilisant un minimum d'information pour déterminer

un lien stable. Son utilisation est proposée pour améliorer les protocoles de routage et adapter les structures de cluster à la dynamique de mobilité du réseau.

Sachant que la mobilité de deux nœuds peut être indépendante ou corrélée, une expression de disponibilité de lien totale entre les nœuds $n$ et $m$ (*Total Availability*), $A^T_{m,n}(t)$, est donnée par l'équation 2.49, où, $A^i_{m,n}(t)$ est la disponibilité du lien (*Independant Availability*) quand les nœuds n et m se déplacent d'une manière indépendante, $A^c_{m,n}(t)$ (*Correlated Availability*) est la disponibilité du lien quand les nœuds $n$ et $m$ se déplacent de façon corrélée, (cas de deux personnes s'échangeant directement un fichier par exemple), et $P_i$ est la probabilité que les deux nœuds se déplacent d'une manière indépendante.

$$A^T_{m,n}(t) = A^i_{m,n}(t)P_i + A^c_{m,n}(t)(1 - P_i) \tag{2.49}$$

L'intérêt de cette métrique est le même que celui de la métrique disponibilité de lien avec en plus la possibilité grâce au paramètre $P_i$ de prendre en compte des mouvements différents par nœuds. Chaque nœud doit spécifier sa propre valeur $P_i$. Par exemple, un nœud appartenant à un groupe solidement couplé, tel un véhicule qui se déplace sur une route, spécifiera une petite valeur pour $P_i$ ; tandis qu'un utilisateur nomade dans un environnement dégagé spécifiera lui une valeur plus importante de $P_i$. Plus généralement, $P_i$ dépend de la nature de l'application du réseau, des propriétés de groupe des nœuds, de la taille de la population et des caractéristiques de l'environnement.

L'évaluation pratique de cette métrique pose deux problèmes : l'évaluation de $P_i$ et celle de $A^c_{m,n}(t)$. [74] propose une méthode de calcul de $A^c_{m,n}(t)$ faisant augmenter sa valeur avec la durée d'activité du lien (lien actif). En revanche, [74] ne propose pas de méthode de calcul de la probabilité de corrélation $P_i$ mais fait uniquement des recommandations sur ce que devrait être la valeur (grande ou petite) de $P_i$ en fonction du contexte du réseau (autoroute, piétons, ...).

**2.2.3.2.4 Probabilité de changement de lien et entropie** [75] définit deux métriques, l'une, la probabilité de changement d'état, qui reflète la mobilité, et l'autre, l'entropie, qui mesure le niveau d'aléatoire dans le changement.

Soient $q^u_{ij}(e)$ et $q^d_{ij}(e)$ les probabilité qu'un lien ij soit actif puis cassé durant une époque e

$$q^u_{ij}(e) = Pr\left\{m_{ij}, (e+1) = 1/m_{ij}(e) = 0\right\};\ i, j = 1, 2, ..., N \tag{2.50}$$

$$q^d_{ij}(e) = Pr\left\{m_{ij}, (e+1) = 0/m_{ij}(e) = 1\right\};\ i \neq j \tag{2.51}$$

Où $m_{ij}(e) = 1$ s'il existe un lien direct entre $i$ et $j$ et $m_{ij}(e) = 0$ sinon.

Soit $q_{ij}(e)$ la probabilité de changement de lien pour l'époque $e$ définie comme étant la probabilité soit d'une activation de lien soit d'une rupture de lien à l'époque $e$, et, $1 - q_{ij}(t)$ la probabilité qu'un lien ne change pas d'état, alors l'entropie du changement de la ligne $ij$ à l'époque $e$ est definie selon shannon par

$$q_{ij}(t) = \frac{q^u_{ij}(t) + q^d_{ij}(t)}{2} \tag{2.52}$$

$$D_{ij}(e) = -\{q_{ij}(e) log\,(q_{ij}(e)) + [1 - q_{ij}(e)]\, log\,(1 - q_{ij}(e))\} \tag{2.53}$$

Les nœuds étant mobiles, la probabilité de changement de liens, $q_{ij}(e)$ durant une époque $e$, est dépendante du temps, aussi les auteurs utilisent la métrique *D(e)* pour caractériser la mobilité globale :

$$D(e) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} D_{ij}(e) \tag{2.54}$$

Où $N$ est le nombre des nœuds dans le réseau et $D_{ij}(e)$ est l'information requise pour décrire le changement d'état de lien entre les nœuds $i$ et $j$ à l'époque $e$ :

Pour un réseau observé pendant une période continue de temps $T$, le temps moyen de $D(e)$ peut être utilisé pour caractériser la mobilité du réseau.

$$D = \frac{1}{T} \int_0^T D(e) de \tag{2.55}$$

Les résultats des simulation avec les différents modèles de mobilité (Random Waypoint, Manahattan et Battlefield) extraits de [75] confirment la représentativité de $D$ en tant qu'indicateur de mobilité global : on note que $D$ augmente lorsque la vitesse des nœuds augmente et $D$ diminue lorsque la durée moyenne des liaisons augmente. Par ailleurs il est noté que $D$ reflète les changements de topologie du réseau exactement de la même façon quel que soit le modèle de mobilité utilisé.

Comme en [50] et [60], l'intérêt d'utiliser cette métrique est de disposer d'une métrique qui soit indépendante du nombre de nœuds, et du modèle de mobilité.

#### 2.2.3.3 Calcul déterministe : métriques de durée, changement et stabilité de lien

**2.2.3.3.1 Durée de lien** Les formules proposées dans le cadre de la modélisation stochastique du paragraphe précédent sont difficiles à calculer dans un réseau réel, même avec le modèle supposant une vitesse constante car il faut avoir la vitesse relative des nœuds et une valeur pour la constante $a$. Une expression plus simple à calculer dans le réseau réel est présentée dans [50] qui précise la formule suivante :

$$LD(i, j, t_1) = t_2 - t_1 \tag{2.56}$$

Pour deux nœuds $i$ et $j$, à l'instant $t_1$, la durée du lien *(i, j)* est la longueur de l'intervalle de temps le plus long $[t_1, t_2]$ pendant lequel les deux nœuds sont dans la gamme de transmission l'un de l'autre. De plus ces deux nœuds ne sont pas dans la gamme de transmission à l'instant $t_1 - \varepsilon$ et $t_2 + \varepsilon$ pour $\varepsilon > 0$.

[52] étudie la durée de connexion entre deux nœuds par simulation. Il valide expérimentalement l'intérêt de la métrique LD en montrant avec un modèle Random Waypoint et un protocole de routage LAR que lorsque la valeur de $LD$ augmente, le taux d'envoie de paquet augmente aussi, et que quand la valeur de $LD$ diminue, le taux d'envoie de paquet diminue aussi. Cependant [72] relève que cette métrique

ne permet pas d'avoir une vision du changement de lien et propose une métrique de stabilité (voir plus loin).

**2.2.3.3.2 Durée de vie résiduelle de lien** [76] propose la métrique *Residual link lifetimes* comme la quantité moyenne de vie écoulée en terme de probabilité pour un lien qui a survécu l'âge *"a"*. La densité de vie résiduelle pour des liens d'âge *"a"* est calculé à partir de la densité *"d"* et de la distribution de fonction des durée de vie de lien, *"D(a)"*.

La densité $d_a$ des durées de vies résiduelles de lien, pour les liens d'âge $a$ est :

$$d_a(t) = \frac{d(t+a)}{1 - D(a)} = \frac{d(t+a)}{\int d(t)dt} \tag{2.57}$$

La valeur moyenne $E_a$ de la vie résiduelle d'un lien d'âge $a$ est donné par

$$E_a = \int t d_a(t)dt = \frac{\int td(t)dt}{\int d(t)dt} - a = \frac{E - D(a)}{1 - D(a)} - a \tag{2.58}$$

Où $E$ est la valeur moyenne des durées de lien.

En pratique, chaque élément mesure dans un tableau à $N$ éléments les durées de vies des liens. Ce tableau *"d[t]"* a un nombre fini d'éléments de *(N+1)*. Ainsi, les liens avec une vie dans $[a - 0,5; a + 0,5]$ sont comptés comme ayant vécu $a$ unités de temps où $a \in \{0...N\}$. Le moyen pour un terminal d'estimer la durée de vie d'un lien d'age $a$ en utilisant l'équation 2.58 est :

$$R(a) = \frac{\sum_{t=a}^{N} td\,[t]}{\sum_{t=a}^{N} d\,[t]} - a \tag{2.59}$$

2.59 peut être étendue pour avoir la probabilité que le lien reste actif pour une portée de temps *"s"* en 2.60.

$$P_s(a) = \frac{\sum_{t=a+s}^{N} d\,[t]}{\sum_{t=a}^{N} d\,[t]} \tag{2.60}$$

Dans la plupart des cas la portée exacte de temps *"s"* n'est pas connue à l'avance ; il est plus utile de calculer en terme de quantile selon l'équation 2.61.

$$Q_\alpha(a) = max\,\{s \mid P_s(a) \geq \alpha\} \tag{2.61}$$

Le travail proposé en [76] est poursuivi en [77]. Il y est étudié par simulation sur différents modèles de mobilité la stratégie de choix d'une ligne pour obtenir des routes stables et améliorer ainsi les performances de routage : faut-il prendre la ligne la plus jeune en espérant que sa durée de vie résiduelle sera importante ou bien choisir celle qui est la plus agée comme cela est fait dans les routage SSA et ABR en espérant qu'elle durera plus longtemps (si une liaison est agée il y a de forte

chance que les nœuds ne se déplacent pas ou se déplacent conjointement et donc qu'ils restent encore longtemps en contact) ? Les auteurs ne concluent pas de choix définitif. Ils indiquent que le choix de la liaison la plus agée fonctionne globalement mieux dans le cas de scénario de mobilité statique, alors que celui de la liaison jeune fonctionnera globalement mieux dans un environnement dynamique. Par ailleurs ils comparent les gains de performance de routage obtenus par une stratégie de choix de route basée sur la durée de vie à ceux obtenus : avec la durée de vie résiduelle, ($R_a$, calculée par mesure statistique) et avec la probabilité de rupture ($Q_a$). D'après les résultats, la meilleure stratégie dans tous les scénarios de mobilité est celle qui repose sur $Q_a$. La difficulté est alors d'évaluer correctement le paramètre $\alpha$. Un choix inadapté de ce paramètre décroît les performances.

**2.2.3.3.3 Changement d'état de liaison, fréquence de changement de liaison et nombre de changement** De même que [50], [60] étudie un environnement normalisé pour analyser les performances des protocoles MANET. Il utilise la métrique *taux de changement de liens* (link change rate) ou fréquence des changements d'état du lien *LC*. Cette métrique est également appelée *link state changes* dans [52], *link change rate* dans [78] et [72], et *number of link changes* dans [50].

Pour un modèle Random Waypoint (RWP), [72] définit $LC$ comme l'inverse de la période pendant laquelle la transmission est possible puis devient impossible.

$$ALC = \frac{1}{ALD} \tag{2.62}$$

Pour effectuer ce calcul il est necessaire de calculer la durée de liaison avec les difficultés mentionnées précédemment. Nous préférons la forme calculable en réseau réel de [50] qui précise le nombre de changements de lien pour une paire de nœuds $i$ et $j$ comme le nombre d'époque où le lien change d'un d'état déconnecté à un état connecté. Formellement,

$$LC = \sum_{i=1}^{T} C(i,j,t) \tag{2.63}$$

Où *C (i, j, t) = 1* si *X (i, j, t-1) = 0* et *X (i, j, t) = 1* c'est-à-dire, si le lien entre les nœuds $i$ et $j$ est en état déconnecté à l'instant *t-1*, mais connecté à l'instant $t$.

*X (i, j, t)* a une valeur 1 s' il y a un lien entre les nœuds $i$ et $j$ à instant $t$.

De même est définie la moyenne sur tous les liens existants pour les paires de nœud qui satisfont la condition.

$$ALC = Moy_{(i,j)}\left(LC(i,j)\right) \tag{2.64}$$

Cette métrique observe la fréquence des changements d'état du lien, aspect non traité par le *link duration*. L'inconvénient est qu'elle ne permet pas d'avoir une vision globale de la disponibilité d'un nœud, par exemple par la connaissance de la longévité du lien, et ne permet donc pas d'évaluer l'effet des changements d'état du lien sur la transmission.

**2.2.3.3.4 Stabilité de lien** L'analyse en Random Waypoint effectuée en [72] et [78] indique que ni $LC$, ni $LD$ ne peuvent décrire correctement la mobilité. En effet, l'augmentation de la vitesse maximale ne perturbe pas $LD$ alors qu'elle augmente $LC$. Par contre, $LD$ augmente en même temps que la portée d'un nœud alors que $LC$ y est insensible.

Un moyen de résoudre ce problème indiqué en [78] est la métrique stabilité de lien (*link stability (LS)*) calculée à partir des métriques *average link duration* et le *link state changes*.

$$Ls = \frac{LD}{LC} \tag{2.65}$$

[78] utilise cette métrique pour améliorer les performances du protocole de routage DSDV en adaptant la fréquence des annonces (DSDV est un routage proactif avec diffusion cyclique d'annonces) à la stabilité des liens. Les travaux sont poursuivis en [79] pour adapter le rythme des annonces faites par un protocole de découverte de passerelle à Internet.

**Conclusion :**

Les travaux analytiques ou par simulation indiquent l'intérêt de connaître des informations sur la liaison entre deux nœuds, en montrant la corrélation entre ces informations et la performance du protocole de routage ou l'état de mobilité d'un réseau. Ces informations s'obtiennent facilement, ne nécessitent pas d'équipement de positionnement, et sont calculables dans un réseau réel. C'est pourquoi nous avons choisi d'étudier plus particulièrement ces métriques et d'évaluer leur aptitude à répondre aux critères C4 et C5 dans le chapitre suivant.

## 2.3 Caractéristiques de la fonction calcul de métrique

Nous recensons les différentes caractéristiques pour le calcul de métriques en environnement réel, en synthétisant les orientations que nous avons choisies à partir de l'analyse bibliographique.

### 2.3.1 Mesure et/ou Modélisation analytique

Les métriques de la mobilité par mesure utilisent les informations des nœuds, des voisins ou du réseau.

Le modèle analytique est utilisé en supposant un modéle de mobilité déterministe ou aléatoire du comportement des nœuds d'un réseau. Il fournit une formulation de la métrique fortement dépendante du modèle de mobilité en la calculant selon les caractéristiques de modèle.

Pour des raisons de simplicité de calcul nous choisissons une méthode de mesure.

### 2.3.2 Méthode de mesure avec/sans GPS

Le calcul de métrique selon un modèle déterministe suppose des informations de vitesse qui sont obtenables à partir d'un système GPS (via des mesures de temps et de positionnement).

Lorsque ces informations ne sont pas disponibles, le calcul s'effectue à partir de signalisation reflétant l'environnement des nœuds, des liens et des routes, où le nombre des nœuds qui sont à portée radio, la fréquence de changement de lien, la durée de connexion.

De façon à avoir une méthode de mesure la plus générale possible, nous retenons une mesure sans outil de positionnement.

### 2.3.3 Niveau protocolaire d'origine des informations mesurées

Les informations pour le calcul de métrique de mobilité peuvent provenir d'une seule couche (comme la couche physique, MAC, LLC, réseau) ou de plusieurs couches pour des optimisations inter-couches (comme MAC/LLC, physique/MAC/LLC et MAC/LLC/réseau).

Pour éviter les problèmes d'incohérences entre mesures et optimisations, nous avons choisi des métriques calculées à partir de paramètres d'une seule couche.

### 2.3.4 Type d'objet mesuré

Les objets mesurés sont :

- Nœud : ces informations s'appuient sur le nœud lui-même ou ses voisins.
- Lien : ces informations s'appuient sur les liens entre le nœud et ses voisins.
- Route : ces informations s'appuient sur les routes entre le nœud et ses destinations.

– Réseau

De façon à éviter une signalisation trop importante, nous ne retenons pas les mesures de niveau réseau. Nous retenons les mesures nœud, liens et route, dans la limite où elles sont calculées sans signalisation additionnelle.

## 2.4 Synthèse et choix de métriques

Le tableau 2.1 présente une synthèse des caractéristiques des métriques bibliographiques étudiées. L'information de mobilité connue du nœud pour exprimer la mobilité contient une vitesse, une direction, une position, une portée de transmission. Ici, la portée de transmission n'exprime pas le mouvement d'un nœud, mais présente la mobilité d'un nœud du point de vue de la connectivité.

Nous utilisons ce tableau pour préciser les métriques qui peuvent être utilisées pour adapter le comportement de protocoles, c'est-à-dire qui sont :

1. calculables dans un environnement distribué sans connaissance globale du réseau ;
2. calculables en implantation réelle ;
3. calculables à ressources limitées ;
4. indicatrices des performances des protocoles ;
5. indépendantes du protocole.

Nous ajoutons la condition de calcul de la métrique sans système GPS

D'abord, nous éliminons les métriques de déplacement qui sont utilisées pour définir un cadre générique de mobilité pour l'évaluation des performances de protocoles (2.1.3-1) et/ou s'appuient sur des informations de positionnement.

Nous ne nous intéressons pas aux métriques de prédiction qui demandent généralement plusieurs paramètres pour les calculer, et généralement un positionnement GPS et/ou un modèle analytique (2.1.3-1 et 3). Leur calcul demande une signalisation importante (vue réseau) et/ou un calcul complexe pas forcément très exact. Nous retenons deux métriques de prédictions calculées par mesure : le nombre de voisins (appelé encore degré ou densité locale) et le nombre d'erreur de route. Cette dernière ne sera pas utilisée car elle est en contradiction avec le critère d'indépendance de la métrique en regard du protocole (critère en pratique non respectable comme nous le verrons par la suite). La mesure de puissance n'est pas retenue car sa véracité est liée aux adaptations de la couche physique.

Ensuite, nous considérons les métriques de connectivité. Nous retenons les métriques de disponibilité de lien et disponibilité de lien améliorée parce qu'elles utilisent un modèle analytique (2.1.3-5). Nous ne considérons pas non plus la durée de vie résiduelle également complexe à calculer.

Par conséquent, il reste 4 métriques de connectivité (*Contact-Based Mobility*, *Durée de lien/Link duration, changement de liens/Link change rate*, et *Stabilité de lien/Link Stability*). La métrique Contact-Based Mobility peut être assimilée aux métriques Link change rate et Link duration ; elle n'est donc pas nécessaire.

En conclusion, eu égard à l'objectif d'adaptation fixé, nous étudions principalement 4 métriques : le nombre de voisins, la Durée de lien, la fréquence de changement de lien, et la stabilité de liens.

TAB. 2.1 - Synthèse des caractéristiques des métriques bibliographiques étudiées

| Niveau observé | Nom de la métrique de mobilité | Type de mesure | | | | | GPS | Modèle analytique | Couche | | | Objet mesuré | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Vitesse | Direction | Position | Portée | Autres | | | Phy | LLC/ MAC | Routage | Nœud | Lien | Route |
| **Sociologie du déplacement** | | | | | | | | | | | | | | |
| -Vue locale | | | | | | | | | | | | | | |
| | Vitesse | X | | | | | | | X | | | X | | |
| | Déplacement | | | | | Temps pause | (X) | | X | | | X | | |
| -Vue voisinage | | | | | | | | | | | | | | |
| | Vitesse relative | X | X | | | | | | X | | | X | | |
| | Degré de dépendance spatiale | X | X | | | | | | X | | | X | | |
| | Degré de dépendance temporelle | X | X | | | | | | X | | | X | | |
| -Vue réseau | | | | | | | | | | | | | | |
| | Mesure de mobilité fondée sur la notion d'éloignement | X | | | X | | | | X | X | | | X | |
| | Mobilité géométrique | X | | X | | | X | | X | X | | | X | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| **Prédiction de déplacement** | | | | | | | | | | | | | | |
| -Par mesure locale | | | | | | | | | | | | | | |
| | Densité | | | | | | | | | X | X | X | | |
| | Nombre d'erreurs de route | | | | | Paquet de Route Error | | | | | X | X | | |
| | Puissance (Local mobility metric) | | | | X | | | | X | | | | X | |
| -Par positionnement et modélisation du mouvement de voisinage | | | | | | | | | | | | | | |
| | Link Expiration Time (LET) | X | X | | | Angle | X | | X | | | | X | |
| | Modèle cinétique | X | X | X | | | X | | X | | | X | | |
| | Prédiction des positions du prochain saut | | | X | | Période de paquet perdu | X | | X | X | | | X | |
| -Par modélisation des routes | | | | | | | | | | | | | | |
| | Durée de vie de route | | | | X | | | X | | X | X | | | X |
| | | | | | | | | | | | | | | |

| Niveau observé | Nom de la métrique de mobilité | Type de mesure | | | | | GPS | Modèle analytique | Couche | | | Objet mesuré | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Vitesse | Direction | Position | Portée | Autres | | | Phy | LLC/ MAC | Routage | Nœud | Lien | Route |
| **Sociologie du lien** | | | | | | | | | | | | | | |
| -Modélisation à longue échelle | | | | | | | | | | | | | | |
| | Taux de contact | | | | | | | | | X | | X | X | |
| | Fréquence de rencontre | | | | | | | | | X | | X | X | |
| | Taux de rencontre | | | | | | | | | X | | X | X | |
| | Durée moyenne de contacts | | | | | | | | | X | | X | X | |
| | Durée de perte de contact | | | | | | | | | X | | X | X | |
| | Durée de rencontre | | | | | | | | | X | | X | X | |
| -Modélisation stochastique | | | | | | | | | | | | | | |
| | Durée de vie de lien | X | | | | | | | X | X | | X | X | |
| | Disponibilité de lien | | | | | | | X | | X | | X | X | |
| | Disponibilité de lien améliorée | | | | | | | X | | X | | X | X | |
| | Probabilité de changement de lien et entropie | | | | | | | | X | X | X | | | X |
| -Calcul déterministe | | | | | | | | | | | | | | |
| | Durée de lien | | | | | | | | | X | X | X | X | |
| | Durée de vie résiduelle de lien | | | | | | | | | X | | X | X | |
| | Changement d’état de liaison, fréquence de changement de liaison et nombre de changement | | | | X | | | | | X | | X | X | |
| | Stabilité de lien | | | | X | | | | | X | | X | X | |

## 2.5 Conclusion

Ce chapitre a pour objet de définir la notion de mobilité dans le contexte de l'adaptation. Nous définissons trois catégories de métriques selon qu'elles se rapportent au déplacement d'un élément, les métriques de sociologie du déplacement, et plus précisément à l'historique du lien entre deux nœuds, les métriques de sociologie du lien, ou bien à la prédiction du déplacement, les métriques de prédiction du déplacement. Notre taxinomie, issue de l'analyse des travaux traitant de la mobilité en réseaux ad hoc, s'appuie également sur le point de vue, c'est-à-dire l'origine architecturale des informations d'entrée du calcul de la métrique qui est le nœud, le voisinage ou encore le réseau. Nous apprécions l'intérêt des métriques en regard de critères concernant leur calculabilité en environnement distribué sans connaissance globale du réseau, et ce, avec des ressources limitées. Dans l'objectif de retenir des métriques qui soient le plus universelles possibles nous écartons celles qui sont dépendantes d'un système de mesure par positionnement et d'un modèle de mobilité donné. Nous relevons l'intérêt des métriques par mesure, par opposition à celles par modélisation, pour des mouvements non prédictifs de type aléatoire. Plus précisément nous retenons quatre métriques : le nombre de voisins, la durée de lien, la fréquence de changement de lien et la stabilité de lien. Nous poursuivons l'étude de ces 4 métriques par une analyse quantitative dans le chapitre suivant

Chapitre

# 3 Evaluation des métriques de mobilité

Après l'analyse qualitative reposant sur l'étude de données bibliographiques menée dans le chapitre précédent, nous présentons une analyse numérique des métriques de mobilité. Notre objectif est de savoir s'il est possible de déterminer quantitativement une *"meilleure"* métrique de mobilité, c'est-à-dire celle qui apportera le plus de gain de performance par une adaptation protocolaire à la mobilité. L'idée de base est que plus la métrique influe sur les performances d'un protocole plus il est intéressant que le protocole adapte son comportement en fonction de sa valeur. Pour ce faire nous évaluons par simulation la corrélation entre métriques et performances.

Le parti pris de notre étude est de se situer dans une vision idéale, quasi universaliste des réseaux MANET où les réseaux MANET se différencient par leur protocole de routage. Nous simplifions ainsi le problème en faisant abstraction de l'adaptation, mais en considérant plusieurs protocoles de routage car ils sont le facteur déterminant des performances des réseaux Manet.

Nous étudions par simulation le rapport entre les performances du routage et les métriques. Le périmètre d'étude est circonscrit par les résultats précédents, à savoir des métriques facilement calculables qui soient disponibles indépendamment de la pile protocolaire. Les métriques étudiées sont de type sociologie du lien, et relatives à l'histoire de la connectivité du nœud à ses voisins. Ce sont : *Link duration (LD)*, *Link change rate (LC)*, et *Link stability metric (LS)*. Nous commençons par expliciter le calcul des métriques, puis présentons la méthologie que nous avons mise en œuvre pour terminer par l'analyse des résultats obtenus. Ceux-ci sont produits par expérimentation via de la simulation.

## 3.1 Calcul des métriques

Les critères d'évaluation énoncés dans le chapitre précédent sont relatifs à l'indépendance de la métrique vis à vis d'un protocole spécifique, la calculabilité (en implantation réelle, avec des ressources limitées et sans signalisation additionnelles), ainsi qu'à leur capacité à indiquer la performance d'un protocole. Nous nous intéressons dans un premier temps à l'aspect calcul puis nous évaluerons l'aspect indicateur de performance.

De façon à éviter l'ajout d'une signalisation spécifique, la portée des métriques retenues est de niveau voisinage. Par ailleurs pour des raisons de facilité de calcul nous avons retenu des métriques qui ne supposent pas de modèles analytiques, et qui ne s'appuyent pas sur des modèles de mobilité supposés connus. Nous étudions des métriques relatives à la sociologie du lien qui sont facilement calculables par un équipement mobile et ne nécessitent pas de signalisation additionnelles.

Les métriques choisies sont : *Link State Changes (LC), Link Duration (LD) et Link Stability (LS).*

### 3.1.1 Link State Changes (LC)

Cette métrique présentée en 2.2.3.3.3 est le nombre de changements d'état d'un lien. Un lien est soit dans un état de fonctionnement soit dans un état de rupture. Quand un nœud qui se déplace se trouve à portée de transmission d'un autre nœud, la valeur de la métrique est augmentée par un, pour refléter un nouvel état de fonctionnement du lien. De même, quand le nœud sort de la gamme de transmission, la métrique est augmentée de un car elle reflète un nouveau changement d'état : une rupture de lien.

La figure 3.1 illustre le calcul de la métrique sur un réseau de 4 nœuds, pour un nœud mobile donné, noté A. Premièrement, durant la période de temps $t$ = *0-20* secondes, les nœud mobiles B, C et D sont dans la gamme de transmission de A, il y a alors 3 liens connectés de A avec B, C et D. Deuxièmement, durant la période de temps $t$ = *20-30* secondes, les nœud mobiles B et D sortent de la gamme de transmission de A, il y a alors 2 ruptures de lien. Par ailleurs, le nœud mobile E entre dans la gamme de transmission de A alors que le nœud mobile C ne bouge pas, il y a une nouvelle connexion. On a alors 4 liens connectés et 2 ruptures. Troisièmement, durant $t$ = *30-40* secondes, le nœud mobile E sort de la gamme de transmission de A, provoquant une rupture de lien supplémentaire. Le nœud mobile D retourne dans la gamme de transmission de A et le nœud mobile C ne bouge pas, il y a une connexion supplémentaire. Au total, il y aura eu 5 connexions et 3 ruptures. La métrique LC est la somme des liens connectés et liens cassés, sa valeur est de 8.

Un inconvénient de LC, relevé en [78], est qu'elle n'indique pas la longévité des liens. Ce problème est illustré dans les figures 3.2 (a) et (b). Les graphiques montrent le temps durant lequel les liens entre un nœud et un de ses voisins sont connectés ou cassés. Dans les deux cas illustrés par les figures 3.2 (a) et (b), LC a la même valeur mais la durée de connectivité moyenne est différente. LC moyen est calculé en tenant compte de l'ensemble des nœuds considérés.

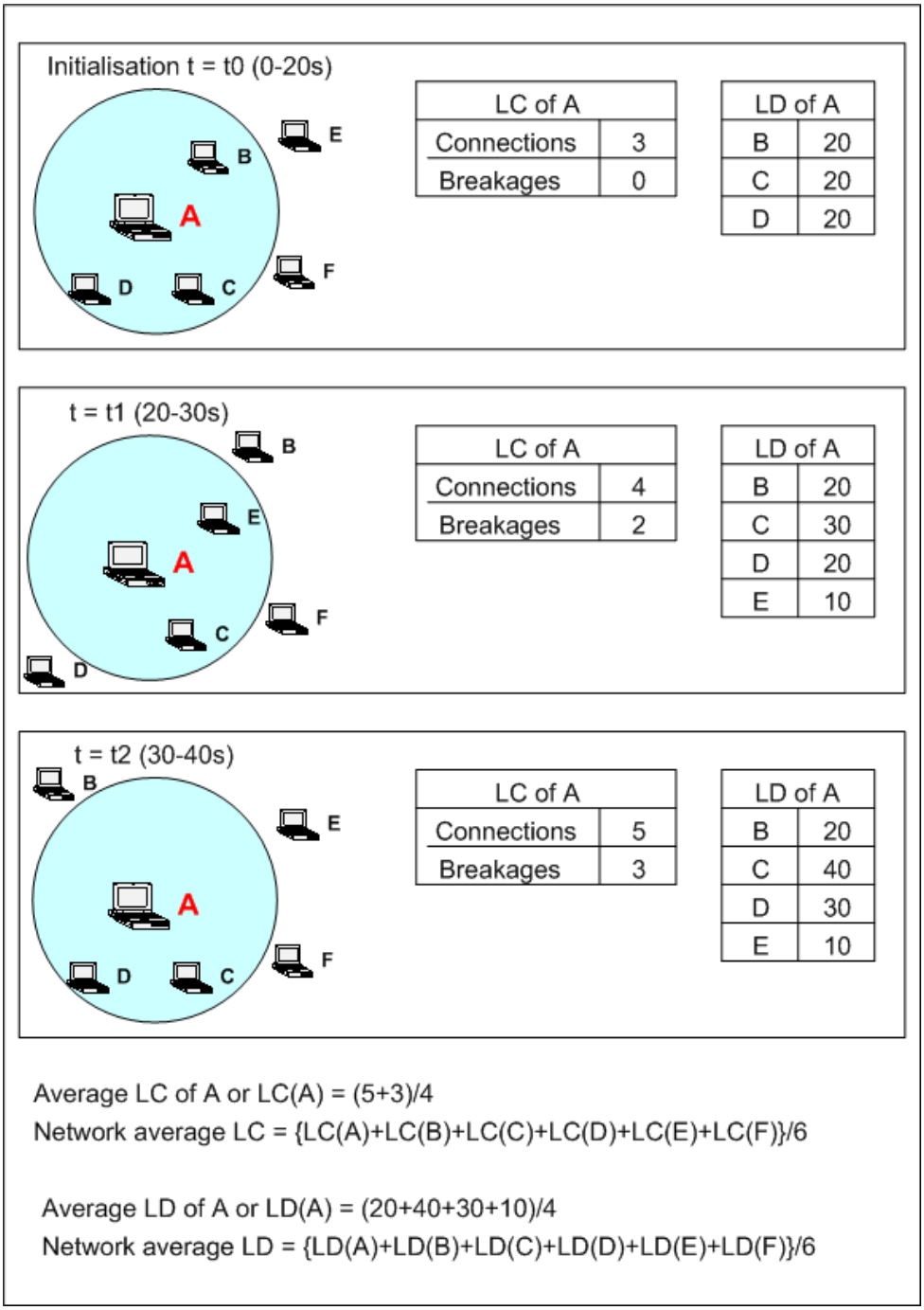
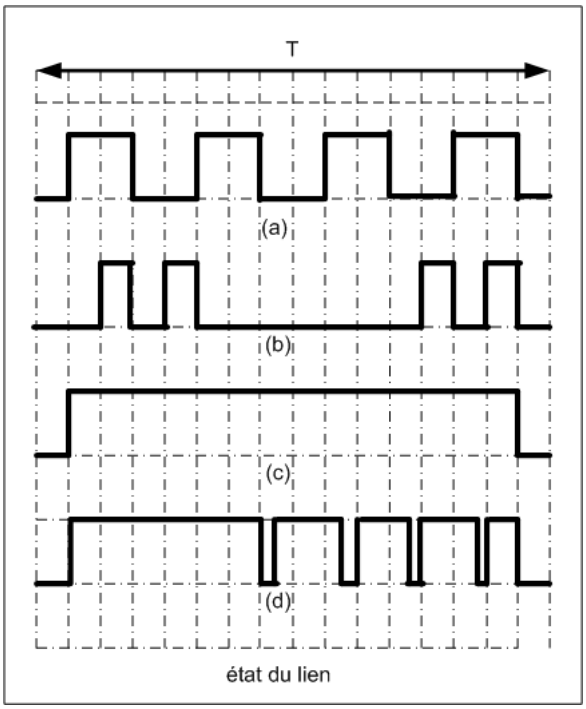



FIG. 3.1 – Exemple de calcul de LC moyen et LD moyen

### 3.1.2 LinkDuration (LD)

LD indique la période durant laquelle un lien est valide. La figure 3-1 illustre le calcul de la métrique, sur le nœud mobile A avec le même scénario que précédemment. Premièrement, pour $t$ = *0-20* secondes, les nœud mobiles B, C et D sont dans la gamme de transmission de A, LD pour les liens de A vers B, C et D est de 20 secondes. Deuxièmement, pour $t$ = *20-30* secondes, les nœuds mobiles B et D sortent de la gamme de transmission de A, la valeur de LD ne change pas. Par ailleurs, le

nœud mobile E entre dans la gamme de transmission de A et le nœud mobile C y reste, LD avec le nœud mobile E est de 10 secondes et LD avec le nœud mobile C est incrémenté de 10 secondes. Troisièmement, à l'instant $t = 30\text{-}40$ secondes, le nœud mobile E sort de la gamme de transmission de A, LD avec le nœud mobile E n'est pas modifié. Le nœud mobile D retourne dans la gamme de transmission de A et le nœud mobile C y reste, alors les valeurs de LD avec les nœud mobiles C et D sont augmentées de 10 secondes. Un inconvénient de cette métrique est également relevé en [78], LD ne reflète pas l'impact de la fréquence de changements de lien surtout quand le temps pendant lequel le lien étudié reste débranché est plus long que le temps d'expiration de route. Selon les figure 3.2-(c) et (d), LD dans les deux cas est presque égal (voir la figure 3.2-(e)) mais le nombre important de changements de lien dans le cas (d) affectera davantage le protocole de routage que dans le cas (c).




| | a | b | c | d |
|---|---|---|---|---|
| LC | $\frac{8}{T}$ | $\frac{8}{T}$ | $\frac{2}{T}$ | $\frac{10}{T}$ |
| LD | $\frac{T}{2}$ | $\frac{T}{4}$ | $\frac{14T}{16}$ | $\frac{13T}{16}$ |
| LS | $\frac{T^2}{16}$ | $\frac{T^2}{32}$ | $\frac{7T^2}{16}$ | $\frac{13T^2}{160}$ |

(e)

FIG. 3.2 – Impact de la mobilité sur les métriques LC, LD et LS

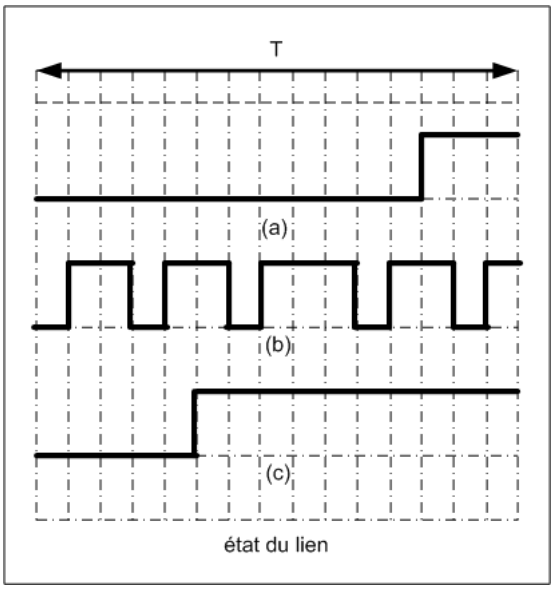
### 3.1.3 Link Stability

LS capture autant la longévité de lien que la fréquence du changement de lien. Elle est définie pour : $LS = \frac{LD}{LC}$. Si LS est appliquée comme métrique de mobilité dans l'exemple décrit dans les figures 3.2-(a) et (b), elle prend des valeurs différentes selon les cas tandis que LC prend la même valeur. Des résultats similaires peuvent être obtenus pour les cas dans les figures 3.2-(c) et (d).

Les valeurs des métriques LC, LD et LS pour les scénarios de mobilité représentés dans les figures 3.2-(a) – (d), est résumé dans la figure 3.2-(e).

### 3.1.4 Discussion

Avant l'usage de la simulation pour analyser les métriques, nous présentons une analyse dont le résultat diffère de celle menée dans [78]. Cette dernière indique que LS est *"meilleure"* que LC et LD, alors que nous ne considérons pas LS comme une *"bonne métrique"*.




| | a | b | c |
|---|---|---|---|
| LC | $\frac{1}{T}$ | $\frac{9}{T}$ | $\frac{1}{T}$ |
| LD | $\frac{T}{5}$ | $\frac{2T}{3}$ | $\frac{2T}{3}$ |
| LS | $\frac{T^2}{5}$ | $\frac{2T^2}{27}$ | $\frac{2T^2}{3}$ |

(d)

FIG. 3.3 – Problème de LS

En effet, examinons la figure 3.3 et considérons le lien entre la valeur d'une métrique et les performances du réseau qui sont fortement dépendantes du routage.

- Selon les figures 3.3-(a) et (c), LC a la même valeur dans les deux cas bien que la durée de lien soit différente. Cependant, le routage doit pouvoir mieux fonctionner dans le cas 3.3-(c) que dans le cas 3.3-(a), dans la mesure où la maintenance des routes est simplifiée grâce à une connectivité de durée longue. Par ailleurs une connectivité de durée longue signifie que s'il y a une route à la destination le protocole peut la trouver. De façon plus manifeste, nous obtenons un LC dans la figure 3.3-(b) plus élevé que dans la figure 3.3-(a) alors que le routage peut s'exécuter mieux dans la figure 3.3-(a) que dans la figure 3.3-(b). En se référant aux performances du réseau, le LC moyen n'est pas la meilleure métrique de mobilité.
- Quand à LS, qui reflète LD de même que LC, dans la mesure où il dépend de LC, dont nous avons montré la non représentativité en terme de performance, ce ne nous semble pas être non plus la meilleure métrique. Selon la figure 3.3-(d), la valeur de LS, est ordonnée par par $\frac{2T^2}{3}$ (c) $>$ $\frac{T^2}{5}$ (a) $>$ $\frac{2T^2}{27}$ (b). Cependant il aparaît dans la figure 3.3-(a) que le lien est moins actif que dans la figure 3.3-(b). Ainsi, le routage fonctionnera mieux avec LS dans la figure 3.3-(b) que dans la figure 3.3-(a). Donc, le LS moyen ne semble pas être la meilleure métrique de mobilité.
- Finalement, considérons LD. Comme illustré dans les figures 3.3-(b) et (c), LD dans les deux cas a la même valeur mais la fréquence du changement de lien est différente. Le nombre de paquets par seconde que pourra transmettre le réseau

peut être bon (équivalent à celui d'un réseau de structure fixe) dans les deux cas, grâce à une connectivité de durée longue, mais le coût de maintenance des routes (en terme de paquets transmis et délai de détection de panne) est plus élevé dans la figure 3.3-(b) que cela dans la figure 3.3-(c) à cause de la valeur du nombre important de changements (LC). Le lien dans le cas (b) est moins stable que dans le cas (a) mais sa durée de connexion (LD) est plus importante et vraisemblablement le routage sera davantage opérationnel dans le cas (b) que dans le cas (a).

De cette première analyse, LD serait la meilleure métrique.

## 3.2 Méthodologie d'évaluation

L'objectif principal de l'étude des métriques est de permettre aux protocoles de s'adapter à la mobilité afin qu'ils puissent améliorer la performance du réseau. Ainsi pour une faible mobilité l'algorithme A1 est utilisé, mais en cas de forte mobilité, l'algorithme A2 est appliqué puisque les performances du réseau sont dégradées avec A1. C'est pourquoi nous souhaitons évaluer la capacité des métriques à être utilisées en fonction du comportement du protocole, en sachant que la métrique doit être calculée facilement et sa valeur refléter la performance du réseau, que nous mesurons en terme de performances de routage. Nous justifions ce choix par le fait que la performance des réseaux ad hoc est très fortement influencée par le protocole de routage [78][61].

Nous utilisons la simulation pour évaluer la capacité de la métrique à prédire la performance du protocole, et choisissons d'évaluer des protocoles de routage standards de l'IETF. La performance d'AODV [2], DSR [3], et OLSR [4] (selon UM-OLSR-0.8.8 [80]) est étudiée en fonction des métriques de mobilité LC, LD et LS. Quand à la performance, elle est évaluée par simulation selon les métriques présentées ci-après.

### 3.2.1 Métriques de performance

Deux métriques de performance [81] sont évaluées :

1) **Le taux de paquets livrés (Packet Delivery Ratio : PDR)** : c'est la proportion des paquets de données livrés à la destination.

2) **Le surcoût (overhead) normalisé de routage** : le nombre de transmissions de paquets de routage par paquet de données *"livré"* à la destination. Notons qu'à chaque relayage une transmission de paquet de routage est comptabilisée. Le surcoût de routage inclut : A) les paquets du protocole de routage (en octet) tel que de Route Request, Route Reply, Route Error, etc., B) les informations de routage incluses dans les paquets de données, par exemple le paquet de données transmis avec un routage DSR a une en-tête variable, indiquant la route à suivre par le paquet. Le surcoût de routage sur paquet de donnée est calculé en comparant le paquet transmis au niveau routage (RTR dans le simulateur NS) et le paquet original (traité au niveau AGT dans NS). Ainsi, nous calculons le surcoût de routage normalisé par :

*100 * (le surcoût de protocole de routage sur le paquet de données + les paquet de routage) / (Paquet Original (AGT) transmis au RTR)*

### 3.2.2 Cœfficient de corrélation

Pour mesurer l'efficacité de la métrique de mobilité, nous avons calculé le cœfficient de corrélation. Sa valeur entre *-1* et *1* mesure le degré auquel deux variables sont linéairement proportionelles. Pour une relation linéaire parfaite avec une pente positive entre les deux variables, nous avons un cœfficient de corrélation de *1* ; avec une corrélation de pente négative la valeur est *-1*. S'il y a une corrélation positive, quand une variable a une valeur élevée (faible), alors l'autre variable a également une valeur élevée ; dans le cas d'une corrélation négative la valeur sera alors faible.

Un cœfficient de corrélation de *0* indique qu'il n'y a pas de relation linéaire entre les variables.

### 3.2.3 Relations prévues entre métriques de mobilité et performance

Parce qu'une bonne métrique de mobilité doit pouvoir indiquer ou prédire la performance du protocole, nous précisons les relations entre les variations de métriques et les performances attendues, et interpréterons nos résultats de simulation en jugeant de la concordance *"relations attendues relations obtenues"*.

TAB. 3.1 – Relation entre les métriques de mobilité et la vitesse maximale

| métrique de mobilité | Vitesse | |
|---|---|---|
| | Faible | Forte |
| LC | Faible | Forte |
| LD | Forte | Faible |
| LS | Forte | Faible |

TAB. 3.2 – Relation entre les métriques de performance et les métriques de mobilité

| métrique de mobilité | PDR | | Surcoût | |
|---|---|---|---|---|
| | Faible | Forte | Faible | Forte |
| Vitesse | Forte | Faible | Faible | Forte |
| LC | Forte | Faible | Faible | Forte |
| LD | Faible | Forte | Forte | Faible |
| LS | Faible | Forte | Forte | Faible |

Les relations entre les métriques de mobilité et la vitesse de déplacement des nœuds que nous attendons sont indiquées dans le tableau 3.1. Nous considérons le facteur de vitesse de déplacement d'une part, par ce que c'est un paramètre de nos simulations (voir paragraphe suivant) et, d'autre part car c'est un facteur qui dans de nombreux articles d'évaluation de protocoles de routage est considéré comme représentatif de la mobilité. Nous prédisons également la relation entre les performances protocolaires et les métriques de mobilité dans le tableau 3.2. Pour une meilleure compréhension, nous présentons sur la figure 3.4 les relations attendues entre la mobilité et les performances du protocoles : l'axe $X$ représente une mobilité croissante de *"faible"* à *"forte"* et les résultats prévus relatifs au PDR et au surcoût sont sur l'axe $Y$. Par ailleurs, l'évaluation de l'aptitude d'une métrique de mobilité est relative à la corrélation entre les performances et la valeur de cette métrique selon la figure 3.4, c'est-à-dire que pour un cœfficient de corrélation entre le PDR

et la métrique de mobilité autour de *-1* le PDR est diminué quand la mobilité est plus forte ; par contre le cœfficient de corrélation entre PDR et métrique de mobilité étant autour de *1* alors le surcoût est augmenté quand la mobilité est plus forte.

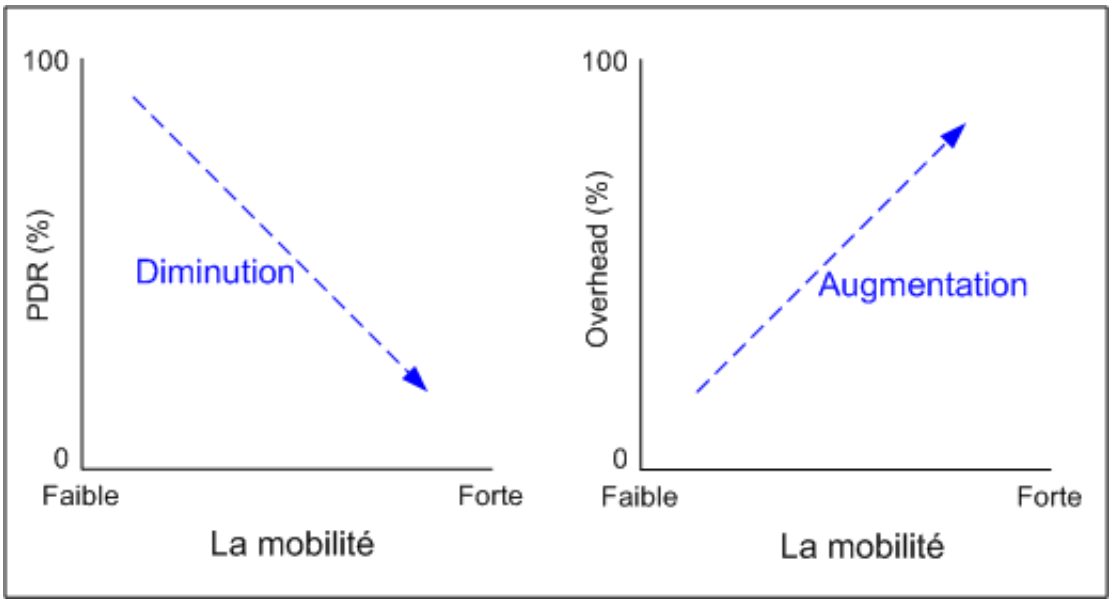



FIG. 3.4 – Résultats attendus de PDR et surcoût selon la mobilité

## 3.3 Paramètres d'évaluation

### 3.3.1 Modèle de mobilité

Pour étudier l'effet du type de mouvement sur les performances du protocole de routage MANET, les modèles Random Waypoint (RWP) [49], et Reference Point Group Mobility (RPGM) [54] seront analysés. Pour rappel,

1) **Random Waypoint** est largement utilisé dans la littérature pour simuler des réseaux ad hoc : à chaque instant, un nœud choisit au hasard une destination et se déplace vers cette dernière avec une vitesse choisie au hasard uniformément entre [0, Vmax], où Vmax est la vitesse maximum pour chaque nœud mobile. Après avoir atteint la destination, le nœud s'arrête pour une durée définie par le paramètre *"temps de pause"*. Après cette durée, il choisit une nouvelle destination au hasard et répète le procédé dans son entier jusqu' à la fin de la simulation.

2) **Reference Point Group Mobility** peut être utilisé pour modéliser la communication de champ de bataille militaire. Chaque groupe a un centre logique (le dirigeant de groupe) qui définit le comportement de mouvement global du groupe. Au début, chaque membre du groupe est uniformément distribué dans le voisinage du dirigeant de groupe. Par la suite, à chaque instant, chaque nœud a une vitesse et une direction qui sont définies en rapport à celles du chef de groupe par une déviation aléatoire.

### 3.3.2 Modèle de simulation

L'outil de simulation est NS2.30 [48]. Nous considérons les trois cas d'évaluation suivants :

**Cas 1 :**

Nous considérons des modèles généraux (par opposition au modèle particulier avec une configuration de mobilité prédéfinie, voir cas 3) avec des temps de simulation de 1000 secondes et 3000 secondes, sur 10 nœuds dans un secteur de 1000m x 1000m, en RWP et RPGM

- Nous étudions la calibration des simulations en considérant la durée de temps nécessaire à l'établissement d'un régime stationnaire, et la durée de simulation. L'effet du temps d'atteinte du régime stationnaire *"Warm up"*, ou période initiale, pour les deux durées de simulation est étudié. Lorsque la période initiale est décomptée, les paquets sont effectivement transmis sur le réseau après la période initiale, et les métriques de mobilité ne sont calculées qu'àprès cette période, estimée à 500 secondes (st : start time = 500s. sur les figures).
- Pour RWP, nous utilisons une topologie de 10 nœuds. Pour RPGM, nous utilisons 5 groupes de 2 nœuds qui se déplacent d'une manière indépendante les uns des autres et dans un mode chevauchant. Les deux paramètres du modèle, Speed Deviation Ratio : SDR et Angle Deviation Ratio : ADR, sont réglés à 0, 1. Les mêmes fichiers *"point de contrôle"* (utilisé pour définir le mouvement du dirigeant de groupe) sont utilisés pour des topologies différentes dans RPGM.

**Cas 2 :**

Nous considérons des modèles généraux avec des temps de simulation de 1000 secondes, sur 50 nœuds dans un secteur de 1000m x 1000m, en RWP et RPGM

- Nous étudions l'influence du nombre de nœuds, (indirectement de la densité), sur les métriques.
- Pour RWP, nous utilisons une topologie de 50 nœuds. Pour RPGM, nous utilisons 5 groupes de 10 nœuds. Les mêmes fichiers point de contrôle (pour 5 groupes des 2 nœuds) sont utilisés pour des topologies différentes dans RPGM.

**Cas 3 :**

Nous étudions un scénario particulier

- Il contient 3 nœuds avec un temps de simulation de 1000 secondes dans un secteur de 300m x 300m. Deux nœuds extrêmes sont fixés aux positions (40, 40) et (260, 260) (figure 3.5). A cause de la distance trop importante choisie, ils ne peuvent communiquer directement et doivent donc utiliser un relais, construire une route. Les caractéristiques de mouvement des nœuds sont similaires à RWP.

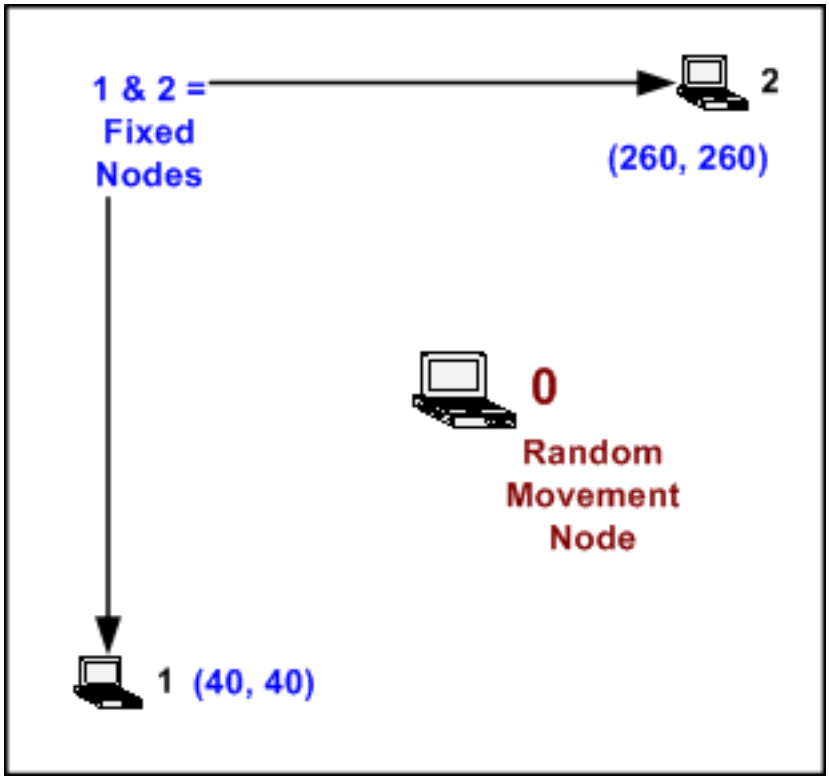



FIG. 3.5 – Scénario particulier avec 3 nœuds

Précisons également :

- le temps de pause est nul pour tous les cas étudiés.
- les tailles des tampons d'interfaces sont 50 paquets.
- dans les cas 1 et 2 sur modèle général, pour produire des modèles de mouvement différents à chaque modèle de mobilité, 15 scénarios dans chaque vitesse

de modèles de mobilité sont créés, la vitesse maximale (Vmax) variant de 2,5 à 25,0 m/s par étape de 2,5m/s.
- un niveau de confiance de 95% est considéré.
- le modèle de trafic : pour le modèle de RWP 10 nœuds et RPGM 5 groupes des 2 nœuds, le modèle de trafic est composé de 6 sessions UDP, pour RWP 50 nœuds et RPGM 5 groupes des 10 nœuds, il y a 30 sessions UDP. Les paires source/destination sont choisies au hasard. Les données sont générées à un débit de 4 paquets/sec et la taille de paquet est 512 octets. Dans le cas 3, d'étude de scénario, le modèle de trafic consiste en 1 session UDP.
- un débit nominal de 2 Mégaoctet/seconde et une gamme de transmission radio nominale de 250 mètres sont utilisés.

## 3.4 Résultats et discussion

### 3.4.1 Relation entre les métriques de mobilité et la vitesse de simulation

Notre premier objectif est de de faire croître les métriques de mobilité afin de déterminer l'impact de cette variation sur les performances protocolaires. Pour cela, nous devons en premier lieu mettre en place un procédé pour faire croître les métriques, aussi déterminons nous la possibilité d'obtenir des valeurs croissantes des métriques en augmentant la valeur de la vitesse dans la simulation.

Les résultats, des valeurs moyennes des métriques LC, LD et LS, sont présentés pour tous les modèles de simulation des cas 1, et cas 2 à savoir : durée de simulation de 1000s et 3000s, prise en compte du temps d'initialisation de 500ms ou pas, modèle RWP, RPGM, 10 nœuds 50 nœuds (figure 3.6). La valeur des métriques est rapportée selon la vitesse maximale notée en abscisse sur les figures 3.8, 3.10 et 3.13.

Nous relevons :

- Dans la figure 3.6 (a), la vitesse affecte la valeur de la métrique LC fortement. A une vitesse très basse, le LC moyen est faible ; dès lors que la vitesse augmente, les augmentations du LC moyen sont pratiquement linéaires (un point d'anomalie existe avec le modèle RPGM à 25 m/s qui mériterait d'être approfondi par une étude de validation des modèles sous NS, hors de notre propos en raison du temps limité imparti).
- Dans la figure 3.6 (b), la vitesse affecte également la métrique du LD moyen jusqu'à un certain point. Pour une vitesse très basse, LD moyen est considérablement élevé. Lorsque la vitesse augmente, LD moyen augmente en proportion. Au delà d'une vitesse de 17,5 m/s, LD moyen change faiblement.
  - Selon le modèle de mobilité, les nœuds se déplacent très rapidement vers une destination, puis choisissent une nouvelle destination et s'y rendent, et ainsi de suite, et, à ces vitesses, les nœuds peuvent alors se connecter avec un autre nœud dans une période très courte mais très fréquemment comme indiqué sur la figure 3.6 (a). Par conséquent, LD moyen est quasi stable quand la vitesse dépasse 17,5 m/s.
- Selon la figure 3.6 (c), la vitesse affecte le LS moyen. Le LS moyen est similaire au LD moyen.
  - Les valeurs de LS viennent du LD divisé par LC : à partir d'une vitesse de 17,5 m/s, LS moyen change légèrement aussi.

A première vue, la métrique LC semblerait la plus conforme pour refléter la mobilité dans la mesure où elle augmente quasi-linéairement avec la vitesse. Cependant, les résultats que nous présentons par la suite indiqueront que la vitesse n'est en fait pas une bonne métrique de mobilité (voir la section prochaine), car elle ne permet pas, avec le simulateur utilisé, de prédire correctement la performance protocolaire. A cette étape, nous ne pouvons donc pas choisir la meilleure métrique de mobilité et devons analyser les performances des protocoles de routage. Pour ce faire, nous déterminons quels sont les types de résultats sur lesquels nous allons appuyer l'analyse numérique, avec ce que nous nommons l'étape de calibration.

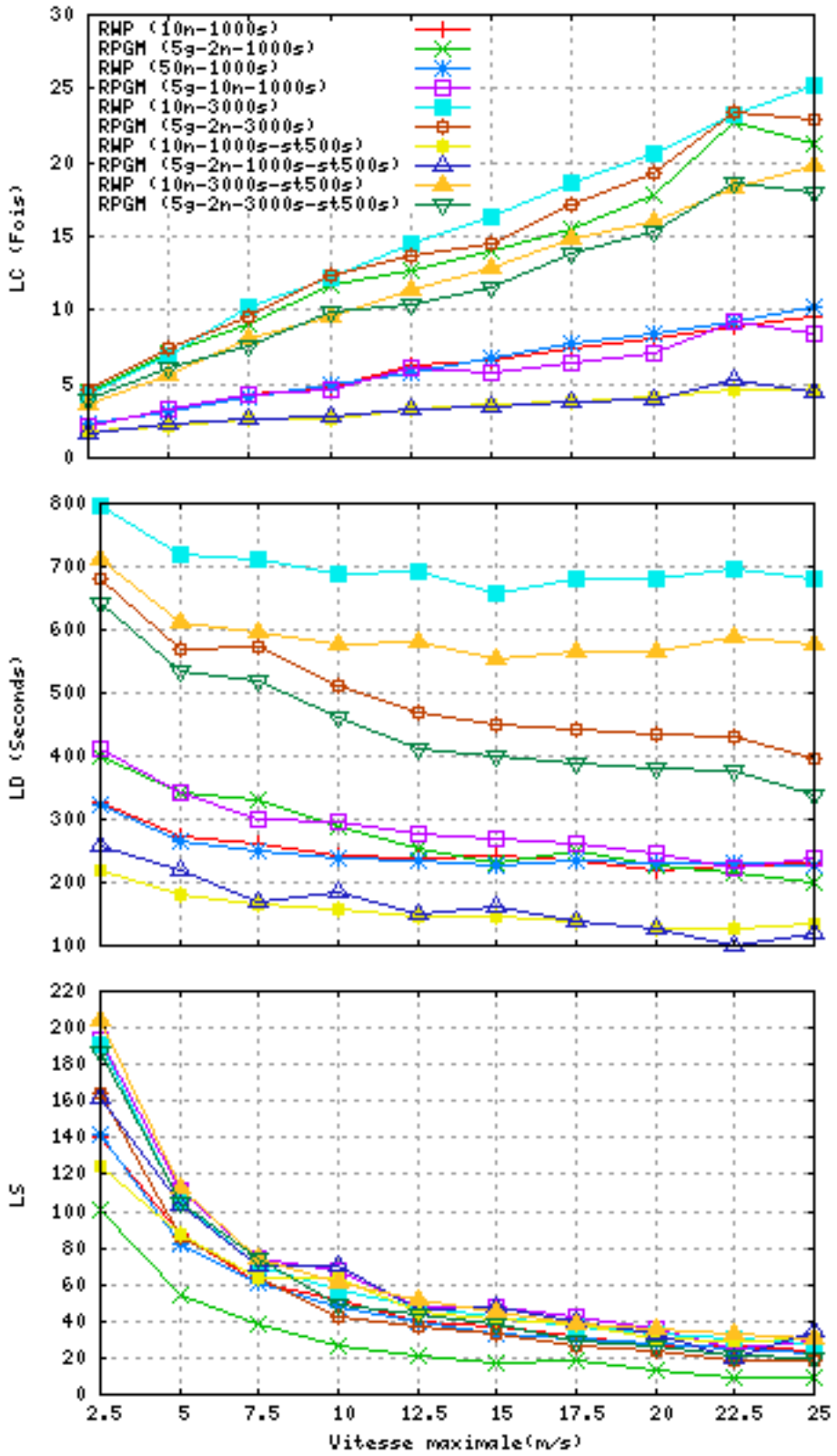



FIG. 3.6 – Relation entre les métriques de la mobilité et la vitesse maximum

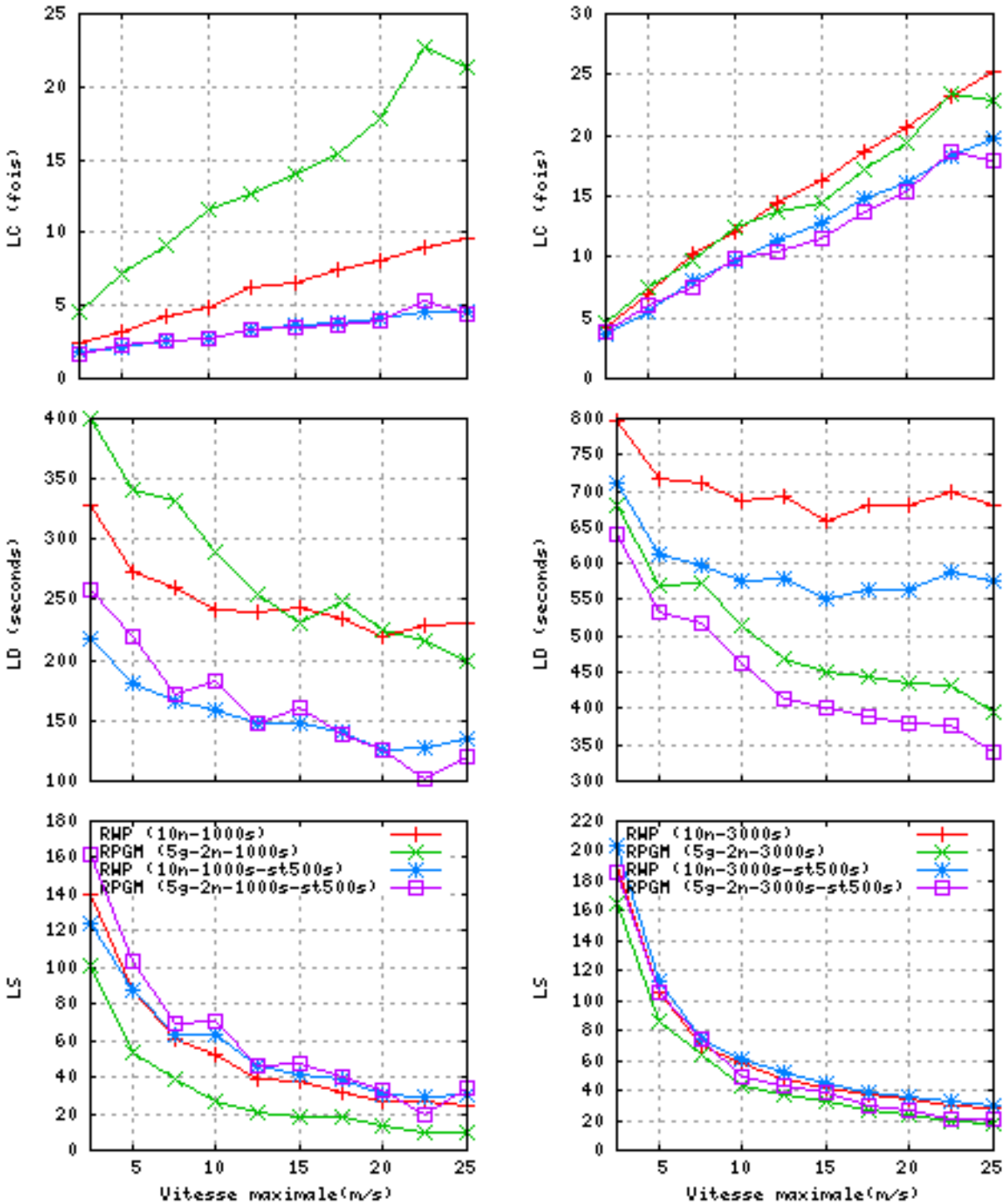
### 3.4.2 Calibration

Dans la figure 3.6 nous avons toutes les courbes des différents cas de simulation, avec une tendance d'évolution des métriques globalement cohérente entre elles. Nous examinons à présent ces courbes en fonction des paramètres expérimentaux : durée de simulation, de mesure : à partir de quand la mesure est-elle prise ? et de mobilité : quelle est l'influence du modèle ?

– **Métriques et durée de simulation avec ou sans régime transitoire**
Au delà des erreurs des modèles des systèmes simulés, le calcul des métriques peut est affecté par le modèle de mobilité et par le modèle de trafic. Le modèle Random Waypoint choisit une vitesse maximale de déplacement *"aléatoire"*, et il est soumis à un régime transitoire durant les premières secondes de la simulation. La génération de trafic CBR débute avec un système composé de tampons mémoires vides, ce qui provoque également un fonctionnement transitoire. Pour diminuer les erreurs de mesure dues à ces régimes transitoires, une solution est de ne démarrer celles-ci qu'après le *"régime transitoire"* (une valeur de 500s est proposée dans [82] et une valeur de 600s est proposée dans [49]). La durée de simulation qui influe sur le nombre d'évènements est également une solution pour diminuer les erreurs de mesure. Notons que le fait d'augmenter le nombre de nœuds dans la simulation permet également d'améliorer la prise de mesure, en augmentant le nombre d'évènements.

La figure 3.7 présente les différences obtenues au augmentant la durée de simulation, en prenant ou pas en compte un *"régime transitoire"*. Une durée de 3000s avec un démarage des mesures à 500s diminue l'impact du modèle de mobilité RPGM ou RWP sur les résultats, et augmente la corrélation entre les métriques et la vitesse. Nous avons choisi de présenter par la suite uniquement les résultats pour ce cas de simulation. Le calcul de cœfficient de corrélation sur les performances réseau et les métriques pour les différents cas de simulation indique des résultats plus élevés pour ce cas de simulation.

Une durée de 3000 secondes représente dans le cas de configuration de 50 nœuds avec le protocole OLSR des durées de temps très importantes. Dans la mesure où le nombre d'évènement est augmenté par le nombre de nœuds (50 au lieu de 10) et que dans le cas pire des erreurs de mesures observées sur 10 nœuds, nous n'avons pas d'erreur sur l'information à laquelle nous nous intéressons, c'est-à-dire s' il y a ou pas influence de la métrique sur la performance, nous avons effectué des simulations uniquement sur 1000s dans le cas de 50 nœuds.




(a) RWP 10 nœuds avec 1000s

(b) RPGM 5 groupes des 2 nœuds avec 1000s

FIG. 3.7 – Calibration les métriques de mobilité pour 10 nœuds

### 3.4.3 Relation entre la performance et la métrique de mobilité

Les performances protocolaires observées sont le PDR et le surcoût de routage d'abord sur 10 nœuds puis sur 50 nœuds. Premièrement, nous les étudions en faisant varier la vitesse (figure 3.8). Deuxièmement, nous classifions les scénarios selon les LC moyen, LD et LS (figure 3.8) et obtenons la performance en fonction des métriques. Une première remarque générale concerne le bon aspect des résultats. Dans notre étude, un résultat est *"bon"* s'il est conforme aux résultats prévus dans le tableau 3.2.

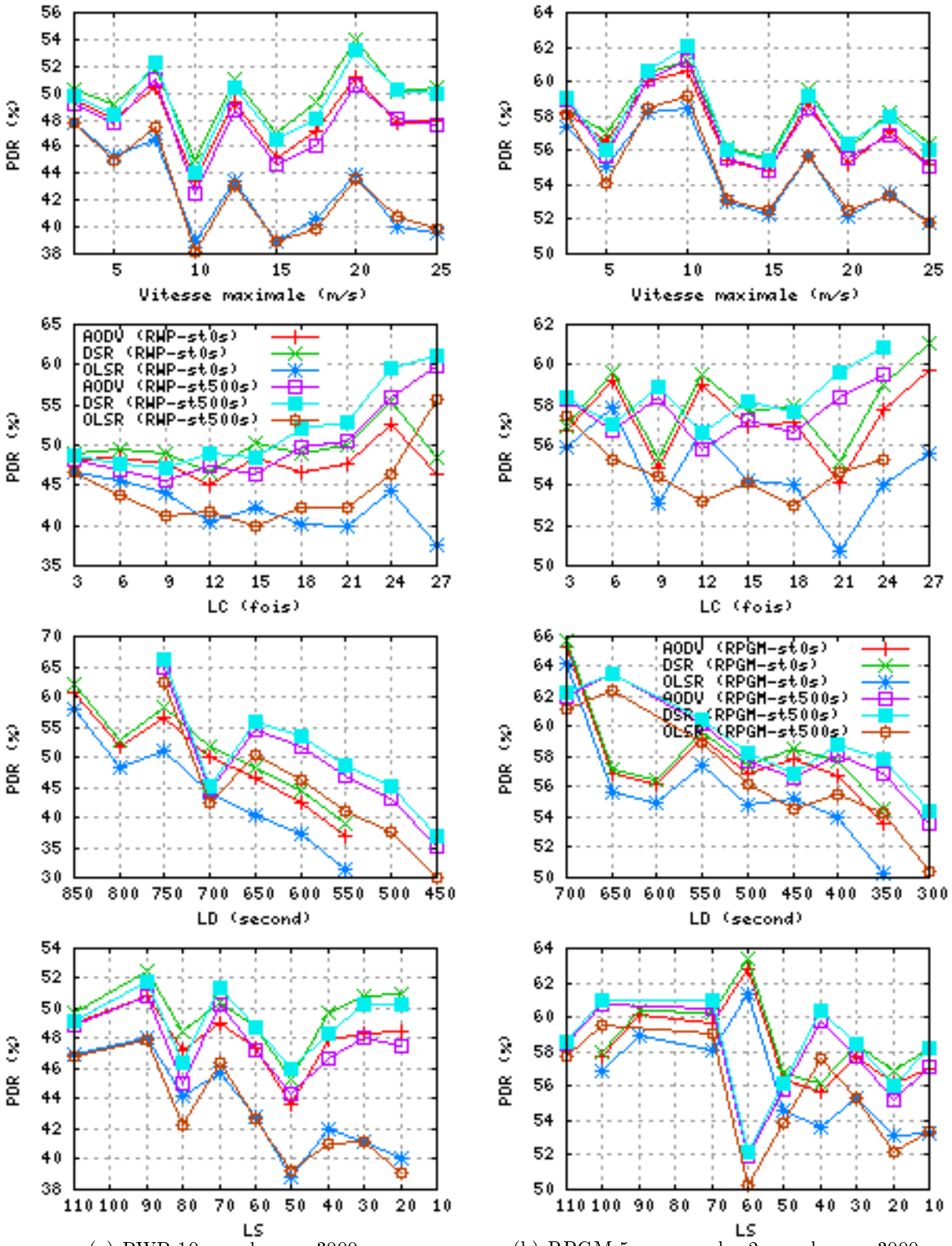
De facon à faciliter la lecture des diagrammes, nous classifions, quelle que soit la métrique, en abscisse, la mobilité de faible à haute. Un *"bon"* diagramme doit avoir la même tendance que ceux de la figure 3.4. Notons qu'avec ces conventions, la durée de liaison est rangée par ordre décroissant en $\boldsymbol{X}$, car plus la durée de liaison est faible plus la mobilité est importante.

#### 3.4.3.1 Cas 1 étude sur 10 nœuds

Selon la figure 3.8, les performances ne sont pas bonnes que ce soit avec le modèle RWP ou le modèle RPGM. Par exemple, le PDR ne diminue pas relativement quand la vitesse augmente, de même le PDR ne diminue pas relativement quand le LC moyen augmente. Nous faisons la même remarque en ce qui concerne la variation du PDR selon le LD moyen ou le LS moyen.

Cette constation est confirmée par le calcul de cœfficient de corrélation indiqué dans la figure 3.9 : les métriques des performances ne sont pas corrélées aux métriques de mobilité. Cependant, pour le surcoût de routage les métriques de mobilité sont davantage *"corrélées"* (figure 3.9) que pour le PDR. La corrélation n'est cependant pas indépendante du protocole de routage. OLSR qui est un protocole proactif n'est pas directement influencé (corrélation de l'ordre de 0.6) par l'état du lien mesuré. Nous remarquerons que les performance des protocoles sont faiblement relatives aux métriques en terme de PDR mais sont plus sensibles en terme de surcoût.

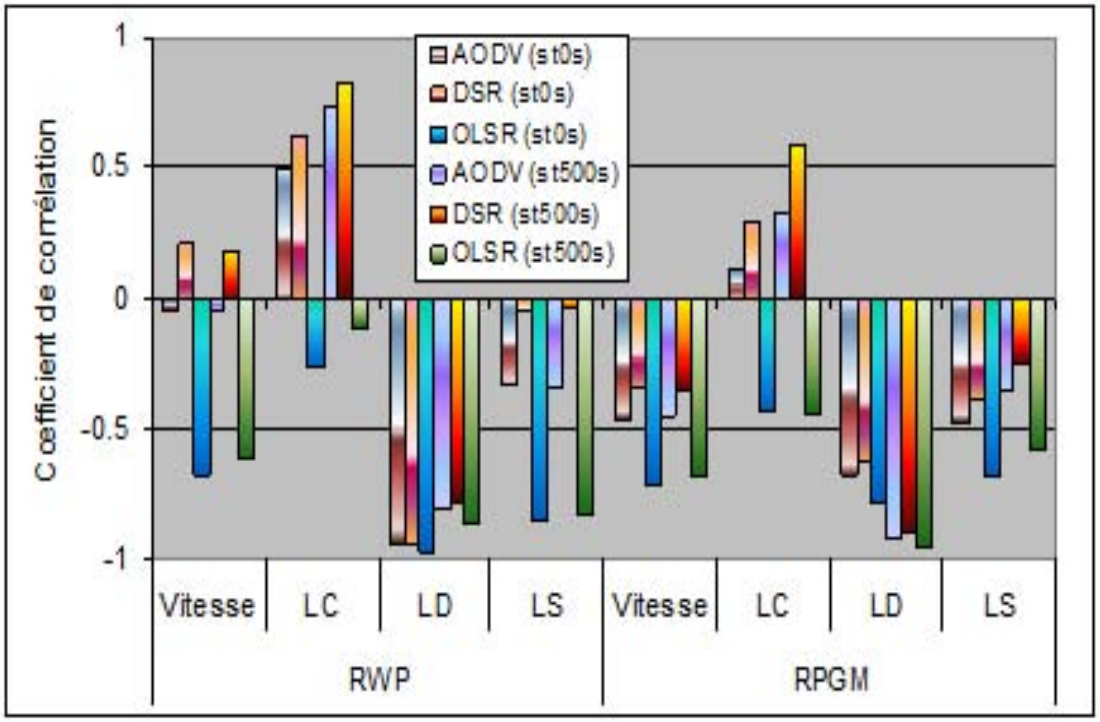
LD semblerait la moins mauvaise des métriques dans la mesure où elle présente le moins *"d'anomalies"*. Ainsi, en RWP, le point d'anomalie relevé est le premier point LD = 310s. Bien qu'étant censé représenter la mobilité la plus faible de réseau, la PDR de ce point est moins importante que celle obtenue avec des durées de liens plus petites. Pourtant, LD, comme les autres métriques n'est pas significative de mobilité dans le cas d'une mobilité RPGM.



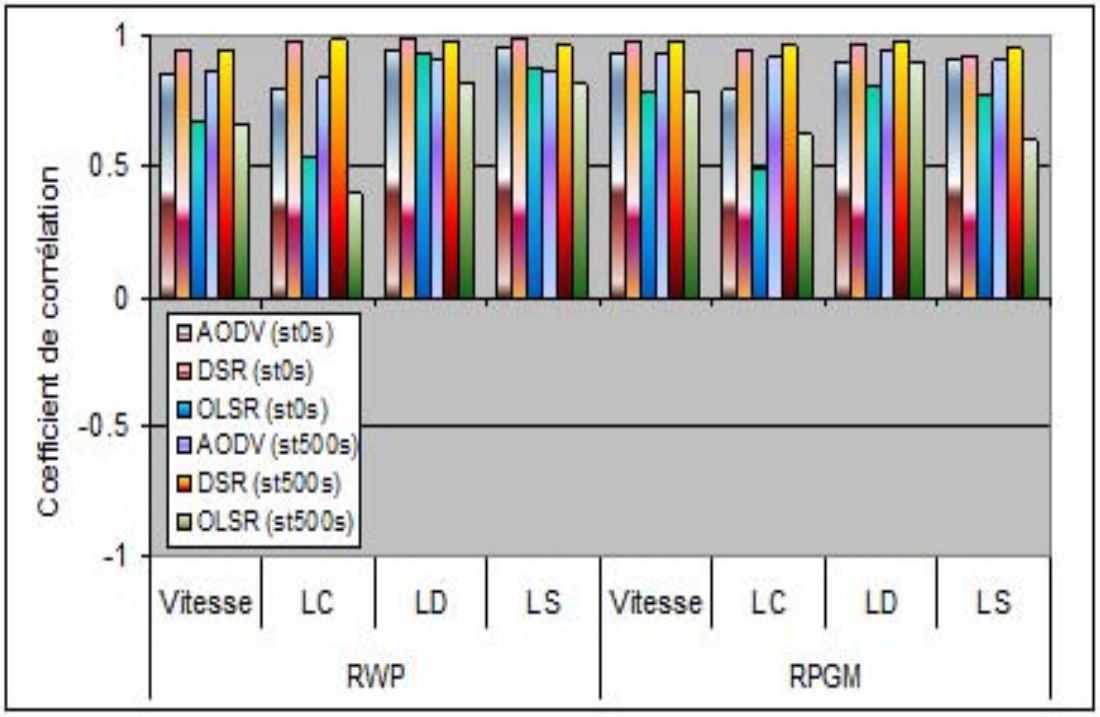

(a) RWP 10 nœuds avec 3000s

(b) RPGM 5 groupes des 2 nœuds avec 3000s

FIG. 3.8 – Performances pour 10 nœuds relativement aux métriques de mobilité pour un temps de simulation 3000s




(a) Coefficient de corrélation avec PDR




(b) Coefficient de corrélation avec Surcoût

FIG. 3.9 – Cœfficient de corrélation RWP 10 nœuds et RPGM 5 groupes des 2 nœuds pour un temps de simulation 3000s

**Discussion** En conclusion, aucune des métriques ne paraît être représentative de la mobilité, lorsque nous considérons 10 nœuds et des valeurs moyennes. Nous avancons deux hypothèses à ce résultat :

- la façon de calculer la métrique, c'est-à-dire la moyenne n'est pas correcte : en pratique le nombre de liens que mesure un nœud n'est pas suffisant pour qu'une valeur moyenne soit significative, ou alors le temps sur lequel est calculé la moyenne est insuffisant. Sur ce dernier point, notons qu'une augmentation de la durée du calcul de la métrique peut-être préjudiciable à une adaptation. L'adaptation protocolaire doit être capable d'être suffisament rapide et ne doit pas attendre trop longtemps afin d'être sure que le calcul est fiable.
- la mobilité telle que nous l'avons définie ne suffit pas à refléter la performance : un nœud qui se déplace est source de diminution de performance, mais s'il a de nombreux voisins le fait de se déplacer rapidement ne dégrade pas forcément la performance. Elle est liée à la mobilité non pas des nœuds mais de la topologie qui elle est fonction de la densité des nœuds.

Le deuxième cas d'étude augmente la densité du réseaux.

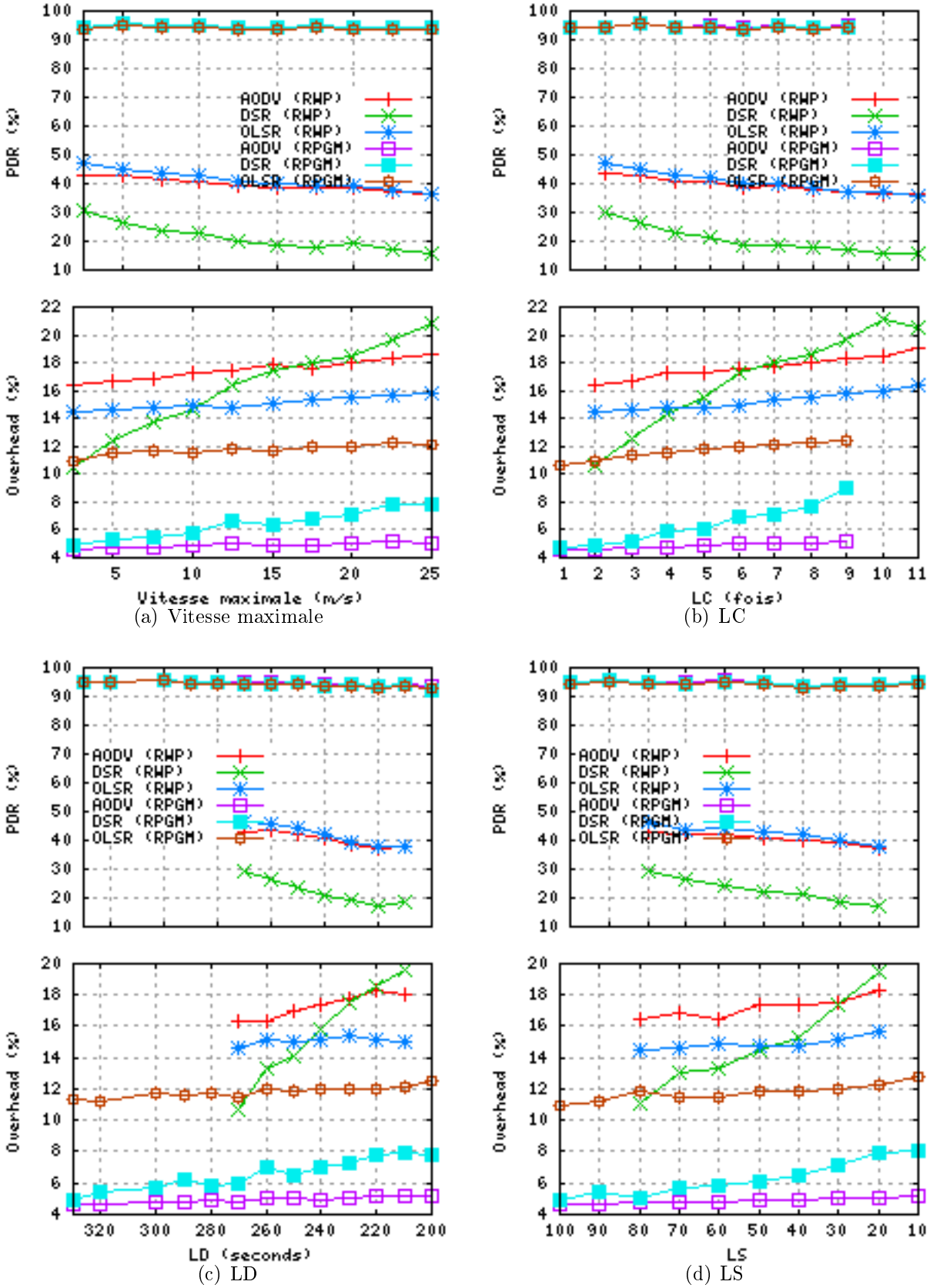
#### 3.4.3.2 Cas 2 étude sur 50 nœuds

Selon la figure 3.10, nous constatons une apparence plus conforme à ce que nous attendions de bonnes métriques. Elles sont davantage relatives à la performance, et ce pour les deux modèles de mobilité. Par exemple, le PDR diminue relativement quand la vitesse augmente (figure 3.10-(a)), ou que le LC moyen augmente (figure 3.10-(b)), le PDR augmente relativement quand LD augmente (figure 3.10-(c)) ou que LS augmente (figure 3.10-(d)).

De la même manière, le résultat du cœfficient de corrélation dans la figure 3.11 indique une meilleure corrélation que précédemment entre les métriques et les performances sur la figure 3.10. Quant au surcoût de routage, son évolution est également concordante à l'augmentation de la mobilité : quand la vitesse augmente (figure 3.10-(a)), le LC moyen augmente (figure 3.7) et le surcoût augmente relativement (figure 3.10-(b)), par contre le surcoût augmente relativement quand le LD moyen diminue (figure 3.10-(c)) ou que LS moyen diminue (figure 3.10-(d)).

En ce qui concerne le modèle de mobilité, les valeurs de PDR en RPGM sont plus importantes qu'en RWP et inversement les surcoûts en RPGM sont plus faibles que ceux-la en RWP ; ceci parce que la majorité des destinations de trafics se trouvent dans le même groupe qui est source de trafic.

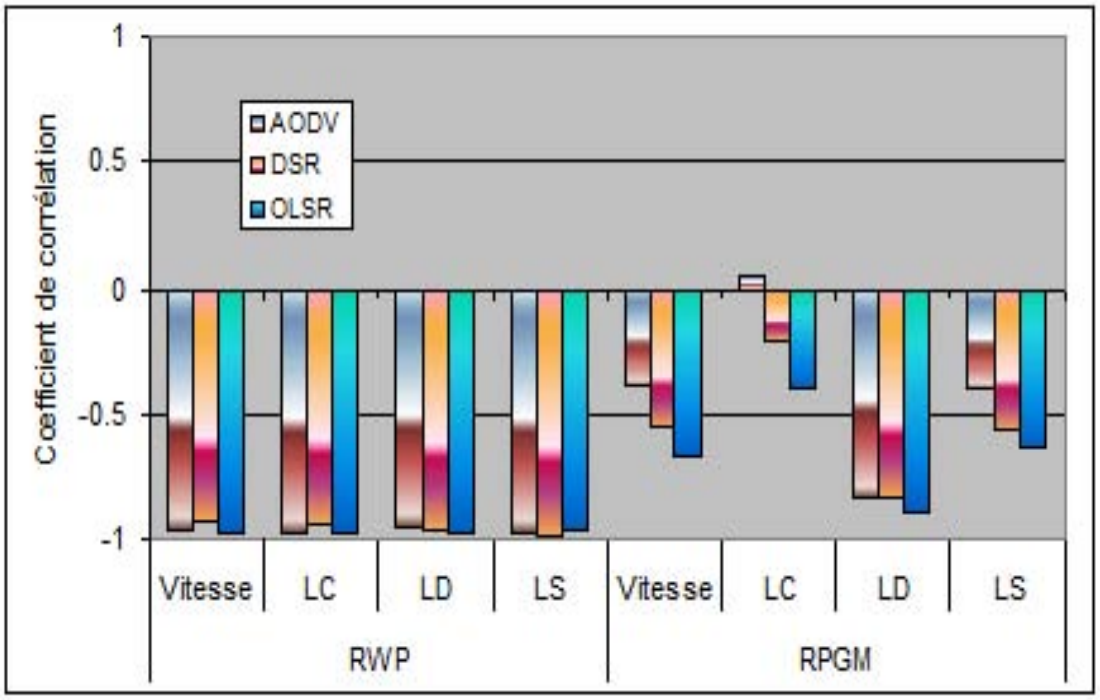
Nous notons que les protocoles de routage ont des performances comparées conformes à leur fonctionnements et aux résultats de la littérature. Ainsi OLSR, qui est adapté à un nombre de nœuds importants, présente un PDR plus elevé, et un surcoût plus faible, que les autres protocoles. Le protocole DSR est plus sensible à la mobilité, le surcoût est important.



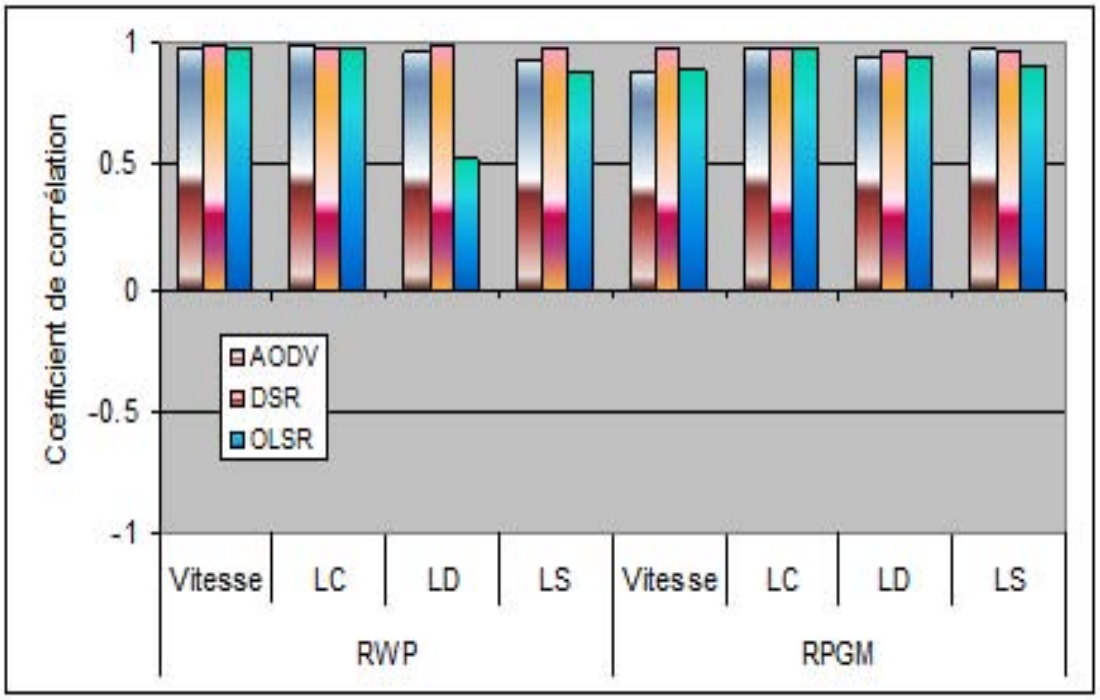

(a) Vitesse maximale (b) LC

(c) LD (d) LS

FIG. 3.10 – Performances pour 50 nœuds relativement aux métriques de mobilité pour un temps de simulation 1000s




(a) PDR et les métriques de la mobilité




(b) Surcoût et les métriques de la mobilité

FIG. 3.11 – Cœfficient de corrélation dans RWP 50 nœuds et RPGM 5 groupes des 10 nœuds

**Discussion :** Nous obtenons une meilleure corrélation entre performances et métriques lorsque la densité du réseau augmente. Cependant, l'influence de la métrique sur les performances est liée au modèle de mobilité et au protocole.

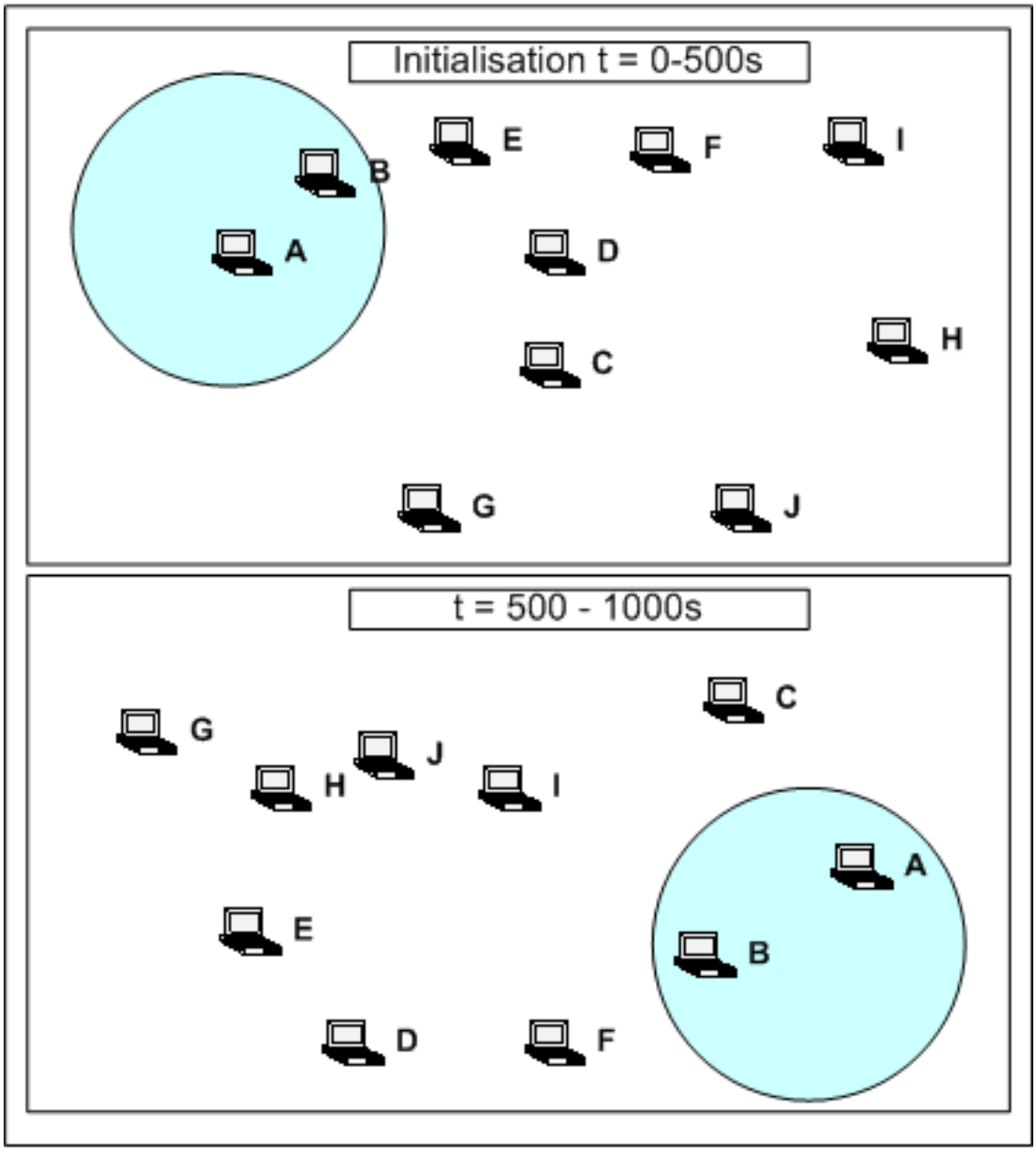



FIG. 3.12 – Cœfficient de corrélation dans RWP 50 nœuds et RPGM 5 groupes des 10 nœuds

Par exemple le PDR est bien corrélé avec la métrique LC en modèle RWP mais pas en RPGM. Une explication est dans la procédure de calcul de la métrique : c'est un calcul de moyenne dont la précision augmente quand le nombre des nœuds augmente et qui est lié à l'équi distribution du modèle de mobilité et de trafic. Si cette condition n'est pas réalisée, nous pouvons nous trouver dans le cas de l'exemple de la figure 3.12. Si les nœuds $A$ et $B$ de la figure ont un lien en état de connexion

dès le début de la simulation jusqu'à 500 secondes mais n'ont aucune connexion avec les autres nœuds en raison de leur éloignement géographique, quand nous faisons la moyenne de la métrique en divisant par le nombre de nœuds dans le réseau, alors les valeurs obtenues ne présentent pas le vrai état de réseau. Ceci explique en partie pourquoi la corrélation entre performances et métriques est plus importante dans le modèle RWP que dans le RPGM.

D'autre part, le protocole est un élément à prendre en compte. Ainsi pour 50 nœuds le surcoût de OLSR est peu corrélé à la durée de liens, de l'ordre de *0,5*, alors que les autres protocoles ont une corrélation importante de l'ordre de *0,9*. C'est que pour ce protocole le surcoût de routage est dicté par le timer d'annonce, le HELLO, et non à une panne de route (le protocole est proactif et non réactif).

Cependant la métrique durée de liaison apparaît être comme la plus *"généraliste"* des métriques. Quand la densité est suffisante, la métrique LD est la meilleure dans les deux modèles de la mobilité, alors que les autres métriques de la mobilité ne conviennent que dans un modèle (dans cette étude c'est RWP).

Notons cependant que si les métriques sont corrélées, nous n'avons pas réellement d'accroissement ou de décroissance des performances en fonction de leurs valeurs.

#### 3.4.3.3 Cas 3 étude sur un scénario

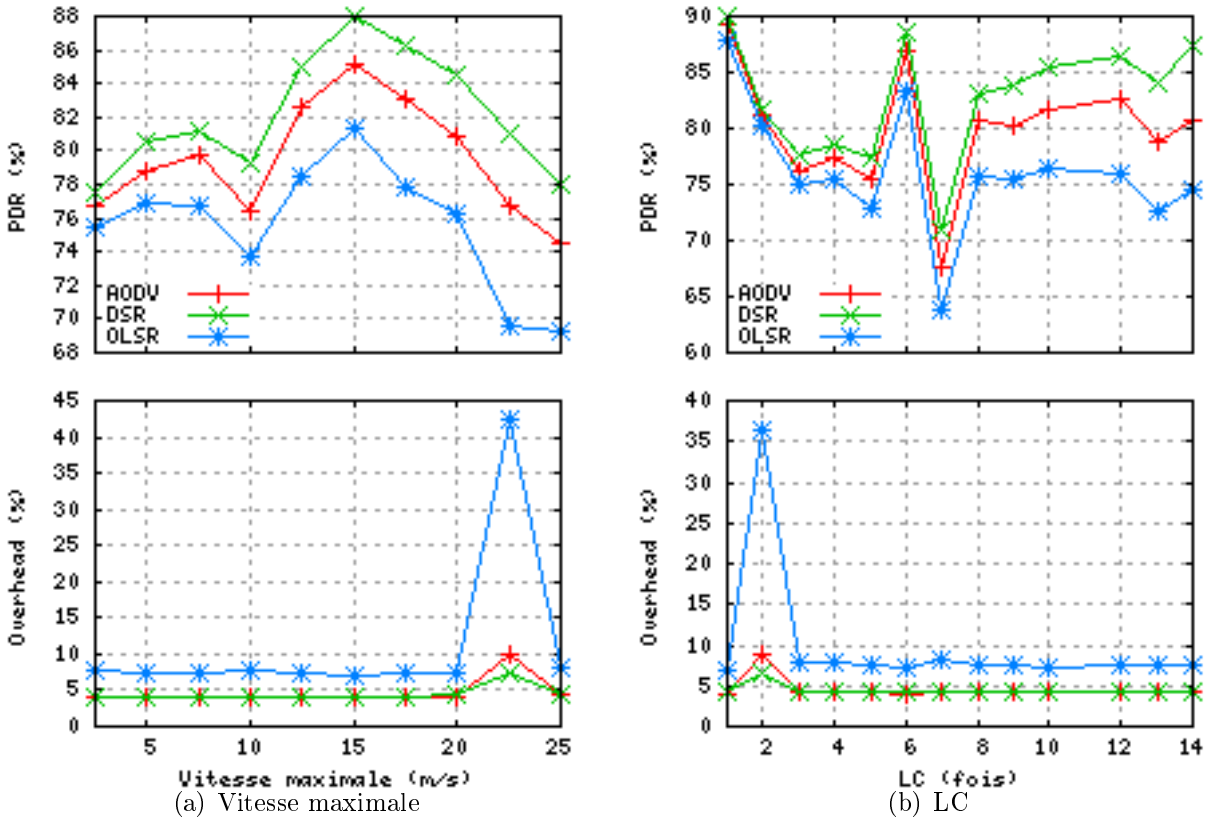
Nous avons jusqu'à présent travaillé dans un cadre général en essayant de déterminer si pour un nœud quelconque avec un modèle de mobilité quelconque il y avait une meilleure métrique de mobilité et nous avons relevé plusieurs limitations en particulier concernant le calcul de la métrique. Nous nous proposons à présent de déterminer une métrique pour un scénario particulier (cas3 : 3 nœuds en RWP). Comme précédemment, nous la déterminons en raison de son impact sur les performances du protocole.

Premièrement, les performances sont indiquées en fonction de la vitesse (figure 3.13-(a)). Tous les scénarios de vitesse sont classifiés par LC (figure 3.13-(b)), LD(figure 3.13-(c)) et LS (figure 3.13-(d)).

Selon les figures 3.13-(a) jusqu'à (d), les performances sont bien relatives seulement avec le LD moyen : c'est la seule métrique de mobilité pour laquelle les résultats obtenus sont conformes à ceux prévus dans le tableau 3.2. Idéalement, un LC plus faible doit donner une meilleure performance qu'un LC plus élevé mais les résultats obtenus ne montrent pas beaucoup de différences. Le cœfficient de corrélation de LD moyen montré dans la figure 3.14 est aussi très haut. Pratiquement, la performance du protocole dépend de LD, pas de LC comme nous l'avons expliqué par l'exemple présenté dans la figure 3.3.

Dans tous les cas, le PDR de DSR est le meilleur et OLSR a le plus grand surcoût. Cette mauvaise performance de OLSR, et bonne performance de DSR est tout naturellement due à la taille du réseau. Nous notons également une anomalie pour les vitesses 20 et 25 m/s, vraisemblablement due à une erreur de modèle NS2.

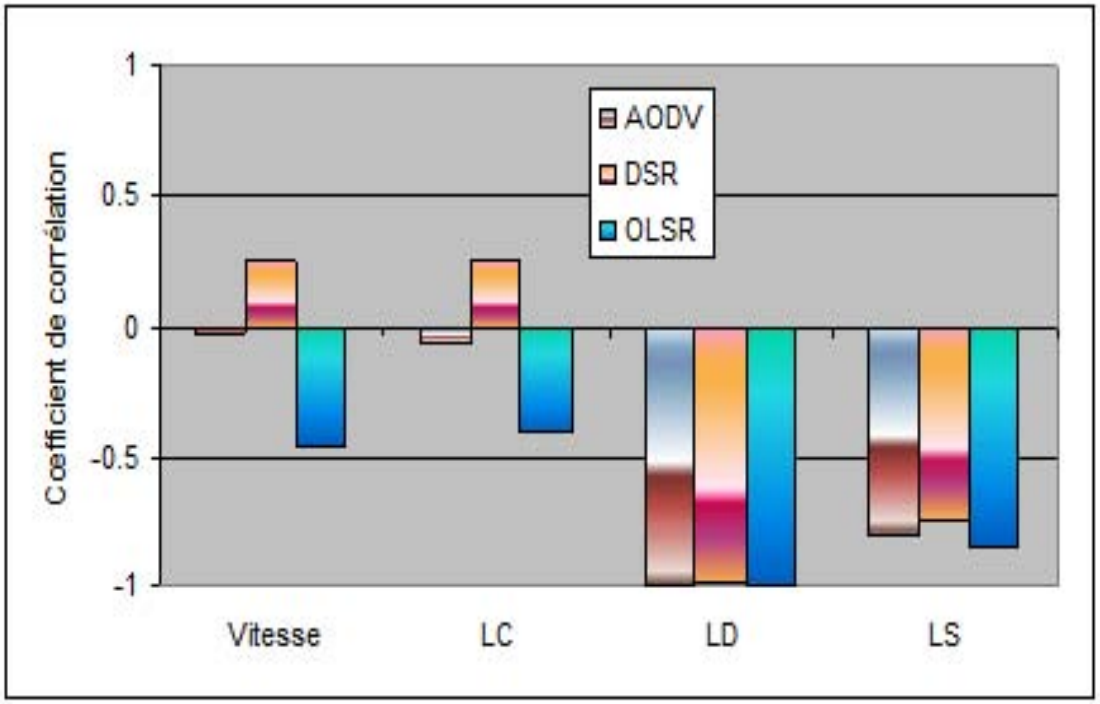
En conclusion, le LD moyen est la meilleure métrique de mobilité sur le scénario proposé. Le cœfficient de corrélation est de plus de 0,99 quel que soit le protocole de routage dans la figure 3.14, et les résultats concordent avec ceux attendus (figure 3.4).



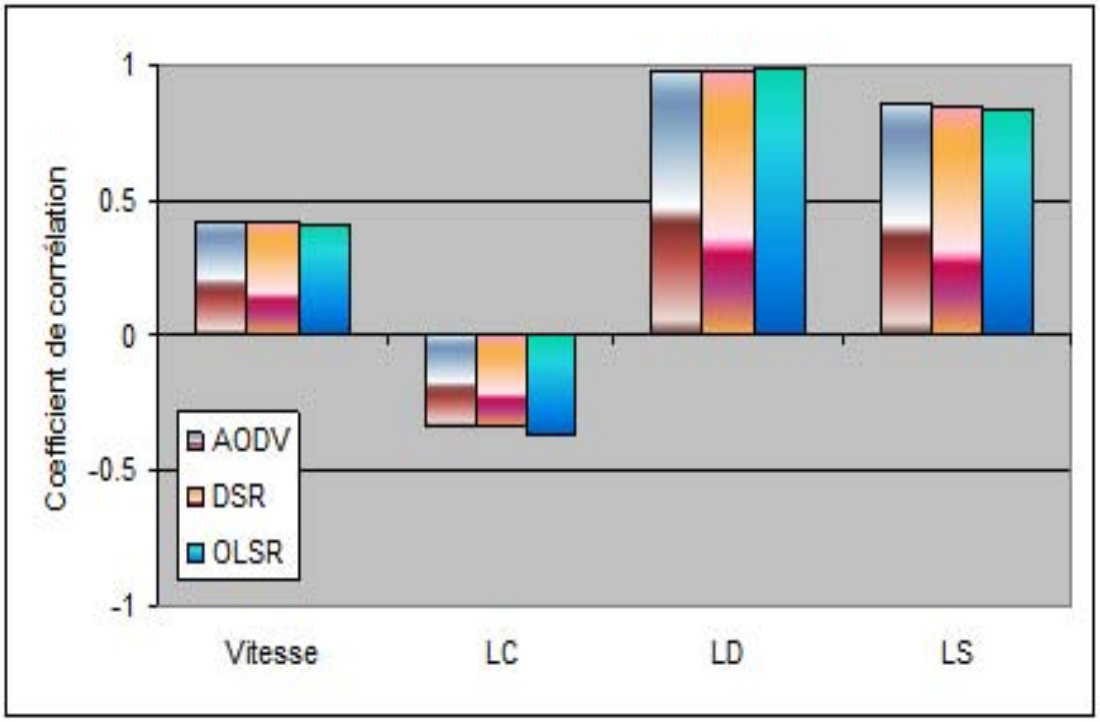

(a) Vitesse maximale (b) LC

(c) LD (d) LS

FIG. 3.13 – Performances pour 3 nœuds relativement aux métriques de mobilité pour un temps de simulation 1000s




(a) PDR et les métriques de la mobilité




(b) Surcoût et les métriques de la mobilité

FIG. 3.14 – Cœfficient de corrélation dans le cas 3

## 3.5 Conclusion

L'objectif du chapitre est de déterminer l'existence d'une meilleure métrique c'est-à-dire qui apporte le plus de gain de performance à une adaptation à la mobilité du système. Nous cherchons alors a déterminer quelle est la métrique qui est le plus corrélée avec la performance du système constitué par le réseau ad hoc.

En considérant que le protocole de routage est le facteur prépondérant de performance du système nous modélisons celui-ci par un protocole d'accès standard (IEEE 802.11) et différentes options de protocoles de routages, qui sont les principaux protocoles de l'IETF (AODV, DSR et OLSR). Nous simulons ensuite le système pour différents scénarios de mobilité aléatoire que nous moyennons pour obtenir un mouvement *"général"*, de façon à obtenir des résultats relativement indépendants du mouvement. Deux modèles de mobilité aléatoire sont étudiés le RWP et le RPGM.

Nous analysons la performance, exprimée par plusieurs métriques, en corrélation aux métriques de mobilité retenues dans le chapitre précédent : la durée de lien (LD), la fréquence de changement de lien (LC) et la stabilité de lien (LS). Les résultats que nous obtenons montrent l'importance du nombre de nœuds sur la corrélation : plus leur nombre augmente plus la corrélation entre métriques et performance grandit. Ils mettent également en évidence l'absence d'une métrique qui soit la meilleure quel que soit le protocole et la taille du réseau. Comme l'indique l'étude d'un scénario donné, la meilleure métrique de mobilité doit être déterminée cas par cas.

Bien que ce ne soit pas la meilleure métrique nous préconisons l'utilisation de la métrique LD, en raison de sa simplicité de calcul, de sa relative indépendance vis à vis du modèle de mobilité et de sa forte influence sur les performances des protocoles de routage.

Chapitre 4

# Propositions d'amélioration des performances de routage par métriques de mobilité

Dans ce chapitre, nous considérons l'adaptation à la dynamicité du réseau ad hoc par deux paramètres : la mobilité et la densité. Nous proposons des adaptations pour deux protocoles de routage OLSR et CSR en considérant deux types d'adaptations : le type par paramètres et celui par mode. Les métriques d'adaptation sont celles retenues par l'analyse qualitative et quantitative, c'est-à-dire, pour la métrique de mobilité, la durée de liaison (LD) pour le protocole OLSR et le nombre d'erreur de routes pour le protocole CSR, et, pour la densité, le degré d'un nœud. Différentes stratégies concernant l'intérêt d'utiliser une métrique ou une combinaison de métriques sont proposées et évaluées par simulation.

## 4.1 Aperçu général

Les performances des protocoles de routage sont influencées par la connectivité du graphe de connexion qui dépend du nombre de nœuds, la densité, et des déplacements des nœuds, la mobilité. Comme présenté précédemment, la densité est caractérisable par la métrique locale *nombre de voisin*s alors que la mobilité s'exprime dans le cas de protocole proactif par la métrique *durée de liaison* et dans le cas d'un protocole réactif par la métrique *erreurs de route.* Les adaptations que nous proposons sont définies pour des modèles de mobilité de type aléatoire où il n'est pas possible de calculer de façon exacte la durée de liaison. Les métriques sont calculées par mesure.

Remarquons que la densité calculée à partir du nombre de voisins d'un nœud peut être présentée (cf. section 2.2.2.1.1) comme une métrique de mobilité ; pour notre part nous préférons réserver le terme mobilité aux métriques durée de liaison et erreur de route.

### 4.1.1 Types d'adaptations

L'adaptation de routage consiste à introduire des métriques d'environnement pour choisir une route ou pour mettre en place une structure de routage. La littérature définit de nombreux protocoles choisissant *"une meilleure route"* ; en ce qui nous concerne, nous nous sommes centrés sur les adaptations de structure. Nous considérons deux protocoles qui mettent en place l'un une structure de type réseau d'arrière plan, l'autre, une structure de type cluster. Le premier protocole est le protocole standard IETF : OLSR. Le second protocole est développé au sein de l'équipe : CSR.

Nous considérons une adaptation de paramètres sur le protocole OLSR dans le choix des éléments clés de la structure : les MPRs (Relais Multipoints – Multipoint Relays). Quant au protocole CSR nous adaptons à l'environnement le choix des chefs de clusters, et comme le protocole CSR définit un changement de mode (il passe d'une architecture plate où il fonctionne en DSR à une architecture hiérarchique), nous analysons sa possibilité d'adaptation à l'environnement pour le changement de mode.

### 4.1.2 Stratégie d'adaptation

L'étude du modèle de mobilité Random Waypoint montre que la connectivité du graphe est corrélée de façon variable aux métriques. Selon la valeur de la densité, la mobilité influence ou pas la connectivité [83]. C'est pourquoi nous proposons des adaptations selon les deux métriques, densité et mobilité en faisant varier les stratégies d'adaptation :

- adaptation à la densité
- adaptation à la densité combinée à la mobilité : avec deux options pour savoir s'il vaut mieux d'abord considérer la mobilité ou d'abord la densité.

Le calcul de la mobilité est effectué différemment selon le protocole. Pour OLSR qui est proactif nous considérons la durée de liaison alors que pour CSR qui lui est réactif nous utilisons le nombre d'erreurs de routes. Ceci afin d'utiliser les signalisations

(messages HELLO pour OLSR, et messages erreurs de route pour CSR) et les tables de routage déjà présentes dans les protocoles.

### 4.1.3 Méthode d'évaluation

#### 4.1.3.1 Modèle de la simulation

Le simulateur du réseau NS2.30 [48] est utilisé avec le modèle de la mobilité Random Waypoint (RWP). 15 scénarios pour chaque vitesse de RWP sont créés. Le taux d'envoie des données est de 4 paquets/seconde et la taille des paquets est 512 octets pour un débit nominal de 2 mégaoctet/second Constant Bit Rate (CBR). Le secteur de simulation est 1000m x 1000m (les valeurs choisies correspondent à celles utilisées dans de nombreux travaux de simulation effectués en NS2).

- Pour OLSR, le temps de pause est nul et la vitesse maximale Vmax varie de 1, 5 et 5 jusqu'à 25 m/s par incrément de 5 m/s pour produire des modèles de mouvement différents. Les sources de trafic, CBR, sont 3, 10 et 15 sources pour 10, 50 et 100 nœuds respectivement. Une gamme de radio de 250 mètres pour 10 et 50 nœuds et 150 mètres pour 100, 150 et 200 nœuds est utilisée. La source OLSR est UM-OLSR-0.8.8 [80] fondée sur le RFC 3626. Le temps de simulation est 1000 secondes pour 10 et 50 nœuds puis en raison de contrainte de ressources temps et machine, c'est 250s pour plus de 100 nœuds (le même temps a été pris par T. Clausen et P. Jacquet auteurs d'OLSR en [84] ; avec 250s il nous faut entre 1 jour et 2 jours pour obtenir les résultats d'un seul scénario selon le scénario)
- Pour CSR, la vitesse maximale Vmax est de 10 m/s et le temps de pause varie de 100 à 500 secondes par étape de 100 secondes pour produire les modèles de mouvement différents. Les sources sont les même que dans le cas OLSR. La portée radio est de 250 mètres pour 50 nœuds et 150 mètres pour 100 et 150 nœuds. Le temps de simulation est de 1000 secondes.

#### 4.1.3.2 Métriques de performance

Les métriques de performance sont :

1. Proportion de livraison de paquet (Packet Delivery Ratio : PDR) (%) : proportion de paquets de données délivrés à la destination par rapport à ceux produits par les sources (émettant un trafic constant : CBR)
2. Surcoût de routage normalisé (%) : nombre de paquets de routage *"transmis"* par paquets de données *"livrés"* à la destination. La transmission d'un paquet de routage est comptée (en octets) à chaque saut de relayage. Le surcoût de routage inclut :
   (a) le paquet de contrôle tel que Route Request, Route Reply, Route Error, etc.
   (b) Surcoût de routage sur le paquet de donnée.
3. Délai (secondes) est le temps écoulé entre l'envoi d'un paquet par la source (au niveau transport) et sa réception par la destination (au niveau transport). Il

inclut tous les délais causés par mémorisation, pendant la découverte de route, la mise en file d'attente dans la file d'interface, les délais de retransmission au niveau MAC, et les temps de propagation et transfert.

4. Efficacité (%) : le nombre de paquets livrés qui sont transmis (les Données) / (les Données + Surcoût de routage)
5. Autres métriques : des métriques additionnelles propres aux algorithmes OLSR et CSR sont présentées par la suite.

#### 4.1.3.3 Interprétation des résultats

Une stratégie d'adaptation est considérée comme bonne quand elle améliore la performance du protocole en comparaison avec la méthode standard OLSR ou CSR (Table 4.1).

TAB. 4.1 – Signification de sigles résultats de l'adaptation

| Valeur | Signification |
|---|---|
| + | Amélioration |
| - | Diminution |

## 4.2 OLSR : Adaptation de paramètres

Dans cette section, nous présentons les fonctionnalités importantes de OLSR pour mieux comprendre comment nous pouvons faire une adaptation de ces protocoles, puis proposons et évaluons différentes stratégies d'adaptations permettant de prendre en compte la mobilité et la densité dans le choix des éléments clés de la structure de routage : les MPRs.

### 4.2.1 Précisions sur OLSR

Le routage OLSR met en place une structure de routage en sélectionnant des nœuds particuliers : les MPR. Les routes entre deux nœuds passent par un ensemble de MPR. Nous présentons à la suite les principaux élements de ce processus en s'appuyant sur les éléments du RFC 3626. [4].

#### Gestion de la topologie et calcul de route

Chaque nœud dans le réseau maintient une base contenant les informations topologiques du réseau qui est construite à partir des messages de contrôle de la topologie : messages TC (Topology Control). Un message TC annonce les nœuds ayant sélectionné le nœud $m$ origine du TC comme relais multipoint. Ces messages sont diffusés périodiquement à tous les nœuds du réseau avec une fréquence déterminée par l'intervalle *"TC_Interval"* (la valeur par défaut est de 5 secondes). Un numéro de séquence est associé à l'ensemble des sélecteurs de relais multipoint et sera incrémenté à chaque changement de cet ensemble.

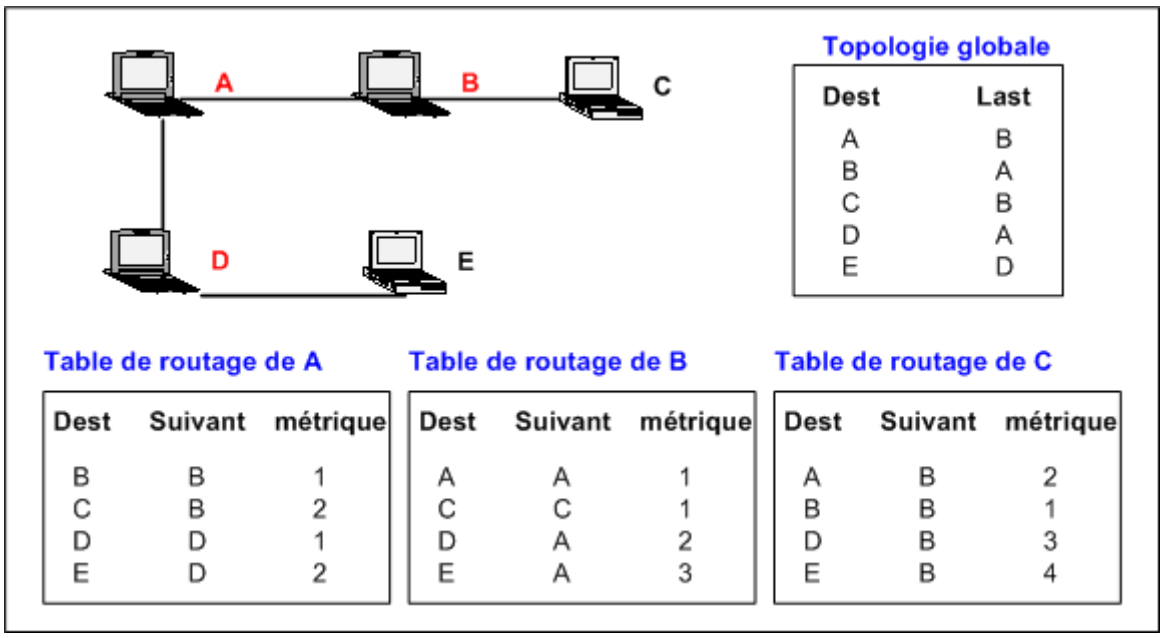



FIG. 4.1 – Exemple de routage OLSR.

Le routage OLSR se fait saut par saut. Chaque nœud dans le réseau calcule sa table de routage pour atteindre tout autre nœud présent dans le réseau en utilisant

les informations de voisinage et de topologie rafraîchies périodiquement. La route entre le nœud source et le nœud destinataire est optimale en nombre de sauts et les nœuds intermédiaires de cette route sont des relais multipoints. La table de routage est mise à jour chaque fois qu'il y a un changement dans la base de voisinage ou de la topologie. C'est-à-dire, quand on détecte l'apparition ou la perte d'un voisin ou lors de l'ajout ou la suppresion d'un élément de topologie.

La figure 4.1 [85] donne un exemple d'une base topologique et des tables de routage du réseau ad hoc de la figure 4.3. Pour le calcul des routes vers les destinations, un nœud $m$ utilise l'algorithme de Dijkstra [86].

### Détection du voisinage : précisions sur le message HELLO

Une détection de voisinage est effectuée par chaque nœud qui diffuse périodiquement un message HELLO (voir figure 4.2) qui contient les informations relatives aux interfaces entendues par ce nœud : la liste des adresses des interfaces des nœuds voisins avec leur état de lien. Un lien entre les interfaces d'un nœud et son voisin peut avoir l'un des quatre états suivants :

- *"Symétrique"* le lien est validé comme bidirectionnel : il est possible de transmettre des données dans les deux sens.
- *"Asymétrique"* le nœud reçoit les messages HELLO venant de cette interface d'un voisin, c'est-à-dire que ce nœud entend ce voisin mais le lien n'est pas encore validé dans l'autre sens.
- *"MPR"* indique que ce nœud a sélectionné ce voisin comme relais multipoint et cela implique que le lien est symétrique.
- *"inactif"* le lien avec cette interface de voisin n'est plus valide.

Chaque nœud maintient une liste de liens pour chaque voisin. La liste de liens est mise à jour comme suit :

- Si aucun entrée de lien n'existe pour le tuple (adresse IP source, IP d'interface reçue) alors une telle entrée est ajoutée. L'adresse IP source est obtenue de l'en-tête d'IP du paquet reçu. Quand une entrée est ajoutée, le nœud voisin correspondant est aussi initié puisque aucune entrée correspondante n'existait.
- Le temps de validité reçu est utilisé pour mettre à jour une minuterie asymétrique. Cette minuterie indique pour combien de temps l'entrée de lien est considérée comme asymétrique si la minuterie symétrique expire.
- Si l'adresse de l'interface de réception est incluse dans le message HELLO reçu, la minuterie symétrique est mise à jour. Le statut du lien et le statut des entrées de voisin selon cette entrée de lien sont mis à jour si nécessaire.
- Le maximum de minuterie asymétrique et de minuterie symétrique sont utilisés pour régler le temps actuel de vie d'une entrée.

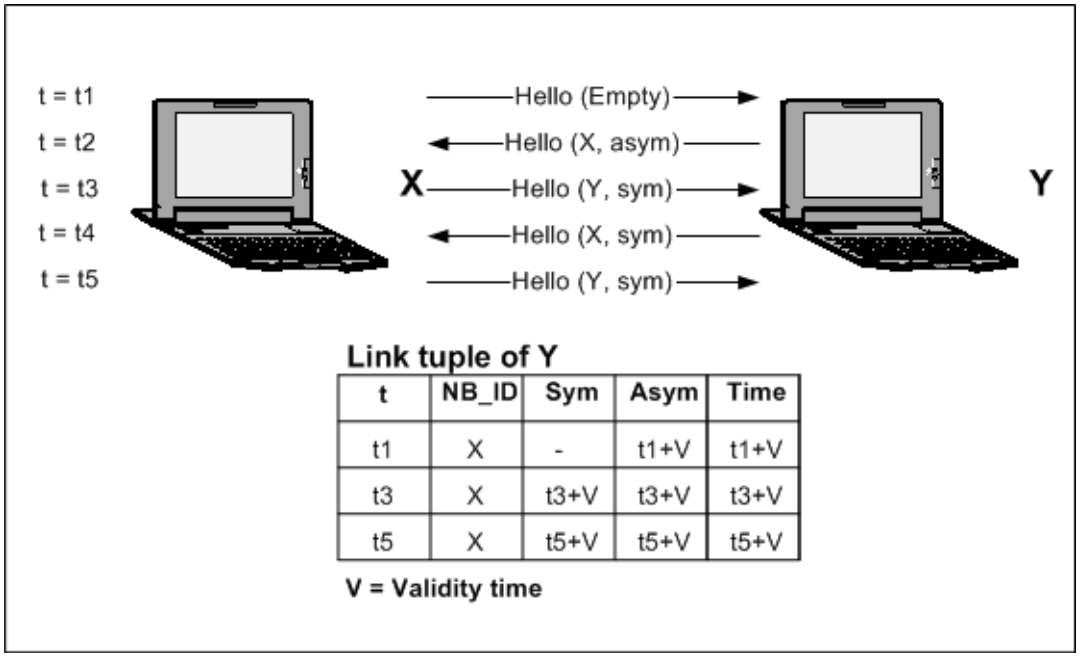



FIG. 4.2 – Détection de voisinage pour l'échange de messages HELLO.

La figure 4.2 montre un exemple de détection de l'état de lien. Dans cet exemple, chaque nœud possède une seule interface.

- A l'instant $t = t_1$, le nœud X envoie un message HELLO. Le nœud Y reçoit ce message et enregistre X comme un voisin asymétrique, comme il ne peut pas trouver sa propre adresse dans le message HELLO. La minuterie asymétrique (Asym) et le temps actuel de vie (Time) de cette entrée sont réglés à $t_1 + V$ (où V est le temps de Validité).
- A l'instant $t = t_2$, Y envoie un message HELLO déclarant X comme un voisin asymétrique. Quand X obtient ce message il trouve sa propre adresse dans le message et donc définit Y comme un voisin symétrique.
- A l'instant $t = t_3$, X inclut Y dans son message HELLO. Y enregistre X comme un voisin symétrique sur la réception du message HELLO de X. De plus, la minuterie asymétrique, la minuterie symétrique (Sym) et le temps actuel de vie de cette entrée sont réglés à $t_3 + V$.
- A l'instant $t = t_4$, Y envoie un message HELLO déclarant Y comme un voisin symétrique.
- A l'instant $t = t_5$, X transmet un message HELLO déclarant Y comme un voisin symétrique. Y met à jour la minuterie de cette entrée $= t_5 + V$.

Un exemple de détection du voisinage est présenté dans la figure 4.3.

Les nœuds diffusent les messages HELLO autour d'eux (c'est-à-dire à un saut) sur toutes les interfaces rattachées au nœud. Ces messages sont envoyés avec une fréquence déterminée par l'intervalle *"HELLO_Interval"* (la valeur par défaut est de 2 secondes). Les voisins qui reçoivent ces messages, les traitent et ne les relaient pas. Les messages HELLO permettent également de découvrir les voisins à deux sauts (c'est-à-dire, les voisins des voisins). Les informations de voisinage fournies par ces messages sont valides pendant une durée de vie *"Neighbor_Hold_Time"* qui est égale à 3 x *HELLO_Interval*. Une approche simple permettant de détecter la

non validité d'un lien OLSR est la perte de 3 HELLO successifs.

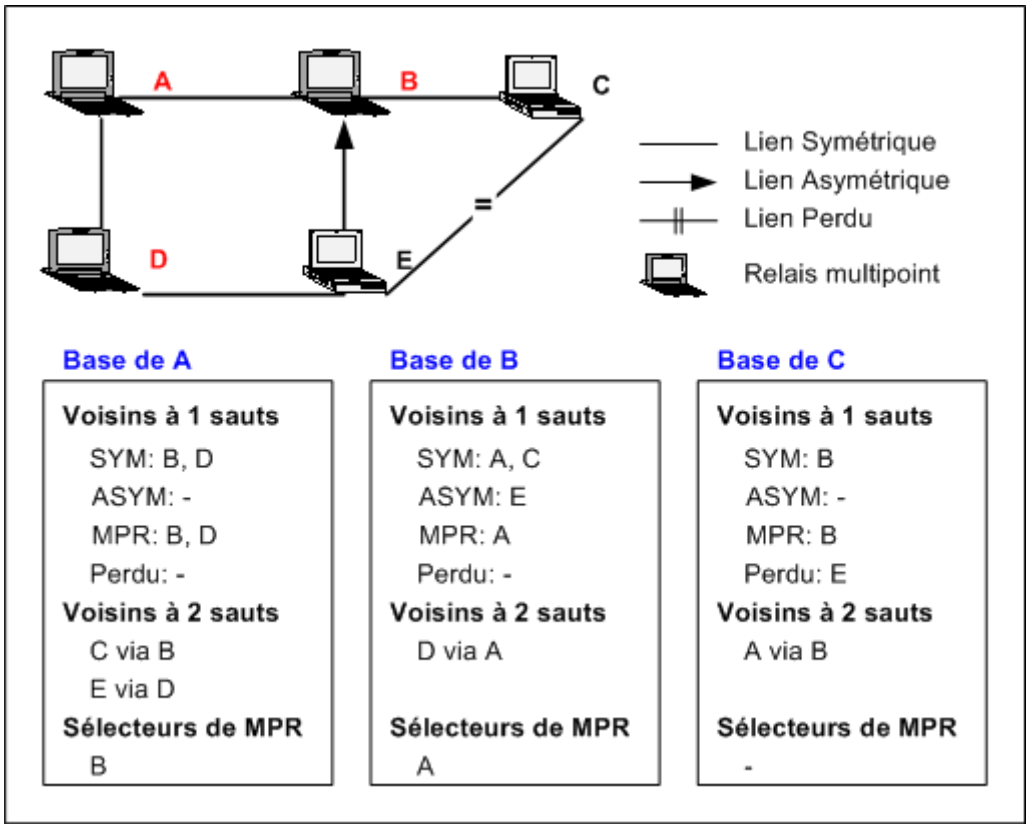



FIG. 4.3 – Exemple d'information de voisinage maintenue par OLSR.

### Précisions sur les relais multipoint

Le protocole OLSR est un protocole à états de liens qui diffuse périodiquement des messages de contrôle. Le concept de relais multipoint permet de diffuser efficacement les messages destinés à tous les nœuds du réseau ad hoc (les messages TC) en réduisant de façon significative le nombre de retransmissions lors du processus de diffusion [87] La transmission radio étant par défaut une inondation à tous les voisins directs, les nœuds de second saut peuvent être joints par une retransmission d'un ou plusieurs voisins directs. L'idée de base est de désigner un nombre suffisant de voisins appelés relais multipoint pour réduire le nombre de retransmissions redondantes dans la même région du réseau.

En se basant sur l'information de voisinage, chaque nœud $m$ sélectionne de façon indépendante un sous-ensemble minimal de nœuds parmi ses voisins directs pour retransmettre ses paquets. Ces nœuds possèdent des liens symétriques avec $m$ et leur ensemble est noté $MPR(m)$. La seule condition est que tous les nœuds se trouvant à deux sauts aient des liens symétriques avec des nœuds dans $MPR(m)$. Cela signifie que les relais multipoint permettent de couvrir, en terme de couverture radio, tous les nœuds du voisinage à deux sauts.

Les nœuds voisins de $m$ qui ne sont pas des relais multipoint de ce nœud, reçoivent et traitent les messages diffusés par $m$, mais ne les retransmettent pas.

Chaque nœud maintient l'ensemble de ses sélecteurs de relais multipoint, noté *"multipoint relay selector"* et ne retransmet que les paquets reçus pour la première fois de ces sélecteurs de relais multipoint.

Les relais multipoint sont calculés suite à la détection d'un changement de voisinage direct ou à deux sauts. La figure 4.4.a montre un exemple où un paquet $m$ est diffusé au voisinage à trois sauts par 24 retransmissions [87]. Dans la figure 4.4.b seuls les relais multipoint retransmettent le paquet (11 retransmissions).

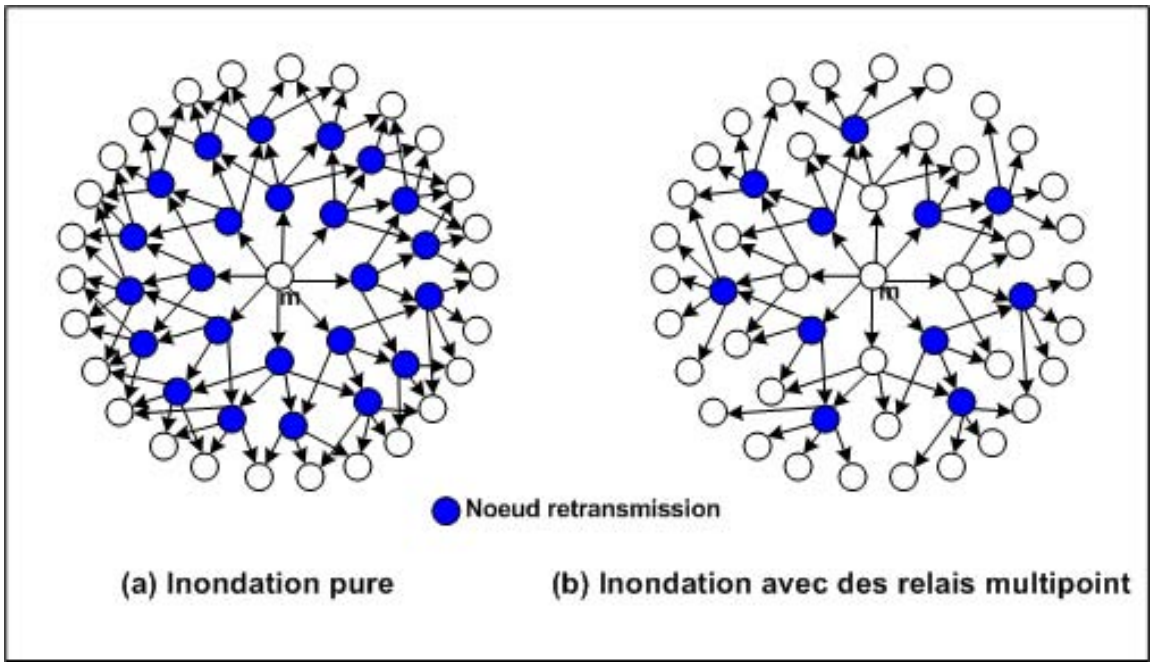



FIG. 4.4 – Optimisation de l'inondation par des relais multipoint

L'optimisation offerte par l'utilisation des relais multipoint est plus efficace dans *des topologies de réseaux ad hoc denses et larges* (cette optimisation s'avère également bénéfique pour la recherche de route par inondation utilisée dans les protocoles réactifs [88]). Le gain sera important dans les deux configurations suivantes :

1. pour les modèles de trafic aléatoire et sporadique où un large sous-ensemble de nœuds est en communication,
2. lorsque les couples *[source, destination]* varient dans le temps [89]. Plus le nombre de relais multipoint est petit, plus le routage est optimal.

En s'appuyant sur ces résultats nous nous proposons d'optimiser le routage en minimisant le nombre de MPR.

### 4.2.2 Proposition d'adaptation pour l'algorithme de sélection MPR

Dans cette section nous présentons des heuristiques de choix des relais multipoint : l'heuristique originale, des améliorations issues de la littérature et enfin notre proposition.

#### 4.2.2.1 Heuristique originale de choix des relais multipoint dans OLSR

L'heuristique de sélection d'un ensemble minimal de relais multipoint qui a été proposée dans [90] et analysée dans [89], [91], comporte deux étapes essentielles :

- sélectionner les voisins qui possèdent des liens uniques avec des nœuds de second saut,
- tant qu'il reste des nœuds à deux sauts qui ne sont pas couverts, sélectionner le voisin qui atteint le maximum de nœuds à deux sauts.

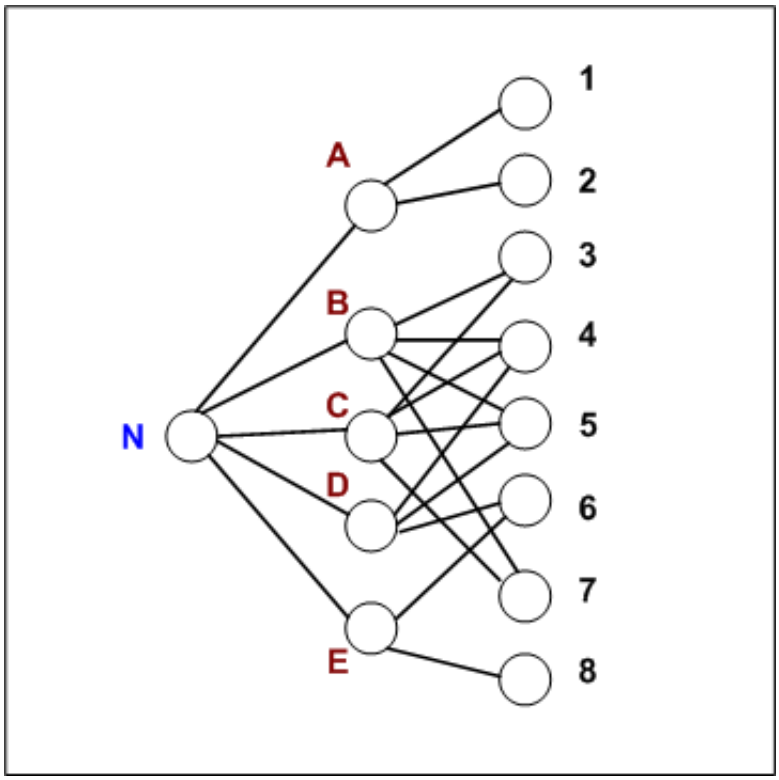



FIG. 4.5 – Sélection des voisins possédant un seul lien avec un nœud du second niveau.

Prenons un exemple pour mieux illustrer le principe de cet algorithme. La figure 4.5 présente comment chercher l'ensemble des relais multipoint du nœud $N$.

La première étape consiste à trouver les nœuds du premier niveau possédant des liens uniques avec un nœud du second niveau. Ces nœuds feront partie nécessairement de l'ensemble des relais multipoint, $M$, afin que les voisins à deux sauts soient totalement couverts. Selon l'exemple que l'on a pris, A et E sont dans ce cas (seul A couvre les nœuds 1 et 2, et seul E couvre le nœud 8). On les insère dans $M$, et on élimine tous les nœuds du second niveau couverts par A et E (voir figure 4.5) : 1, 2, ainsi que 6 et 8.

La deuxième étape est une boucle : à chaque itération, on cherche le nœud du premier niveau qui couvre le maximum de nœuds du second niveau. On l'ajoute dans l'ensemble M et on élimine ses nœuds du second niveau. La boucle prend fin lorsqu'il n'y a plus de nœuds du second niveau ($N = \{\}$). La figure 4.6 illustre des différentes étapes du déroulement de cet algorithme.

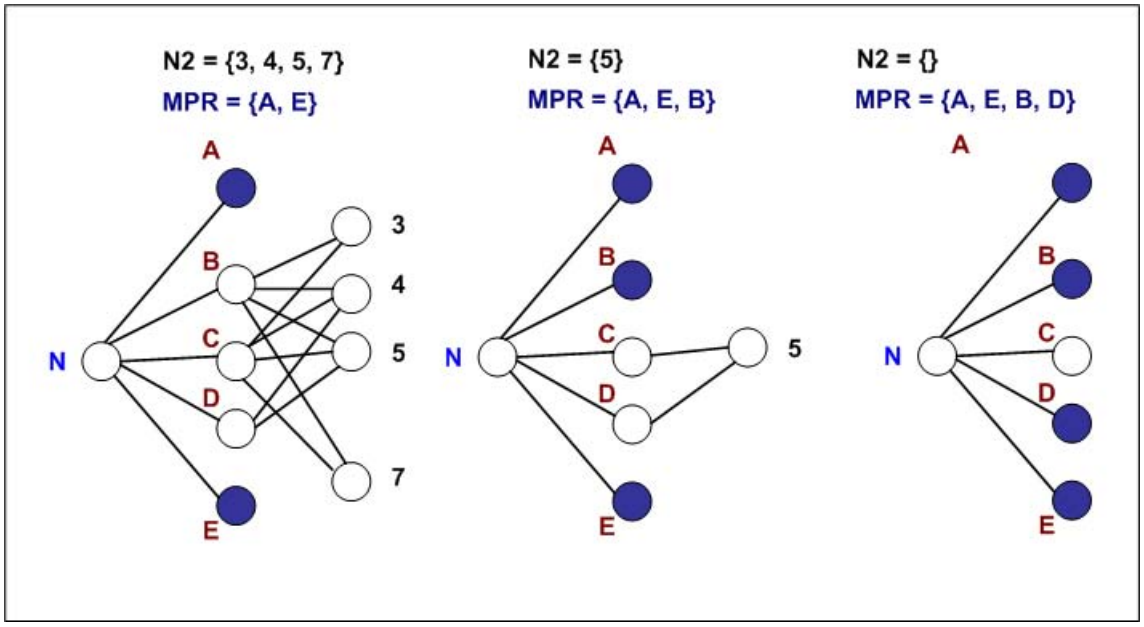



FIG. 4.6 – Illustration de l'algorithme de choix des relais multipoint.

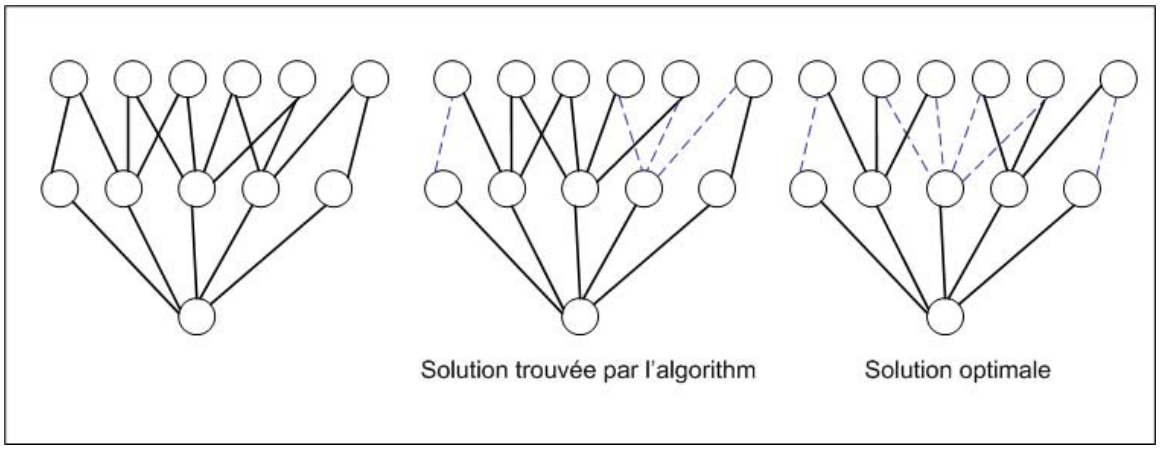



FIG. 4.7 – A propos d'optimalité du choix des MPRs

Notons que, cette opération d'élection est faite au niveau de tous les nœuds du réseau. Son but est de trouver un ensemble de nœuds voisins qui couvre tous les nœuds de second niveau. Généralement, on a plusieurs solutions. Leur nombre dépend essentiellement de la façon dont sont interconnectés les nœuds. L'heuristique, qui nous venons d'illustrer, ne fournit pas la solution optimale et en voici un contre-exemple sur la figure 4.7. La solution donnée par l'algorithme est de trois relais multipoint et la solution optimale est de deux relais multipoint.

De nombreux travaux sur la recherche d'optimalité on eté menés dont on trouvera les éléments en [92] ou plus récemment en [93]. Notre propos est d'étudier les paramètres de l'algorithme de choix *"standard"* et les moyens de l'adapter à l'environnement

Plus formellement l'algorithme de sélection des relais multipoint se présente dans le RFC comme suit : On désigne par *N(x)* l'ensemble des voisins directs de $x$, par

*N2(x)* l'ensemble du second niveau, et *MPR(x)* l'ensemble des relais multipoint de *x*.

- Commencer par un ensemble de relais multipoint vide *MPR(x) = {}*.
- Choisir les nœuds de l'ensemble des voisins *N(x)* qui sont les seuls ayant un lien avec un voisin du second niveau. Ajouter ces nœuds sélectionnés de *N(x)* à l'ensemble *MPR(x)*, et éliminer tous les nœuds de second niveau couverts par ces derniers de l'ensemble *N2(x)*.
- Tant que *N2(x)* $\neq$ *{}* refaire
  - Calculer le degré de chaque nœud dans *N(x)*. Le degré pour un nœud est le nombre de voisins du second niveau couverts par celui-ci présents dans *N(x)*.
  - Ajouter le nœud de *N(x)*, ayant le degré maximal à l'ensemble des relais multipoint *MPR(x)*, et enlever tous les nœuds du second niveau couverts par celui-ci de *N2(x)*.

#### 4.2.2.2 Améliorations des heuristiques

**Kinetic MPR(KMPR) : prédiction de mobilité par degré cinétique**
La différence fondamentale entre MPR et KMPR [68] est que contrairement à MPR, KMPR ne traite pas les instants de temps mais des intervalles de temps. Un nœud n'est pas périodiquement choisi, mais plutôt désigné pour un intervalle de temps. Pendant cet intervalle, le nœud sélectionné est actif et l'intervalle de temps est appelé son activation.

Le protocole KMPR élit un nœud, dans *un ensemble N(i)* avec le plus grand degré cinétique logique (voir chapitre 2), comme KMPR. L'activation du nœud KMPR est le plus grand intervalle de couverture de ses nœuds dans *N2(i)*.

Les opérations de choix KMPR sont :

- commencer avec une série vide de KMPR.
- première étape : calculer le degré cinétique logique de chaque nœud dans *N(i)*.
- deuxième étape : ajouter dans *N(i)* le nœud qui a le plus grand degré cinétique logique dans la série KMPR. Calculer l'activation du nœud KMPR comme l'intervalle de couverture maximale que ce nœud peut fournir. Mettre à jour tous les autres intervalles de couverture de nœuds dans *N2(i)* en considérant l'activation du KMPR élu, recalculer alors tous les degrés cinétiques logiques. Enfin, répéter cette étape jusqu'à ce que tous les nœuds dans *N2(i)* soient entièrement couverts.

KMPR est évalué par le simulateur NS-2 en steady-state RWM[94] pour 20 nœuds. Les auteurs indiquent que KMPR a un delai plus rapide que MPR de 50%, puisque KMPR utilise les prédictions de mobilité et ne provoque pas d'entretien périodique ; le surcoût de routage pourrait ainsi être réduit au delà de 75%. Notons que les résultats qui sont données pour 20 nœuds ne permettent pas en l'état de dégager l'influence de la métrique de mobilité. Il se pourrait que pour 150 nœuds, la version standard même avec son émission périodique de messages HELLO soit plus efficace, s'il s'avère que le degré cinétique ne reflète pas la performance.

**LS-OLSR : mobilité par durée de vie résiduelle de lien**

L'heuristique LS-OLSR [95] choisit le MPR en utilisant une mesure statistique de la stabilité de lien [76], qui est la probabilité du lien de continuer à exister pour une certaine durée de temps. La vie résiduelle de lien est la quantité moyenne de vie restante en terme de probabilité pour un lien qui a survécu l'âge *"a"* (voir chapitre 2).

L'objectif est de choisir un voisin avec le temps résiduel maximum comme MPR jusqu'à ce que tous les voisins à 2 sauts soient couverts. Pour calculer l'âge résiduel ou le quantile $\alpha$, chaque nœud maintient un *Link_ Life_ Array* nommé *"d[t]"*. *Link_ Life_ Window* est le nombre d'entrées emmagasinées dans le tableau *"d[t]"* pour maintenir la distribution de durée de lien. La période d'observation est définie comme une période de temps pendant laquelle le nœud observe la durée de vie de lien et remplit le tableau *"d[t]"*. Elle doit être assez longue pour capturer les données du lien du nœud qui survit le plus longtemps. *Link set* qui enregistre l'information de lien contient l'information relative à l'âge *"a"*.

LS-OLSR est évalué par simulation NS-2 pour 75 nœuds. Il est indiqué que cette heuristique augmente le taux moyen de durée de vie des chemins et le throughput moyen et par ailleurs qu'elle diminue les moyennes des changements de lien et de perte de paquet. Notons que les points faibles de cette approche sont un nombre de MPR qui est augmenté d'environ 21%. Par conséquent le délai de bout en bout de même que les surcoûts sont augmentés. De plus, il est difficile de définir une période d'observation assez longue pour capturer les données du lien *"survivant"* le plus long.

**Proposition d'heuristique : LD-OLSR mobilité par durée de lien**

En s'appuyant sur les travaux présentés dans le chapitre précédent, nous choisissons d'introduire la métrique Durée de Lien (LD) dans l'algorithme de sélection de MPR. Notre proposition diffère de LS-OLSR par la façon de calculer la Durée de Lien et par le fait que la Durée de Lien n'est pas le seul critère pour la sélection de MPR. Le calcul est simple et il n'est pas nécessaire de définir une période d'observation assez longue pour capturer les données du lien le plus long, ce qui en pratique peut être difficile à atteindre. Nous proposons de combiner LD avec le critère de densité et proposons plusieurs stratégies.

Une façon simple pour un nœud de calculer la valeur de LD est d'utiliser les messages HELLO en procédant à quelques modifications de traitements.

Quand un nœud met à jour une entrée de lien, il enregistre seulement le temps pendant lequel ce lien est considéré valide. Il n'a pas la durée de lien parce qu'il n'a pas enregistré le temps de démarrage (voir figure 4.2). Aussi nous modifions la procédure d'OLSR simplement sans avoir à modifier le paquet OLSR. L'entrée *"Temps de Debut de Connexion "* (*Start Connection Time*) (*Start_ t*) est juste ajoutée au Tuple de Lien (figure 4.8). Quand un nœud doit choisir un MPR, il calcule LD par la différence entre le temps actuel et Start_ t. Il peut obtenir alors LD pour chaque nœud.

Précisons le calcul de LD :

– enregistrement de la durée de vie : les MPRs sont des voisins symétriques à un-saut par lesquels il est possible d'atteindre tous les voisins symétriques à deux-sauts. Avec notre calcul de LD, le temps démarre dès qu'un nœud connaît

un voisin. Donc le temps est enregistré avec un statut de nœud asymétrique. Cependant le nœud n'est pas choisi comme MPR, si le statut de lien n'est pas symétrique. En cas d'un nœud ayant la plus haute valeur de LD mais qui n'est pas dans la gamme de transmission, détecté par absence de message HELLO le LD de ce nœud est effacé. Ainsi seulement le nœud qui a la plus haute valeur de LD et qui est dans la gamme de transmission est choisi comme MPR.

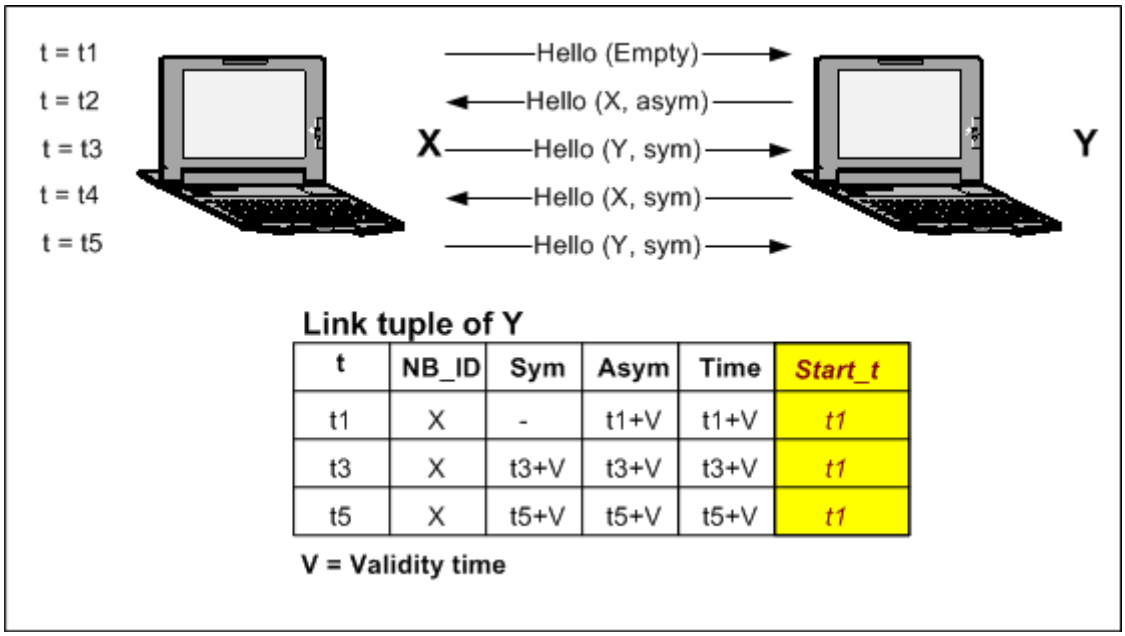



FIG. 4.8 – Calcul de LD par ajout de champs dans le tuple lien

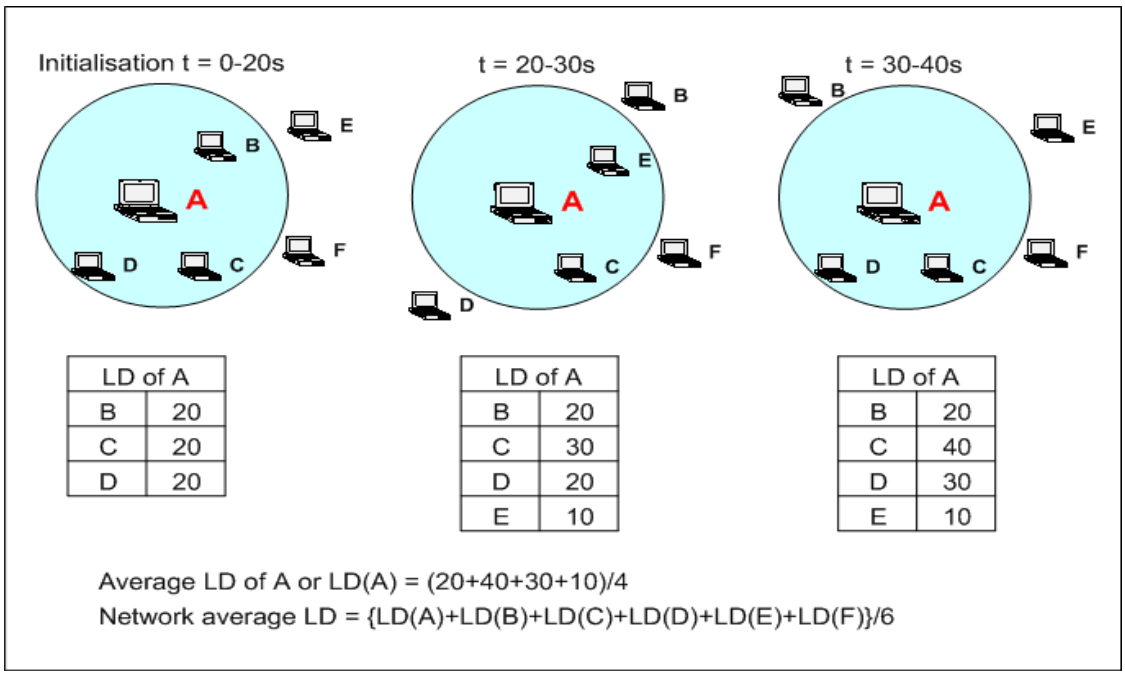



FIG. 4.9 – Calcul de LD local et global.

- LD local et LD global : le choix de MPR peut être sur le LD de chaque nœud, appelé LD local, ou bien sur le LD global calculé sur toutes les durées de lien avec chaque voisin. Dans ce cas il est nécessaire de modifier l'entête du message HELLO pour qu'il signale les valeurs locales de LD. C'est pourquoi nous avons choisi un calcul local de LD.
  - Exemple : La figure 4.9 illustre le calcul de LD global aux nœuds voisins : Soit un nœud mobile A qui durant t = 0-20 secondes, a pour voisins les nœuds B, C et D ; les LD sur A avec B, C et D sont de 20 secondes. Ensuite à l'instant t = 20-30 secondes, les nœuds mobiles B et D sortent de la gamme de transmission de A, les LDs restent inchangées. Le nœud mobile E entre la gamme de transmission et le nœud mobile C reste immobile, LD A avec E est 10 et le LD avec C est augmenté de 10. Troisièmement, durant t = 30-40 secondes, E sort de la gamme de transmission, LD avec E n'est pas modifié. Le nœud mobile D retourne dans la gamme de transmission et le nœud mobile C y demeure, alors les LD avec C et D sont augmentés de 10.
- Plus grande ou plus petite LD : Une autre question à propos du calcul concerne la sélection du meilleur LD : est-il plus valable de choisir la plus petite ou la plus grande valeur de LD ? LS-OLSR utilise la plus petite LD, puisque il choisit le temps de vie résiduel le plus long. Les auteurs supposent que quand les nœuds ont une durée de connexion importante leurs voisins vont sortir de la gamme de transmission. La validité de la supposition est naturellement fonction du modèle de mobilité considéré. Pour un modèle RWP on peut supposer cette hypothèse comme réaliste dès lors que le temps de pause est non nul ; dans ce cas quand les nœuds voisins restent dans la gamme de transmission ils doivent encore bouger après leur temps de pause et peut-être sortir de la zone de couverture. Par contre, quand le temps de pause est nul, on peut envisager que le plus vieux nœud restera encore un moment dans la gamme de transmission. Par exemple si le nœud et son voisin se déplacent dans la même direction ou ont un mouvement inverse avec une vitesse très basse. C'est pourquoi, nous évaluons par simulation la validité de plusieurs hypothèses pour le modèle de mobilité aléatoire. La première hypothèse est qu'il est préférable de choisir un nœud avec une grande durée de connexion : le plus vieux voisin. La deuxième hypothèse au contraire consiste à choisir le plus jeune voisin. Nous montrons l'intérêt de la première hypothèse (voir résultats de simulation à la suite) et utilisons donc la plus grande valeur de LD dans notre proposition.

### 4.2.3 Résultats d'évaluation des stratégies d'élection et discussions

Nous présentons les résultats relatifs aux choix du plus grand ou du plus petit LD puis aux stratégies d'adaptation dans trois environnements : basse densité, moyenne densité et haute densité.

Les stratégies mettent en avant les critères densité et mobilité. Nous avons :

- **OLSR 1D** heuristique standard OLSR : MPR choisi selon le nombre de voisins ; une métrique de densité *(D)*.
- **OLSR 1D+2LD** stratégie proposée : MPR choisi avec un premier critère de densité *(1D)* et en cas d'égalité avec un critère LD(*2LD)*.
- **OLSR 1LD+2D** stratégie proposée : MPR choisi avec un premier critère de durée de lien *(1LD)* et en cas d'égalité avec le critère de métrique densité *(2D)*.

Nous considérons en plus des métriques de performances présentées précédemment les métriques suivantes :

1. Nombre de changements de MPR : le nombre total de changements de MPR pour chaque nœud dans le réseau. Quand chaque nœud choisit pour la première fois ses MPRs, le compteur est réglé au nombre de MPRs choisis. Puis, dès que chaque nœud choisit à nouveau des MPRs, le compteur est incrémenté du nombre de MPRs choisis qui sont différents de la série de MPRs précédente.
2. Nombre de MPR : le nombre total de MPR pour chaque nœud dans le réseau. Le compteur comptabilise le nombre de MPR choisis (qu'ils soient distincts ou pas).

#### 4.2.3.1 Choix du LD

L'objectif est de choisir un MPR 'stable' qui a peu de chance une fois choisi de se déplacer et restera donc MPR. Le choix peut être fait sur la plus grande ou sur la plus petite valeur de LD. En considérant les durées de liaison de la figure 4.10, on obtient selon l'hypothèse :

- **Le plus petit LD(l'approche de LS-OLSR)**
  - $\Rightarrow$ B est MPR
- **Le plus grand LD**
  - $\Rightarrow$ A est MPR

Nous évaluons les valeurs de LD sur les scénarios de mobilité RWP.

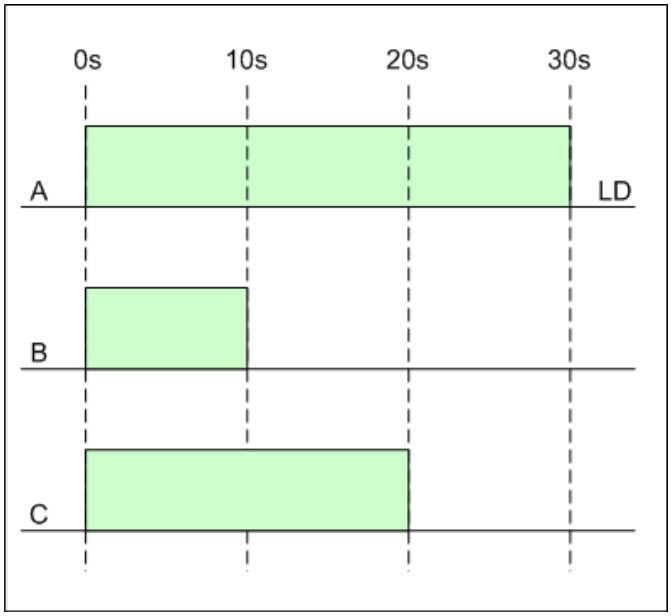



FIG. 4.10 – Exemple de valeurs de LD pour 1 nœud

Le pourcentage de différence d'amélioration de performance, ou diminution, pour le plus grand LD comparé au plus petit LD pour 10 et 50 nœuds est représenté dans la figure 4.11. Lorsque l'histogramme est positif la performance (par exemple le délai) est meilleure avec 1LD long. Lorsqu'il est négatif la performance est meilleure avec un LD court. Par exemple, le changement de MPR est plus petit, donc meilleure, avec un LD court pour 10 nœuds.

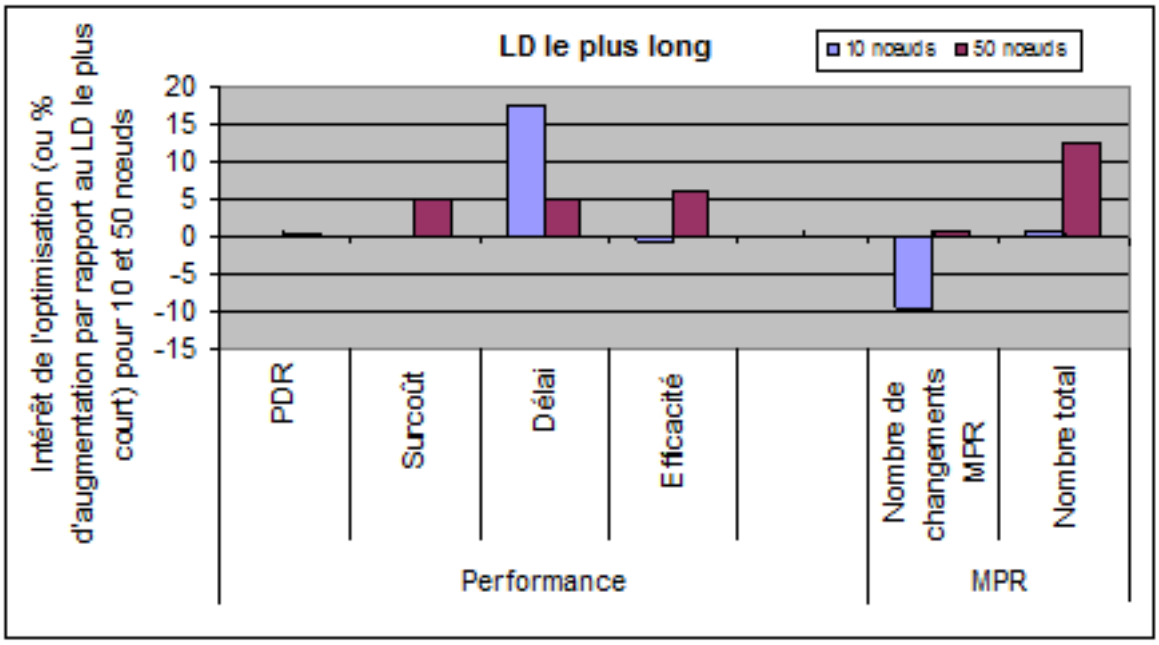



FIG. 4.11 – Comparatif de performances entre le plus long LD et le plus court LD pour 10 et 50 nœuds

Pour 10 nœuds, la stratégie du choix de MPR avec le plus grand LD obtient de meilleures performances en terme de délai (17, 673%) ; l'amélioration pour les autres paramètres des performance est moins significative (moins de 1%). Par contre, pour 50 nœuds la performance est améliorée pour tous les paramètres. Nous remarquons que le nombre de changements MPR n'induit pas systématiquement la performance. En effet pour 10 nœuds, la stratégie du plus grand LD induit plus de de changements MPR que celle du plus petit LD et l'efficacité est meilleure avec un LD court. Cependant le délai est moins bon : c'est que avec un faible nombre de nœud (et donc de contrôle), l'accroissement du contrôle de trafic diffusé affecte moins la performance et le délai de bout en bout que l'augmentation du délai de transmission sur la route du à un nombre plus important de MPR.

En conclusion : nous choisissons d'appliquer l'approche par plus grand LD à la procédure de sélection de MPR.

#### 4.2.3.2 Résultats en environnement basse densité

Bien que OLSR ait été conçu pour de grande configurations de réseaux, nous examinons sa performance sur une petite configuration, c'est-à-dire à basse densité (10 nœuds sur un secteur 1000m x 1000m) pour comparer l'influence de la mobilité et de la densité. Le pourcentage de différence d'amélioration de performance, ou diminution, pour les stratégies *1D+2LD* et *1LD+2D* comparé à *OLSR 1D* est représenté dans la figure 4.12.

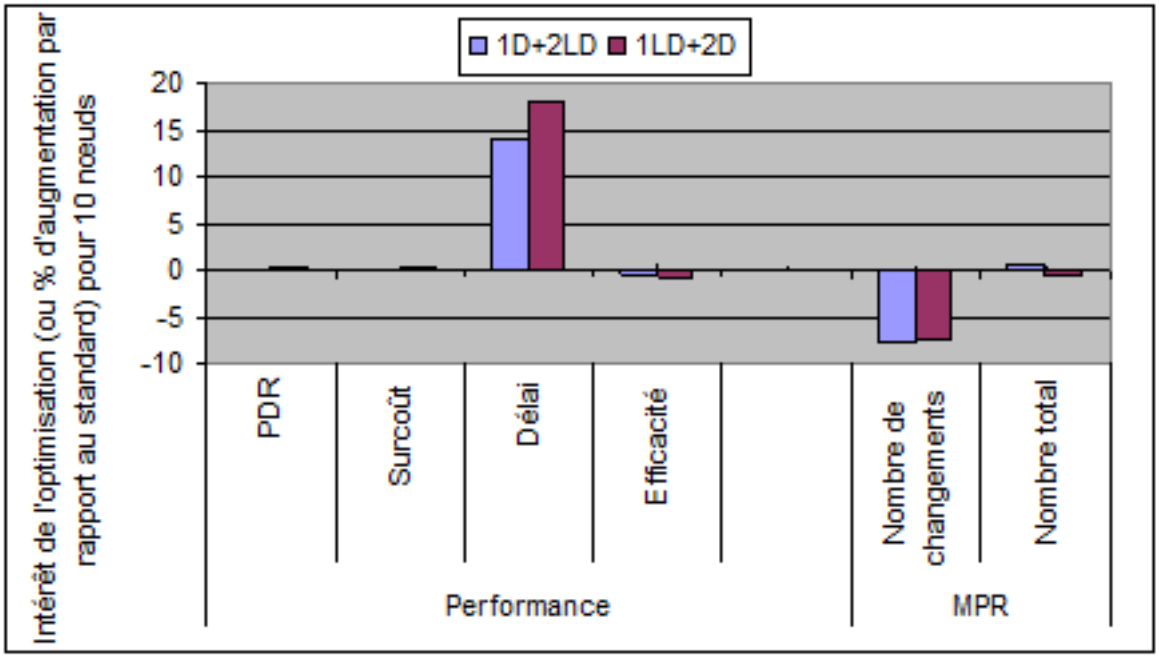



FIG. 4.12 – Les performances comparatives pour 10 nœuds des stratégies 1D+2LD et OLSR standard (1D)

Comme pour l'évaluation précédente, sur le choix du LD avec 10 nœuds, notons que le plus grand nombre de changements de MPR de *1LD+2D* ne coincide pas avec

les autres critères de performance. Quand le nœud commence à choisir la série de MPR dans *1LD+2D*, il a plus de MPRs que dans *1D*. L'étape d'après, la série de MPRs du nœud subit un même ou plus grand niveau de changement qu'avec *1D* en raison de la faible densité. Le nombre de changements de MPR de *1LD+2D* est plus grand que *1D*. Beaucoup de MPRs envoient en même temps beaucoup de messages dans le réseau. Néanmoins, le nombre de MPR quelle que soit la stratégie est faible.

En considérant l'influence de critères de *LD* et *D* sur les critères PDR, surcoût, délai et efficacité, les résultats indiquent que *LD* est plus influant que *D* puisqu'il y a un meilleur pourcentage d'amélioration en terme de délai. Mais les autres critères de performance sont affectés de façon moins significative (moins que 1%). Ces résultats sont conhérents avec ceux obtenus par l'approche Cinétique avec 20 nœuds [68].

**Conclusion :** la métrique de mobilité est plus influante que la métrique de densité dans un petit réseau. Choisie en tant que premier critère de sélection des MPR elle améliore légèrement plus les performances, par rapport à la version standard que lorsqu'elle est choisie en tant que critère secondaire.

#### 4.2.3.3 Résultats en environnement moyenne densité

La figure 4.13 montre la différence de performance de *1D+2LD* et *1LD+2D* comparée à OLSR *1D* pour 50 nœuds.

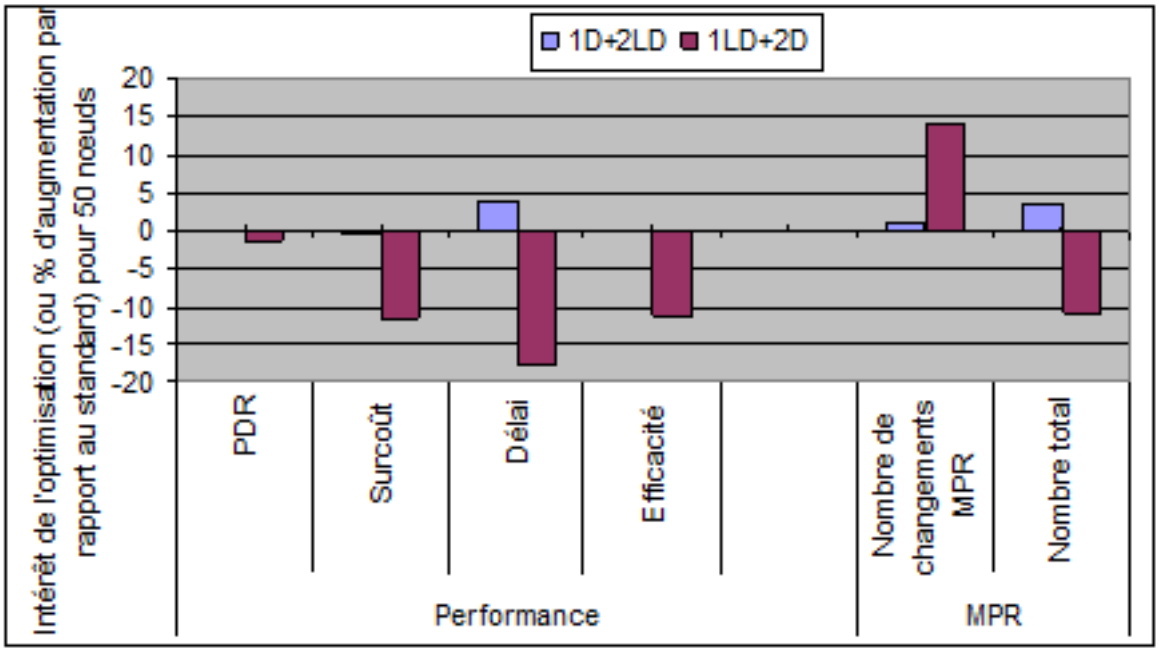



FIG. 4.13 – Les performances comparatives pour 50 nœuds des stratégies 1D+2LD et OLSR standard (1D)

Les résultats obtenus montrent que *1D+2LD* a presque la même performance que *1LD*. Un nœud donné a plusieurs voisins à un-saut qui couvrent plusieurs voisins à deux-sauts. Il y a une faible probabilité que les voisins à un-saut aient la même

densité. Donc, le critère de LD a une faible probabilité de s'appliquer et d'améliorer la performance protocolaire. Quand il s'applique il améliore le critère *"nombre de changements de MPR"*.

Les résultats pour 50 nœuds indiquent que *1LD+2D* améliore juste le nombre de changements de MPR et ce de façon plus importante que *1D+2LD*. Mais de même que dans le cas de l'environnement basse densité précédent, le nombre plus faible de changements de MPR n'est pas corrélé aux autres critères de performance, car le nombre de MPR est également augmenté. *1LD+2D* définit plus de MPR que les autres critères parce qu'il choisit plus de MPR à l'étape initiale.

**Conclusion :** Les simulations montrent que la densité est plus influente que la métrique de mobilité quand le nombre de nœud augmente. Pour une densité plus importante, nous évaluons alors uniquement la statégie qui consiste à compléter le critère de densité par le critère de mobilité : *1D+2LD*.

#### 4.2.3.4 Résultats en environnement haute densité

Nous évaluons l'intérêt de compléter la métrique de densité par la métrique de mobilité. Les résultats pour 150 et 200 nœuds sont présentés dans la figure 4.14. Elle indique que OLSR *1D+2LD* obtient de meilleures performances que OLSR *1D* pour tous les critères de performance.

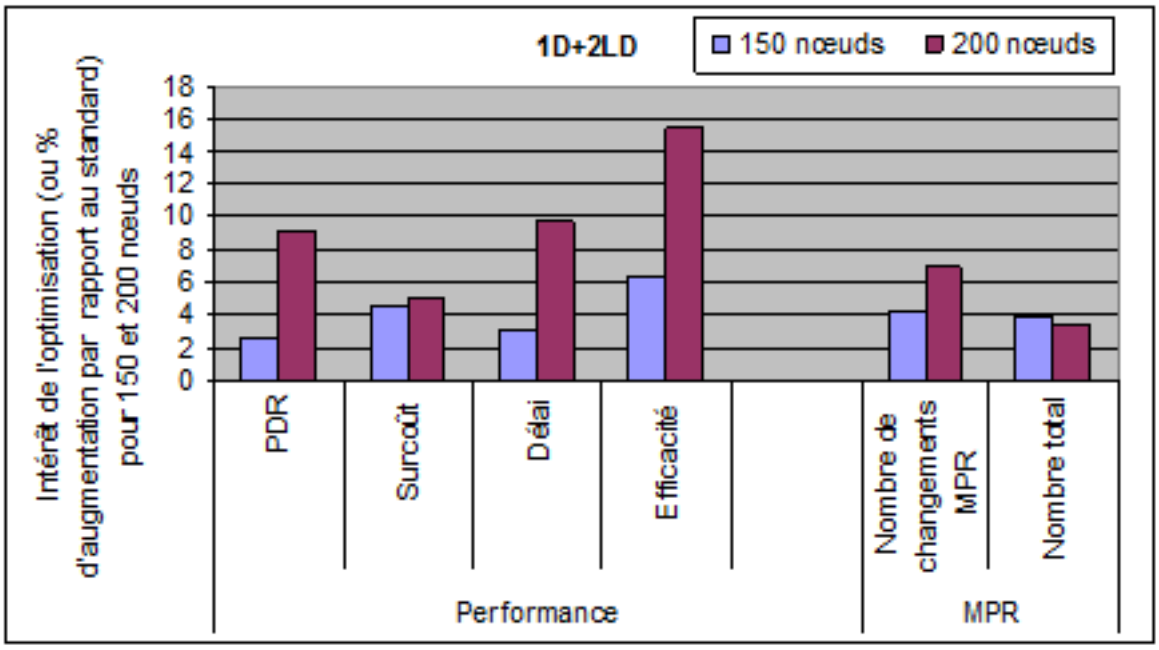



FIG. 4.14 – Les performances comparatives pour 150 et 200 nœuds

*1D+2LD* a un délai plus bas que *1D* en raison de l'amélioration de la stabilité des routes (le nombre de changements de MPR de *1D* est plus élevé que *1D+2LD*). Lorsque nous considérons la stabilité des MPR, nous notons que pour le réseau de haute densité, la performance du protocole est inversement proportionnelle au

nombre de changement de MPR. Dans *1D+2LD*, le nombre de changements de MPR est plus faible ; si le nombre de changements de route diminue alors le délai de bout en bout est plus bas en raison d'une disponibilité de route accrue. Le nombre de messages de contrôle, qui sont diffusés, sont aussi réduits. Par conséquent, le PDR est amélioré. Enfin, l'efficacité du réseau est significativement augmentée. De plus, *1D+2LD* définit moins de MPR que *1D* grâce à la métrique de mobilité. Pour 200 nœuds nous voyons que, le gain de performance de *1D+2LD* est plus grand qu'avec 150 nœuds.

A la question : *"Pourquoi 1D+2LD a-t-il un plus grand impact d'amélioration pour les réseaux de haute densité ?"*, nous énoncons deux raisons :

- Premièrement, pour les réseaux plus dense le nombre de nœuds candidats MPR est plus important et la probabilité pour qu'une route soit disponible est aussi plus haute.
- Deuxièmement, comme le réseau devient plus dense, des MPRs stables sont choisis en raison de l'usage du critère de mobilité. Un nœud donné a beaucoup de voisins à un-saut qui sont voisins de plusieurs voisins à deux-saut. Il y a une probabilité haute que les voisins à un-saut aient la même densité. Donc, le critère LD a une probabilité haute d'être appliqué pour améliorer la performance du protocole. Comme seulement les nœuds MPR retransmettront les messages de contrôle de topologie, le surcoût de contrôle décroira rapidement.

**Conclusion :** Plus le réseau est dense plus l'adjonction du critère de mobilité à celui de densité améliore les performances. Pour une même densité, l'amélioration est plus sensible à faible mobilité qu'à forte mobilité

#### 4.2.3.5 Synthèse

Une synthèse sur l'intérêt d'utiliser les différentes stratégies étudiées est présentée dans la figure 4.15. Pour l'environnement basse densité, la métrique de mobilité (*1LD+2D*) est plus significative que la densité (*1D*). Pour l'environnement de densité moyenne, la densité (*1D*) est plus importante que la métrique de mobilité (*1LD+2D*). Pour une densité haute, de meilleures performances sont obtenues lorsque le critère de densité est considéré en premier ; puis en cas d'égalité que la métrique de mobilité est s utilisée (*1D+2LD*).

La stratégie *1D+2LD* s'auto adapte aux environnements de densité basse, moyenne et haute dans la mesure où quel que soit l'environnement les résultats obtenus sont proches de ceux obtenus par la meilleure stratégie. Ainsi, elle obtient des résultats très similaires à ceux de *1LD+2D* qui est meilleure stratégie pour la densité basse, et équivalents à ceux de *1D,* meilleure stratégie en densité moyenne, quant au cas haute densité ses résultats sont les meilleurs.

C'est pouquoi la stratégie *1D+2LD* nous paraît la plus adaptée. Il n'est alors pas nécessaire de changer de stratégie en fonction de la taille du réseau, et de résoudre les problèmes liés à l'obtention de cette information, pour optimiser la performance protocolaire. L'amélioration obtenue en regard de la version standard par *1D+2LD* est positive comme en atteste les courbes de la figure 4.15 ou presque nul.

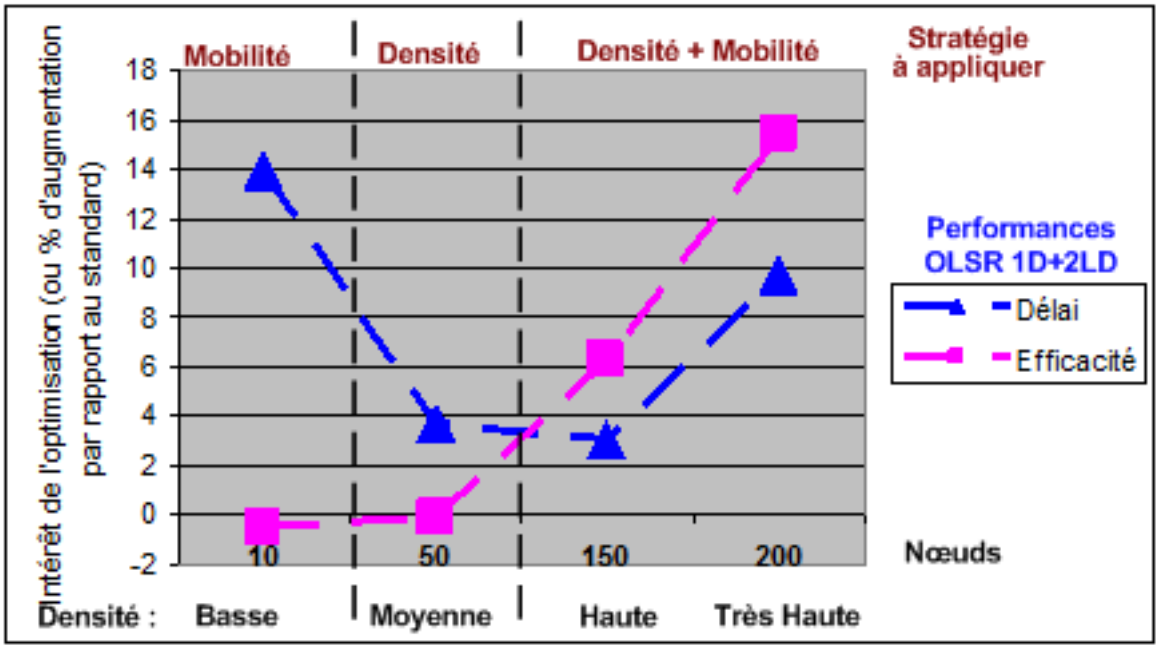



FIG. 4.15 – Domaine d'application des stratégies OLSR selon la densité

## 4.3 CSR : Adaptation de mode et de paramètres

### 4.3.1 Précisions sur CSR

CSR [61] est une extension hiérarchique de protocole DSR qui constitue un *mode de routage hiérarchique avec architecture de cluster*. L'interêt de cette extension est d'améliorer le passage à l'échelle de DSR pour des grands réseaux. En fait, CSR obtient de meilleures performances que DSR pour toutes les densités (mais surtout à haute densité). La performance de CSR comparativement à DSR pour 150 nœuds est présentée dans la figure 4.16.

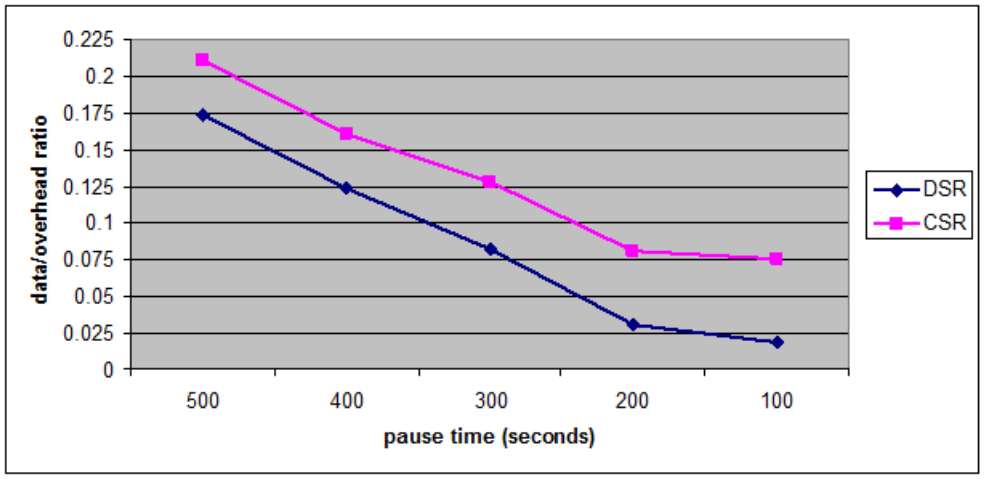



FIG. 4.16 – Comparaison des performances DSR et CSR

#### Architecture de clusters

Afin de minimiser le trafic de contrôle, l'extension CSR met en place une architecture de cluster à deux niveaux (voir la figure 4.17). Le premier niveau est la cellule (cluster 0-cell). Chaque nœud qui appartient à une cellule est situé à portée radio directe du chef de cellule (Chef de Cluster ou Cluster Head). La communication entre les cellules s'effectue par le biais de passerelles. Le deuxième niveau de cluster regroupe un ensemble de cellules (Cluster 1-Serveur). Le chef de ce cluster est appelé Serveur. L'extension CSR est adaptative à l'environnement. Lorsque les conditions sont favorables (nous précisons par la suite), le routage est effectué avec la structure de cluster, sinon il s'effectue sans structure avec le fonctionnement DSR.

Pour mettre en place cette structure, chaque nœud peut expérimenter quatre statuts :

- **Indéfini :** le nœud n'a pas encore obtenu de statut valide. Il utilise le protocole DSR natif.
- **Nœud :** c'est un nœud qui utilise le mode CSR. Il peut émettre des requêtes de route CSR.
- **Chef de Cluster :** c'est un chef de cluster de niveau 0-cell.
- **Serveur :** c'est le chef de cluster de niveau 1-Serveur.

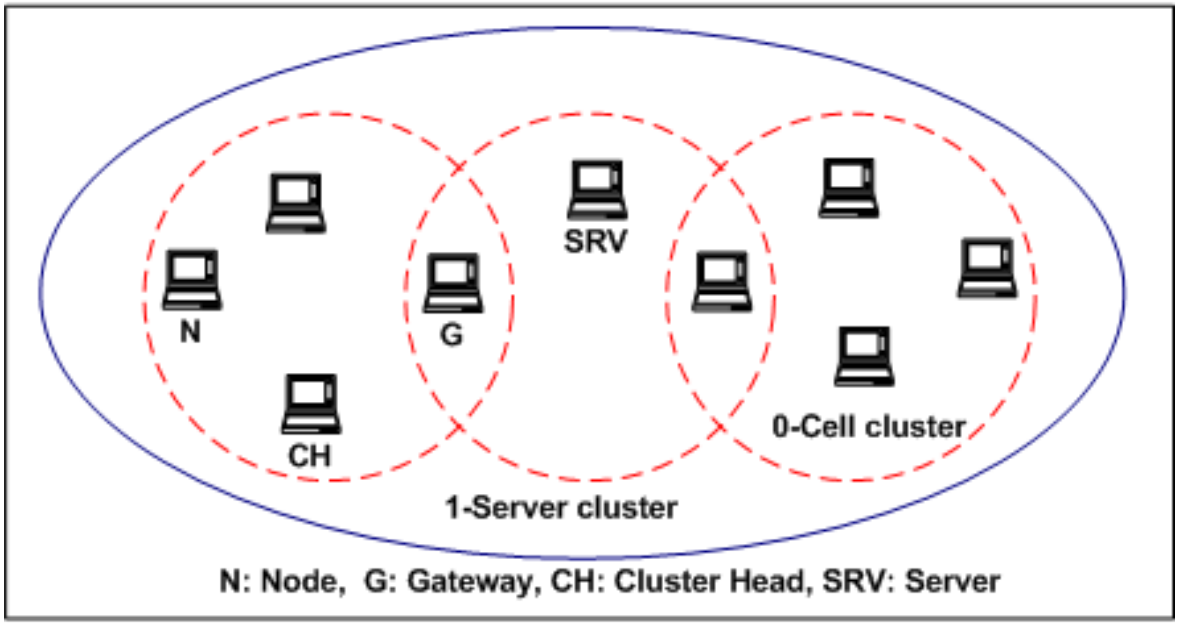



FIG. 4.17 – Modèle CSR.

### Adaptation du mode de routage

Pour déclencher le changement de mode, avec structure ou sans structure (DSR⇔CSR), une métrique de densité et une métrique de mobilité sont utilisées.

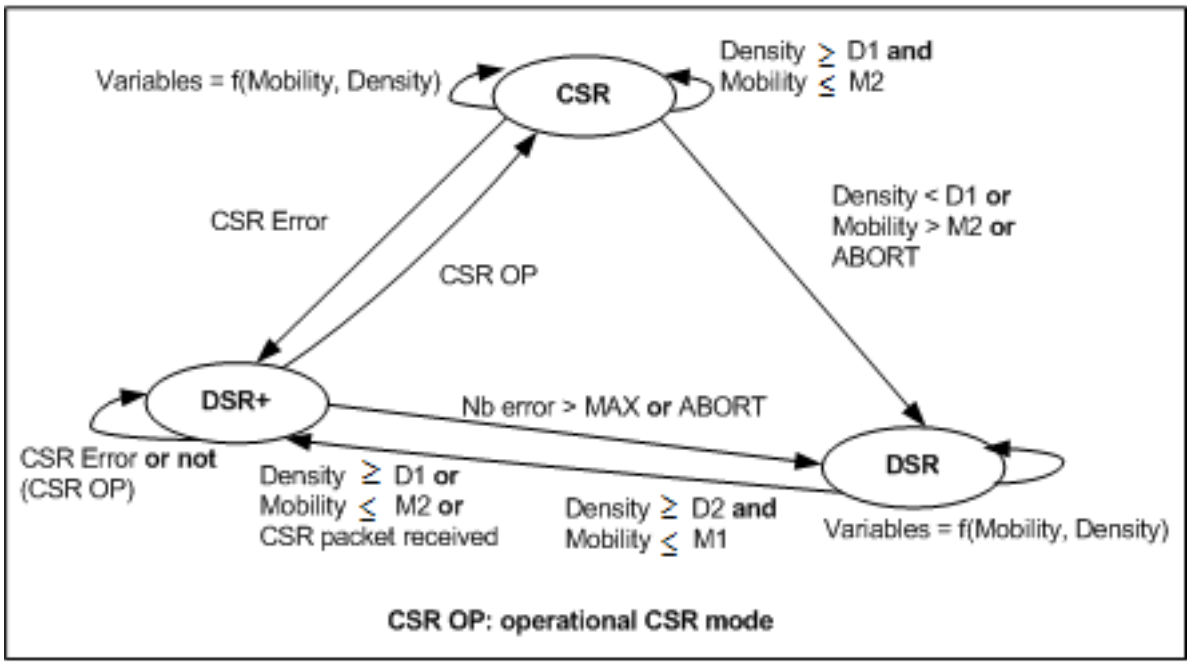



FIG. 4.18 – Changement de mode CSR.

La métrique de mobilité est basée sur la notion de lien : lorsqu'un nœud n'arrive pas à transmettre un paquet au prochain saut, il génére un paquet DSR contenant une option *DSR Route Error* et chaque nœud comptabilise le nombre de paquets *DSR Route Error* qu'il génére. Une métrique de densité globale n'est calculable qu'en contrepartie d'un trafic de contrôle important. Le nombre de voisins estimé à partir du cache de routes est utilisé comme métrique de densité. Cette mesure est moins précise que l'estimation reposant sur l'échange périodique de message HELLO mais elle est plus économique en terme de trafic de contrôle.

Chaque nœud qui lance le protocole DSR avec l'extension CSR peut connaître trois états (voir la figure 4.18) :

- **DSR :** Le nœud utilise les procédures standards : DSR Route Discovery et DSR Route Maintenance. Si la dynamique de réseau est favorable (forte densité et faible mobilité), le nœud entre dans l'état de transition adaptative nommé DSR+. Deux seuils de changement de mode sont définis à partir des métriques de mobilité (M1 $<$ M2) et de densité (D1 $<$ D2) :
  - *Mobilité* $>$ *M2 ou Densité* $<$ *D1* : le nœud reste en mode DSR (haute mobilité et/ou faible densité).
  - *Mobilité* $\leq$ *M2 et Densité* $\geq$ *D1* : le nœud change de mode DSR pour le mode DSR+ si il reçoit un paquet CSR (mobilité et densité moyenne).
  - *Mobilité* $\leq$ *M1 et Densité* $\geq$ *D2* : le nœud change de mode DSR pour le mode DSR+ (faible mobilité et haute densité).
- **DSR+ :** Le nœud utilise *DSR Route Discovery* et *DSR Route Maintenance*. Le routage est opérationel, et les procédures de clustering sont exécutées pour mettre en place ou récupérer l'architecture de cluster. Si les procédures de clustering ont réussi, le nœud entre dans l'état CSR. Autrement, il passe en état DSR. Après son élection, le Serveur définit une minuterie et attend les inscriptions (*Registration Request*) des Chef de Cluster, que ceux -ci émettent en diffusion après leur élection, pour obtenir les informations de routage (la requête est diffusée ou bien relayée directement au serveur par un chef de cluster qui connaît la route pour aller au serveur). Le serveur apprend ainsi la route pour aller à chaque cellule du réseau. Quand la minuterie expire, le serveur est opérationnel. Il renvoie une réponse d'enregistrement directement (en routage source) aux clusterhead qui se sont enregistrés et ceux-ci en déduisent que l'architecture est ou pas activée. Au cours de l'état DSR+, le Serveur peut arrêter la mise en place du mode CSR en diffusant un paquets *ABORT* dans le réseau (par exemple, si le nombre de Chef de Clusters enregistré indique une densité globale faible) et passer en mode DSR.
  Si la procédure d'enregistrement échoue 3 fois, une nouvelle élection de Serveur est lancée par le Chef de Cluster. En cas de *MAX* échecs, le Chef de Cluster passe dans l'état DSR. Lorsque Chef de Cluster reçoit une *Registration Reply*, il vérifie si le mode CSR est opérationnel ou non. Dans l'affirmative, il entre dans l'état CSR et signale que le mode CSR est opérationnel à ses membres de Cluster par un paquet *Cell Maintenance*. Sinon, il définit une minuterie et ne fait que passer dans l'état CSR sur son expiration. Sur réception d'un *ABORT*, chaque Chef de Cluster passe à l'état DSR.
  Sur réception d'une paquet *Cell Maintenance*, le nœud vérifie si le CSR est

opérationnel (utilisation *CSR Route Discovery*) ou non (utilisation *DSR Route Discovery*). Chaque nœud change d'état DSR si il reçoit un *ABORT*.

- **CSR :** Le nœud utilise les paquets *CSR Route Discovery* et *CSR Route Maintenance*. Le mode CSR est opérationnel et les procédures de maintenance de Cluster sont appliquées. Le Serveur diffuse un message *ABORT* quand il est sur le point d'abandonner son rôle en raison de la dynamique de réseau et de basculer dans l'état DSR. Si le Serveur reçoit un paquet d'un Serveur qui a un critère d'élection plus élevé, il devient un Chef de Cluster et entre dans l'état DSR+. Si le Serveur est inaccessible, le Chef de Cluster diffuse localement un paquet *Cell Maintenance* indiquant aux membres de la cellule que l'architecture CSR n'est pas opérationnelle. Ensuite, il applique la procédure d'enregistrement et passe au mode DSR+. Sur réception d'un *ABORT*, les Chef de Clusters et les nœuds changent à l'état DSR.

### Procédures CSR

Les procédures nécessaires au fonctionnement de l'extension CSR sont divisées en deux catégories :

- les procédures de **routage** : elles servent à la découverte et à la maintenance de routes.
- les procédures de **clustering** : elles servent à la mise en place et à la maintenance de l'architecture virtuelle.

### Procédures de routage.

Au lieu de diffuser une recherche de route dans tout le réseau, en mode CSR la recherche de route est dirigée directement vers le serveur de route (de façon transparente aux stations, c'est le clusterhead qui dirige la requête). Le serveur agit comme un cache de route, s'il connait la reponse il répond à la station, (une station est localisée dans une cellule, le serveur connait les routes entre les cellules) sinon il se charge d'envoyer une recherche de route dans chaque cellule. Chaque chef de cluster qui reçoit la requête la diffuse localement (option *non propagating route request* de DSR) ; si une station répond il transmet directement la réponse au serveur qui la retransmettra à la station. En cas d'échecs successifs (phase de maintenace du clustering) la recherche de route est diffusée dans tout le réseau (modes DSR ou DSR+). Le routage CSR est complètement transparent aux stations : des stations en mode DSR sans extension peuvent fonctionner avec des stations avec extensions.

### Procédures de clustering

Ces procédures mettent en place et maintiennent l'architecture des clusters. Chaque nœud débute la procédure avec un statut Indéfini, puis, tente d'obtenir un statut de Nœud ou de Chef de Cluster.

La mise en place des cellules est basée sur l'algorithme ***Highest-Connectivity Degree*** qui choisit comme chef de cluster celui qui a le plus de voisins.

Un nœud utilise la procédure GetStatus pour mettre en place ou pour rétablir l'architecture. Chaque nœud possédant un statut Indéfini va diffuser localement un

paquet de statuts (le paquet comporte une option CSR Status). Les Chef de Cluster sont choisis entre les nœuds qui ont le meilleure critère (voir section 4.3.4).

L'algorithme de contrôle ***LCC (Least Cluster Change)*** est employé. Si un Chef de Cluster reçoit un paquet de statut provenant d'un autre Chef de Cluster, le chef de cluster est qualifié de candidat, et il compare sa Densité avec celle contenue dans le paquet. En cas d'égalité sur les Densités, le plus petit identifiant est préféré :

- si le Chef de Cluster possède des critères plus faibles que ceux du paquet reçu, il abandonne son rôle de Chef de Cluster et prend le statut de Nœud.
- si le Chef de Cluster possède des critères plus forts que ceux du paquet reçu, il attend l'expiration de son timer de maintenance pour diffuser un paquet de statut.

**Election du Serveur** La procédure d'élection du Serveur est presque identique à celle du Chef de Cluster sauf que le Serveur est élu parmi les Chef de Clusters : le choix du Serveur est basé sur la Densité.

Au début de la procédure, chaque Chef de Cluster initialise ses variables :

- Densité_candidat avec valeur de Densité,
- Adresse_candidat avec son adresse.

### 4.3.2 Intérêt du changement adaptatif du mode routage

Pour vérifier l'intérêt du changement adaptatif du mode de routage, nous considérons deux versions de l'extension CSR :

- NA-CSR (Non Adaptive CSR) : cette version implante toutes les procédures CSR excepté le changement adaptatif du mode de routage. Les nœuds restent en mode CSR quelles que soient les conditions de Mobilité et de Densité.
- A-CSR (Adaptive CSR) (Densité+Mobilité) : cette version implante toutes les procédures CSR y compris le changement adaptatif du mode de routage. Ce changement de mode utilise les métriques de Densité (le nombre de voisins) et de Mobilité (le nombre d'erreurs de route générées). Les valeurs des seuils sont M1 (faible) = 2, M2 (forte) = 4, D1 (faible) = 2 et D2 (forte) = 5.

Par ailleurs afin d'étudier l'impact des métrique Mobilité et de Densité sur le changement de mode, nous considérons deux stratégies de l'extension CSR :

- A-CSR (Mobilité) : cette version implante toutes les procédures CSR y compris le changement adaptatif du mode de routage. Ce changement de mode n'utilise que la métrique de Mobilité. Les valeurs des seuils sont : M1 = 2, M2 = 4.
- A-CSR (Densité) : cette version implante toutes les procédures CSR y compris le changement adaptatif du mode de routage. Ce changement de mode n'utilise que la métrique de Densité. Les valeurs des seuils sont : D1 = 2 et D2 = 5.

### 4.3.3 Résultats d'évaluation des stratégies de changement de mode et discussions

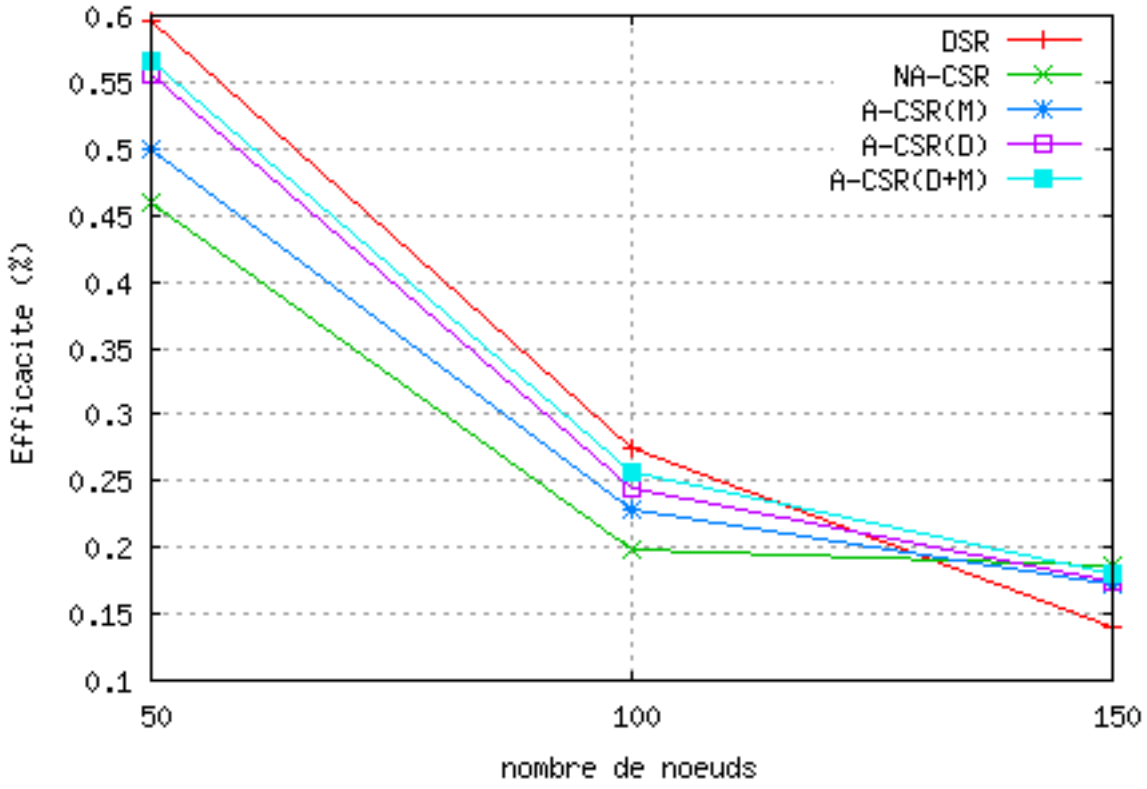



FIG. 4.19 – Intérêt du changement de mode CSR

La figure 4.19 montre l'efficacité en fonction de la densité de nœuds pour les protocoles DSR et pour les versions NA-CSR et A-CSR de l'extension CSR avec 3 stratégies de changement de mode : Mobilité, Densité et Densité+Mobilité.

*Pour une densité de 50 nœuds*, NA-CSR est le moins performant : la densité de nœuds est trop faible pour qu'il soit intéressant d'utiliser un protocole hiérarchique. Les performances d'A-CSR (Mobilité) sont plus faibles que celles d'A-CSR (Densité) et A-CSR (Densité+Mobilité) : les nœuds CSR détectent des conditions locales favorables (mobilité basse) à un changement de mode (DSR–>CSR) mais la densité est faible, le coût de la mise en place de la structure CSR est pénalisant par rapport au coût de la diffusion, la performance est moins bonne que celle obtenue par DSR.

Les performances d'A-CSR (Densité) et A-CSR (Densité+Mobilité) sont très proches, la métrique de Mobilité est très peu considéré car la densité est très faible. Les performances sont très proches de celles du protocole DSR. Dans les exemples, les simulations montrent que la majorité des nœuds a basculé en mode de routage DSR. Cependant, certains nœuds CSR détectent des conditions locales favorables à un changement de mode (DSR–>CSR). Ce comportement génère un trafic de contrôle supplémentaire qui explique que les performances d'A-CSR (Densité) et d'A-CSR (Densité+Mobilité) soient légèrement inférieures à celles de DSR.

*Pour une densité de 100 nœuds*, les performance de NA-CSR restent encore

inférieures à celles de DSR et des trois stratégies adaptives A-CSR mais sont plus proches que pour la densité 50 nœuds : la densité de nœuds devient assez forte pour utiliser un protocole hiérarchique. Concernant les trois stratégies A-CSR, nous notons que les performances d'A-CSR (Mobilité) sont plus basses que celles d'A-CSR (Densité) et A-CSR (Densité+Mobilité) . Le critère de densité est le plus intéressant à considérer. Les performances d'A-CSR (Densité) sont un peu moins bonnes que celles d'A-CSR (Densité+Mobilité) parce que la densité de nœuds est probablement assez forte pour que la métrique de Mobilité soit alors considérée.

*Pour une densité de 150 nœuds*, NA-CSR et les trois stratégies A-CSR présentent de meilleures performances que DSR. Cela indique que les conditions de réseau en terme de densité sont plus favorables à un routage hiérarchique qu'un routage purement plat. Les versions de l'extension CSR passent mieux à l'échelle par rapport à la densité de nœuds. Les performances d'A-CSR (Densité+Mobilité) sont meilleures que celles d'A-CSR (Densité) et d'A-CSR (Mobilité). Les performances d'A-CSR (Densité+Mobilité) sont légèrement inférieures à celles de NA-CSR mais largement supérieures à celles du DSR.

**Conclusion :** Nous relevons l'interêt de l'adaptation : l'efficacité d'A-CSR est toujours comprise entre celles de NA-CSR et du DSR. NA-CSR et DSR représentent les deux comportement extrêmes : routage purement hiérarchique et routage purement plat. De plus, A-CSR a un comportement proche du mode de routage le plus performant quelle que soit la densité : DSR pour 50 et 100 nœuds, NA-CSR pour 150 nœuds.

Les simulations montrent bien que A-CSR réussit à détecter les conditions de réseau et à adapter dynamiquement son mode de routage pour réaliser de meilleures performances.

De plus, nous relevons l'intérêt d'une stratégie A-CSR (Densité+Mobilité). Elle a un comportement proche du mode de routage le plus performant quelle que soit la densité.

Dans la suite, nous étudions plus précisément les performance de la version A-CSR (Densité+Mobilité) que nous notons simplement CSR.

### 4.3.4 Proposition d'adaptation pour le choix des Chefs de Cluster et Serveurs

Dans la version de base, la métrique de mobilité est le nombre d'erreur de route, que nous notons $E$ et la densité qui est le nombre de voisins, que nous notons $D$. Dans cette section nous présentons des heuristiques de choix des Chefs de Cluster et Serveurs avec différentes stratégies. Les stratégies que nous proposons sont du même ordre que celles étudiées avec OLSR. Nous souhaitons confirmer les résultats relatifs à l'importance relative des métriques densité et mobilité dans les mécanismes d'élection.

#### 4.3.4.1 Heuristique de choix des Chefs de Cluster et Serveurs dans CSR original

La sélection des Chef de Cluster et du Serveur est fonction de la densité (*1D*), les étapes sont :

1. Extaire les informations d'entête (par exemple Densité et addresse IP candidates) du paquet reçu.
2. Comparer sa Densité avec la Densité candidate. Le nœud qui possède la plus haute densité est choisi comme Chef de Cluster ou Serveur et l'autre nœud change son statut en *"nœud"*.
3. En cas d'égalité, comparer son addresse IP avec l'addresse IP candidate. Le nœud qui possède la plus faible addresse IP est choisi comme Chef de Cluster ou Serveur, l'autre change son statut en *"nœud"*.

#### 4.3.4.2 Stratégies de choix des Chefs de Cluster et Serveurs sur critères de Densité et Mobilité

Nous étudions l'impact relatif de la mobilité et de la densité dans la sélection des Chef de Cluster et du Serveur avec les deux stratégies ci-après :

– **Stratégie 1 : Mobilité en complément de la Densité**

Comme pour le choix des MPR le critère de densité est examiné puis celui de mobilité (*1D+2E*) :

1. Extaire les information d'entête (Densité, Nombre erreur de routes et addresse IP du condidat) du paquet reçu.
2. Comparer sa Densité avec la Densité candidate. Le nœud qui possède la plus haut densité est choisi comme Chef de Cluster ou Serveur, l'autre nœud change son statut en *"nœud"*.
3. En cas d'égales Densités, comparer le nombre erreur de route avec le nombre d'erreur candidat. Le nœud qui possède le plus petit nombre d'erreur de route (mobilité basse) est choisi comme Chef de Cluster ou Serveur, l'autre nœud change son statut en *"nœud"*.
4. En cas d'égalité du nombre erreur de routes comparer son addresse IP avec l'addresse IP candidate. Le nœud qui possède la plus faible addresse IP est choisi comme Chef de Cluster ou Serveur et autre change son statut à *"nœud"*.

– **Stratégie 2 : Densité en complément de Mobilité**

Cette fois, le critère de mobilité est examiné en premier. En cas d'égalité la densité est examinée. Si l'égalité persite l'identifiant IP est examiné (*1E+2D*).

### 4.3.5 Résultats d'évaluation des stratégies d'élection et discussions

Nous souhaitons étendre les résultats obtenus sur OLSR, aux procédures de choix des Chefs de Cluster et Serveurs. Nous comparons trois méthodes de sélection des Chefs de Cluster et Serveurs :

- **CSR 1D** ou CSR original, Chef de Cluster et Serveur choisis sur le critère nombre de voisins : une métrique de densité *(D)*.
- **CSR 1D+2E** stratégie 1 : Chef de Cluster et Serveur choisis avec un premier critère de densité *(1D)* et en cas d'égalité avec un critère nombre d'erreurs de routes *(2E)*.
- **CSR 1E+2D** stratégie 2 : Chef de Cluster et Serveur choisis avec un premier critère de nombre d'erreur de route *(1E)* et en cas de l'égalité avec la métrique de densité *(2D)*.

Nous considérons en plus des métriques performances générales de la section 4.1.3.2, des métriques plus spécifiques à CSR :

1. Nombre de changements des Chefs de Cluster et Serveurs : nombre total de changements des Chefs de Cluster et Serveurs. Quand le nœud est choisi pour la première fois comme Chef de Cluster ou Serveur, le compteur est réglé au nombre de Chefs de Cluster et Serveurs choisis. Puis, quand un nouveau nœud est choisi comme Chef de Cluster ou Serveur, le compteur est augmenté du nombre de Chefs de Cluster-Serveur qui sont différents de la série précédente.
2. Nombre de Chefs de Cluster et Serveurs : nombre total des Chefs de Cluster et Serveurs dans le réseau. A l'initialisation, le compteur a comme valeur le nombre de Chefs de Cluster et Serveurs choisis. Puis le compteur est augmenté par le nombre de tous les Chef de Cluster ou Serveur choisis.

De même que pour OLSR nous examinons les résultats sur 3 environnements de densité.

#### 4.3.5.1 Résultats en environnement basse densité

Comme OLSR, CSR a été conçu pour de grandes configurations de réseaux, néanmoins nous examinons sa performance sur une petite configuration : 50 nœuds (pour moins de 50 nœuds le mode CSR ne fonctionne pas car la densité n'est pas suffisament importante pour basculer du mode DSR au CSR) sur un secteur 1000m x 1000m, pour pouvoir dégager l'influence de mobilité.

Le pourcentage de différence d'amélioration, ou diminution, de performance pour *1D+2E* et *1E+2D* comparé à *CSR 1D* pour 50 nœuds est représenté dans la figure 4.20.

Le critère nombre de Chefs de Cluster et Serveurs dans les trois stratégies est peu significatif (moins que 1%). Cependant, le nombre de changements de Chef de Cluster et Serveur de *1E+2D* et *1D+2E* est moindre que celui de *CSR 1D* grâce au critère de mobilité. Quand le nœud commence à changer de mode DSR->CSR, il doit avoir une densité au moins égale à la valeur *Densité_ Défault (* prise à 3 dans les simulations). Dans les simulations avec une densité de 50, le nombre de voisins est rarement supérieur à 3 c'est pourquoi le critère principalement utilisé est la densité pour changer le mode de routage. C'est ensuite pour le choix de la série des Chefs de Cluster et Serveurs dans *1E+2D*, le critère de mobilité qui est utilisé (*1E*). Dans les faits la stratégie est : *1"3"+2E+3D*, c'est pourquoi il y a peu de différences dans le nombre de clusterhead choisis. De même pour la stratégie *1D+2E.* Elle fonctionne légèrement mieux que *1D* parce qu'il y a un ou deux candidats qui ont la même densité et dans ce cas le nombre d'erreur de route est considéré. Le protocole *1D+2E*

fonctionne comme *1E+2D* mais légèrement moins bien parce qu'il n'y a pas beacoup de candidat qui ont la même densité.

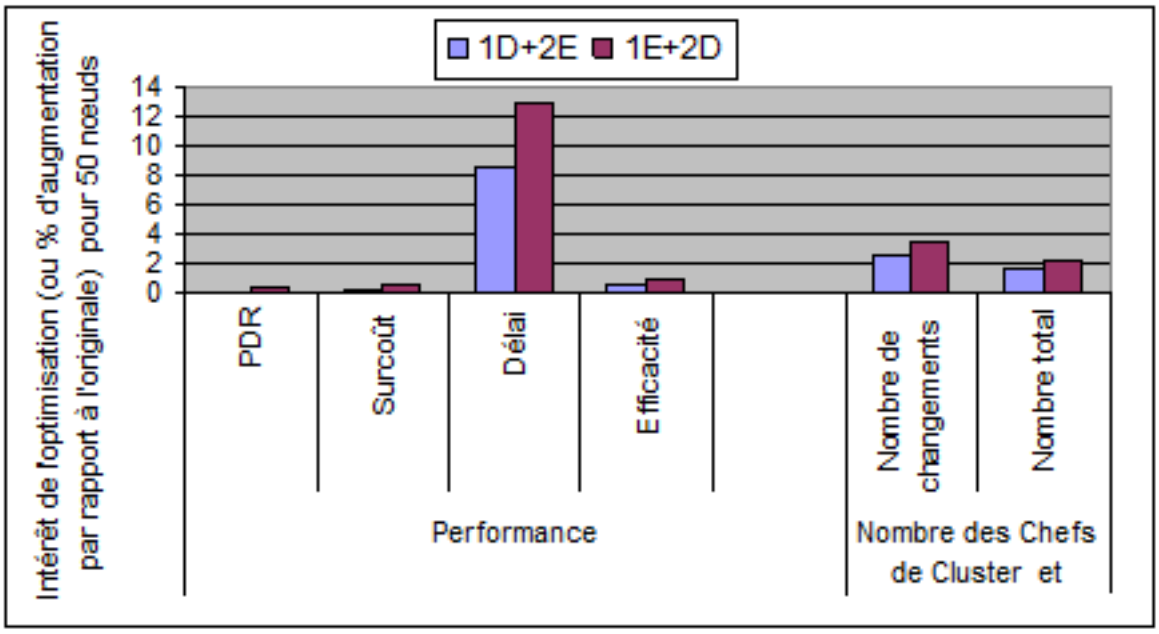



FIG. 4.20 – Les performances CSR comparatives pour 50 nœuds des stratégies 1D+2E et CSR original

En considérant l'influence des critères $E$ et $D$ sur les critères : PDR, surcoût, délai et efficacité, nous constatons que $E$ est plus influant que $D$ dans la mesure où il y a une meilleure amélioration de performance. Ceci, car il y a moins de changement de clusterhead et serveur et que le cache de route est utilisé. L'amélioration des PDR est moins significative (moins que 1%) car les trois stratégies peuvent garder les paquets à émettre jusqu'à ce qu'une route pour la destination soit disponible (procédures de DSR).

**Conclusion :** Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par la stratégie OLSR+Link Duration avec 10 nœuds (section 4.2.3.2). Ainsi la métrique de mobilité est plus influante que la densité dans un petit réseau.

#### 4.3.5.2 Résultats en environnement de densité moyenne

La figure 4.21 indique les performances des stratégies *1D+2E* et *1E+2D* en rapport à celle de *CSR 1D* pour 100 nœuds.

Les résultats de simulation montrent que *1D+2E* a une performance équivalente à celle *1D(* moins de 4% d'écart). Dans les faits, le critère de mobilité est peu utilisé.

Les résultats pour 100 nœuds indiquent que *1E+2D* augmente juste le pourcentage d'amélioration du nombre de changements des Chefs de Cluster et Serveurs. Il y a une détérioration pour tous les autres critères, liée au fait que, *1E+2D* définit

plus de Chef de Cluster et Serveur que les autres stratégies car il y a à l'initialisation un plus grand nombre de Chef de Cluster qui sont choisis.

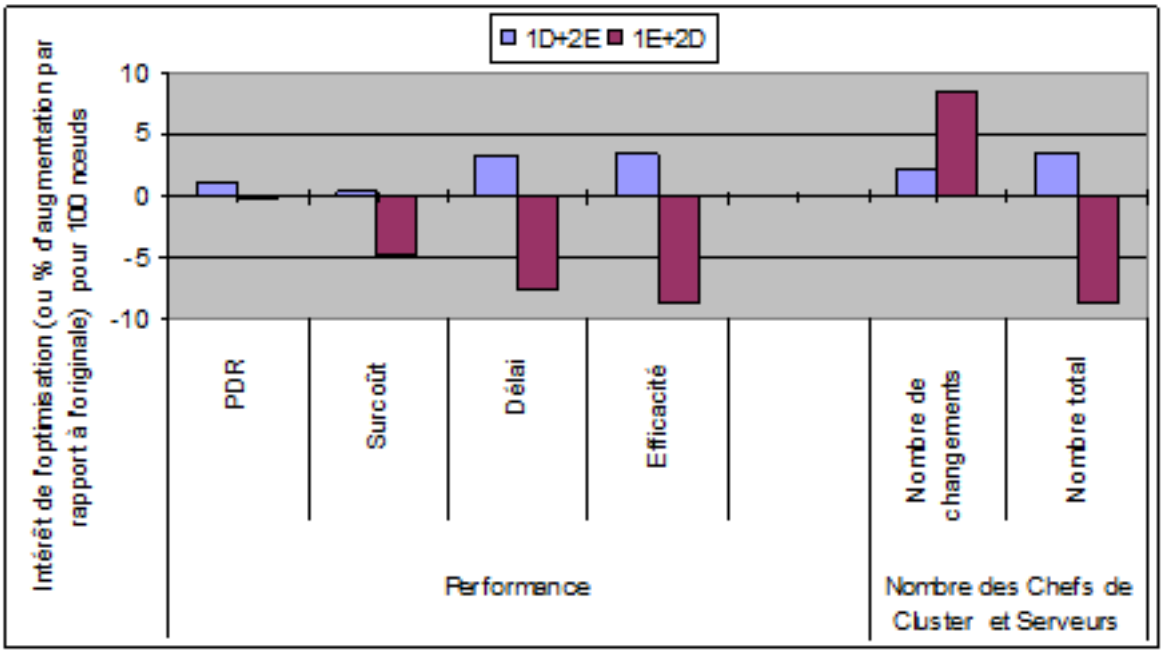



FIG. 4.21 – Les performances CSR comparatives pour 100 nœuds des stratégies 1D+2E et CSR original

**Conclusion :** Les simulations montrent que la densité est plus influente que la mobilité quand le nombre de nœud augmente. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus avec l'approche OLSR avec 50 nœuds (section 4.2.3.3 cas densité moyenne).

Nous étudions plus précisément ce que devient cette influence sur de grandes configurations.

#### 4.3.5.3 Résultats en environnement haute Densité

Nous évaluons l'intérêt de compléter la métrique de densité par la métrique de mobilité pour 150 nœuds en interprétant les résultats de simulation présentés dans la figure 4.22. Nous constatons une amélioration de performance avec la stratégie CSR *1D+2E* pour tous les critères de performance, comparé aux résultats de la stratégie *1D*.

*1D+2E* a un délai plus faible que *1D* en raison de l'amélioration de stabilité de route (le nombre de changements des Chefs de Cluster et Serveurs de *1D* est plus haut que par *1D+2E*). Concernant la stabilité des Chefs de Cluster et Serveurs, nous notons que pour un réseau à haute densité, la performance du protocole est inversement proportionnelle au nombre de changement des Chefs de Cluster et Serveurs. Dans *1D+2E*, le nombre de changements des Chefs de Cluster et Serveurs est plus faible ; le nombre de changements de route diminue, et le délai de bout en bout est plus bas. Le nombre de messages de contrôle est aussi réduit. Par conséquent, PDR est amélioré. Enfin, l'efficacité du réseau est significativement augmentée.

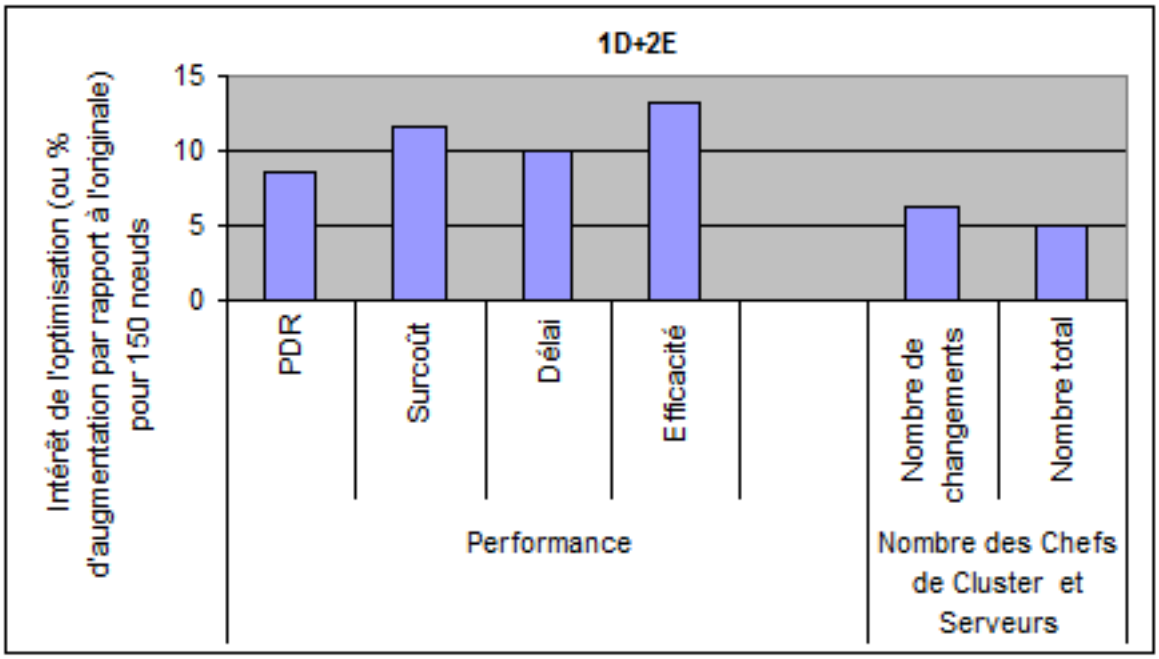



FIG. 4.22 – Les performances CSR comparatives pour 150 nœuds des stratégies 1D+2E et CSR original

#### 4.3.5.4 Synthèse

De façon similaire à l'étude présentée précédemment sur OLSR, nous synthétisons l'intérêt d'utiliser telle ou telle stratégie en figure 4.23. Nous retrouvons le même type de résultat : à basse densité, la métrique de mobilité est plus significative que la densité. Pour l'environnement de densité moyenne, la densité a plus d'importance que la métrique de mobilité. Pour une densité haute, il est intéressant d'utiliser une combinaison des deux critères premièrement, la densité puis la métrique de mobilité (*1D+2E*).

Nous constatons également l'intérêt d'utiliser la stratégie *1D+2E* dans tous les environnements. En densité basse les performances obtenues sont proches de celles de la stratégie optimale *1E+2D*, en densité moyenne elles s'approchent de celles de 1D, et en densité haute la performance est optimale.

Ces résultats sont équivalents à ceux obtenus avec l'approche OLSR.

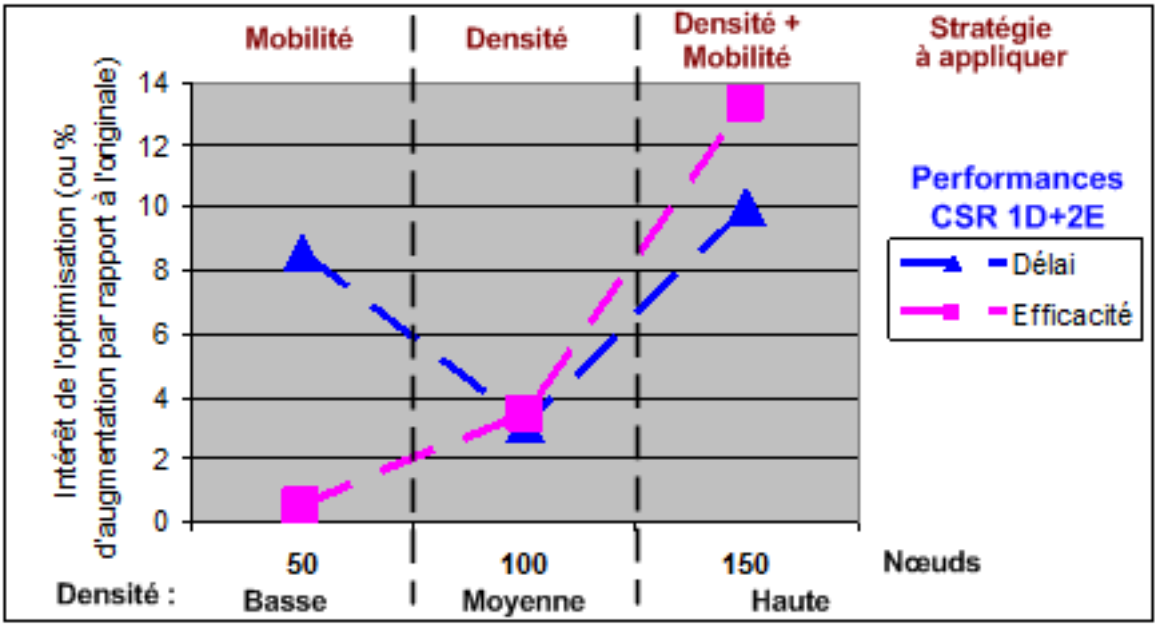



FIG. 4.23 – Domaine d'application des stratégies CSR selon la densité

## 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons mis en pratique l'analyse du processus d'adaptation à la mobilité en réalisant deux adaptations de routage. Au delà de l'intérêt de proposer des mécanismes améliorant le routage, notre objectif a été de confronter sur des cas pratiques la notion de *"mobilité"* exprimée au cours des chapitres précédents. Pour ce faire nous avons conçu et réalisé sous simulateur une adaptation du protocole OLSR et une adaptation du protocole CSR.

Nous avons proposé plusieurs stratégies d'adaptation pour évaluer si une métrique était plus influente qu'une autre et donc capturait mieux la mobilité. Les métriques utilisées sont respectivement pour le protocole OLSR et pour le protocole CSR la durée de liaison (LD) et le nombre d'erreurs de routes (E). Ce sont deux métriques de sociologie du déplacement qui minimisent la signalisation, chacune est directement disponible dans le protocole étudié. Nous avons également considéré la densité, facteur déterminant dans les performances des deux protocoles qui proposent un mode de routage hiérarchique, qui est davantage relative au graphe de connexion possible dans le réseau qu'au déplacement en lui-même. Si un élément se déplace et qu'il a suffisamment de voisins son lien à un voisin donné sera rompu mais rétabli rapidement.

Les résultats obtenus indiquent que la notion de mobilité, et donc la pertinence en regard du gain de performance obtenu d'une métrique, dépend essentiellement de la taille du réseau. Nous avons également montré qu'une stratégie reposant sur les deux critères, densité et mobilité, dans cet ordre d'application était quasi optimale quel que soit l'environnement de densité.

Chapitre

# 5 Etude expérimentale des modèles de mobilité

Plusieurs études de la mobilité sont fondées sur l'utilisation de modèles proposés dans la littérature et intégrés dans divers outils de simulation. Dans notre travail nous nous sommes focalisé sur des modèles aléatoires. Nous nous posons alors les questions suivantes :

- les résultats obtenus avec ces modèles peuvent-ils être généralisés à d'autres modèles de mobilité ?
- les métriques de mobilité retenues traduisent elles plutôt les performances des protocoles de routage ou plutôt les caractéristiques intrinsèques des modèles de mobilité ?

L'objectif de ce chapitre est de valider les résultats obtenus dans notre étude, en généralisant à des modèles de mobilité divers.

Nous nous intéresserons particulièrement à identifier les caractéristiques du modèle prédictif Manhattan proposé dans la littérature et l'impact de son utilisation sur l'adéquation des métriques de mobilité à transcrire la mobilité des nœuds.

Dans la suite nous analyserons les métriques de mobilité, LD (link duration), LC (link change) et densité, en utilisant trois modèles de mobilité les plus utilisés dans la littérature (Manhattan, RPGM et Random WayPoint). Nous utilisons la métrique mobility [51] (cf. section 2.2.1.3.2), qui précise la mobilité d'un scénario avec une seule valeur $M$ qui est une fonction du mouvement relatif des nœuds durant une période de temps d'un scénario, pour obtenir un cadre d'évaluation comparable. Les résultats sont capturés par l'outil bonnmotion [96].

## 5.1 Manhattan

Nous commençons par analyser le modèle Manhattan. Dans toutes les simulations qui suivent, nous faisons varier dans un premier temps la vitesse ensuite le temps de pause. Nous traçons les métriques de mobilité en fonction de ces deux paramètres.

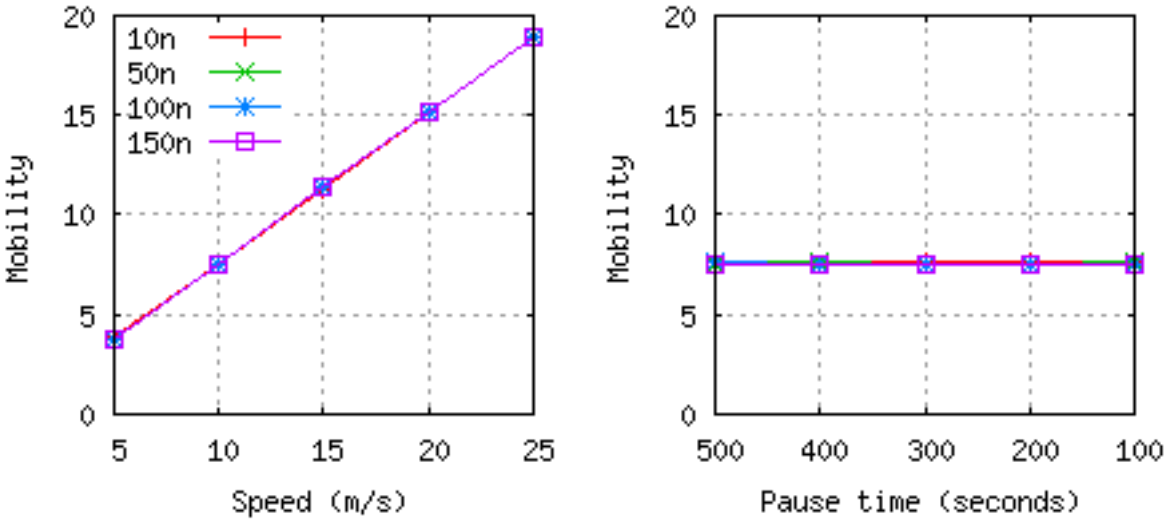



FIG. 5.1 – Mobilité de modèle Manhattan

La mobilité reflète ici la vitesse du nœud. Elle est indépendante de la densité (Figure 5.1-(a)). Nous pouvons souligner, que pour un modèle de mobilité Manhattan, la mobilité globale est indépendante aussi du temps de pause. Cette métrique garde une valeur sensiblement constante en fonction du temps de pause, Figure 5.1-(b), comprises entre 7.5 et 7.64.

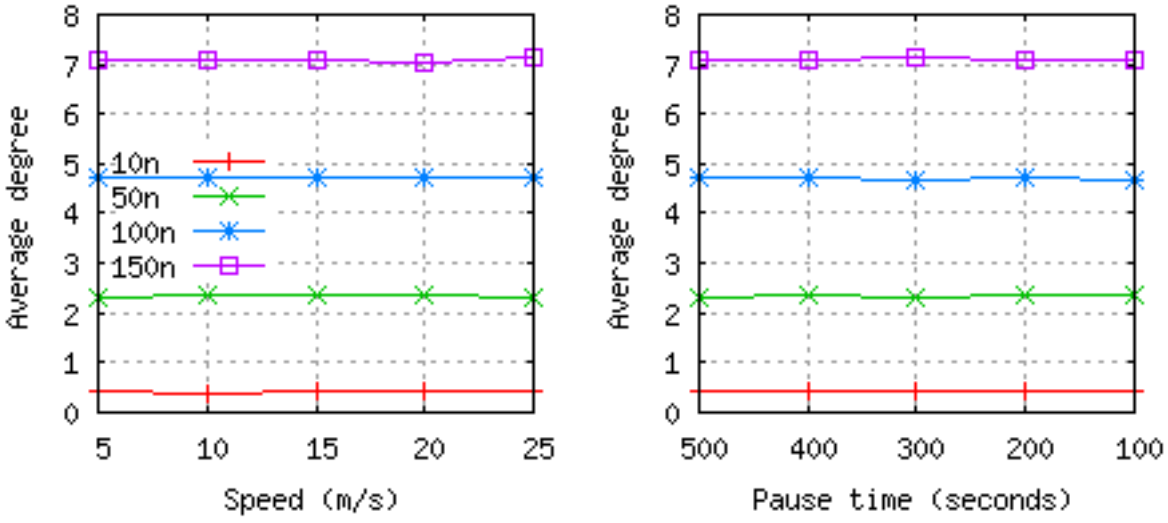



FIG. 5.2 – Degré moyen de modèle Manhattan

Selon un modèle de mobilité Manhattan, le degré des nœuds (nombre moyen de

voisins) exprime bien la densité du réseau et est indépendant aussi bien de la vitesse des nœuds que du temps de pause (Figure 5.2).

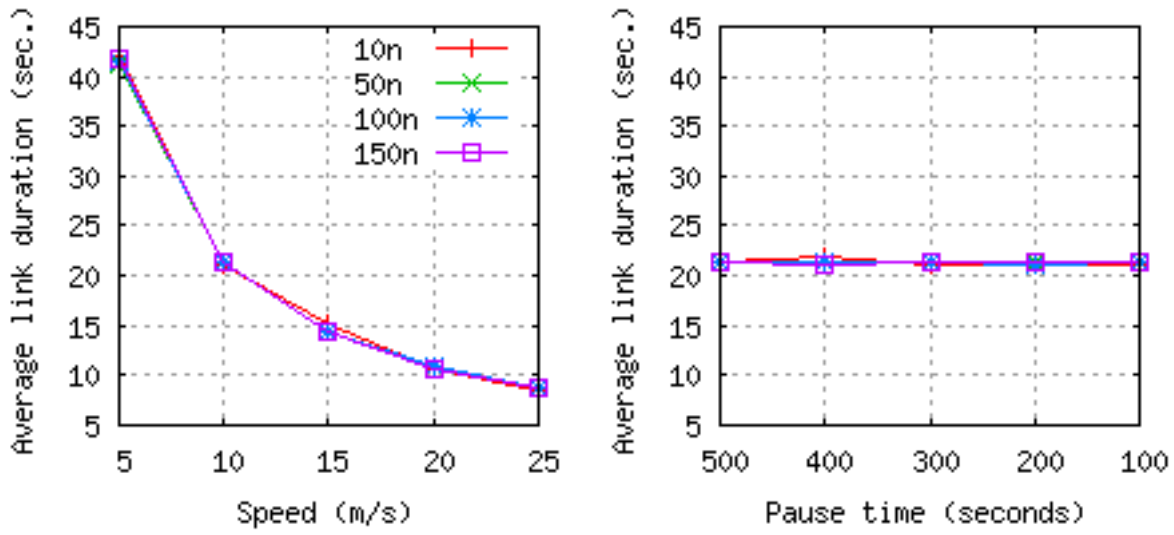



FIG. 5.3 – Durée des liens de modèle Manhattan

La durée moyenne des liens, quant à elle, décroît exponentiellement en fonction de la vitesse des nœuds et est insensible aussi bien au temps de pause qu'à la densité (Figure 5.3).

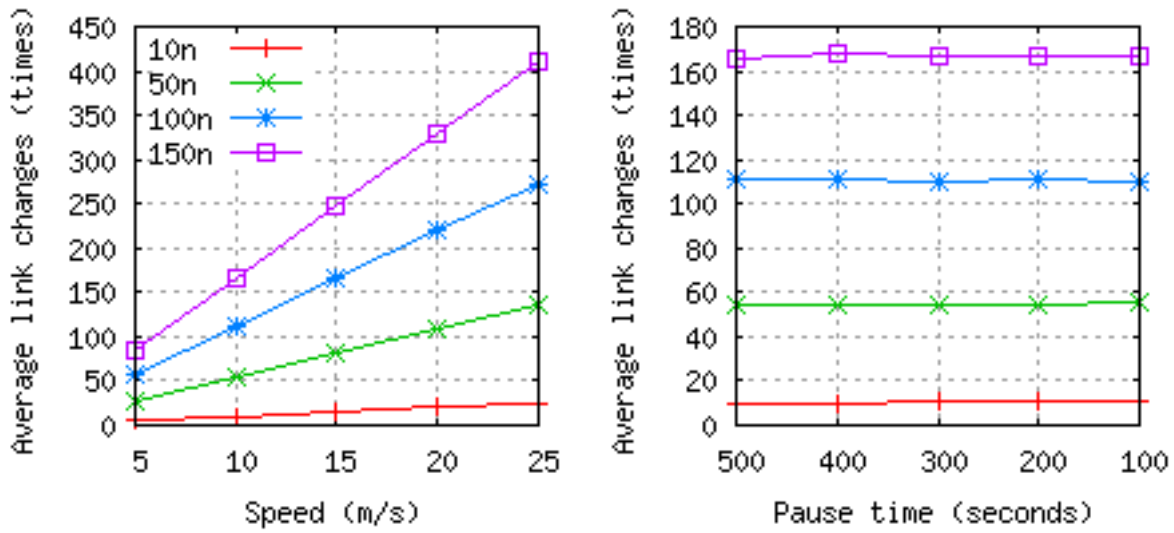



FIG. 5.4 – Nombre moyen de changements de liens de modèle Manhattan

Le nombre moyen de changements de liens permet d'exprimer aussi bien la densité que la vitesse du mobile (Figure 5.4).

Nous pouvons enfin dire que, pour un modèle de mobilité Manhattan, toutes les métriques sont indépendantes du temps de pause.

Pour valider les résultats obtenues pour le modèle Manhanttan, nous avons refait les simulations réalisées dans le chapitre 3 en utilisant les protocoles AODV et DSR et le modèle de mobilité en question.

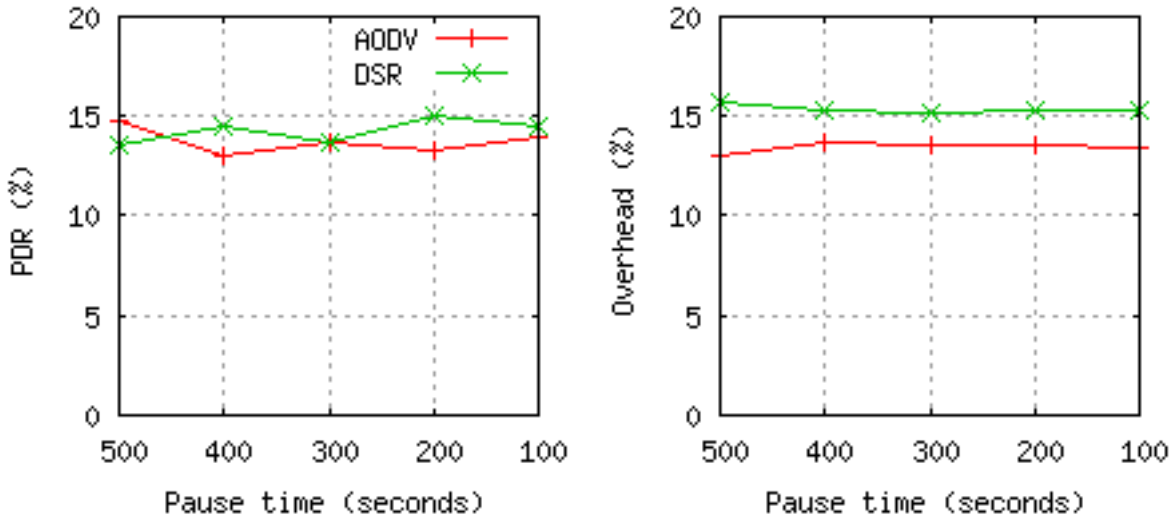



FIG. 5.5 – PDR et Overhead pour le modèle Manhattan

Nous remarquons que selon les valeurs de performance utilisées (PDR et Overhead), les résultats restent constants en fonction du temps de pause (la figure 5.5). Dans un modèle prédictif comme Manhattan (avec temps de pause), l'adaptation à la mobilité par une métrique est alors déconseillée.

## 5.2 RPGM

Considérons maintenant le modèle de mobilité RPGM. Nous avons effectué des simulations pour respectivement 10 (5 groupes de 2 nœuds), 50 (5 groupes de 10 nœuds), 100 (10 groupes de 10 nœuds) et 150 (15 groupes de 10 nœuds) nœuds.

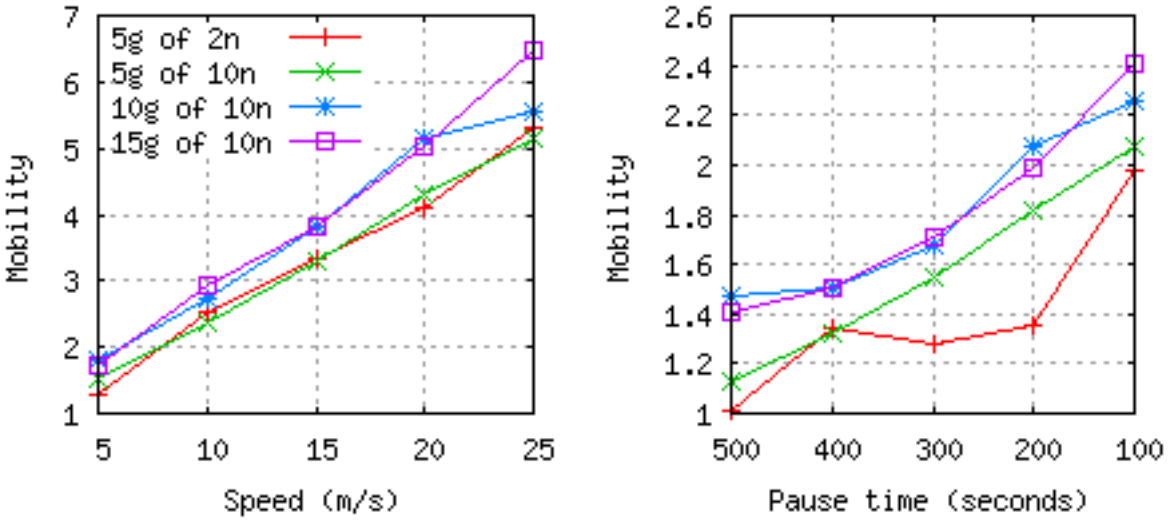



FIG. 5.6 – Mobilité de modèle RPGM

La mobilité des nœuds exprime la vitesse de déplacement de ces derniers, et dépend également du temps de pause. Par contre, elle est insensible à la densité (Figure 5.6). Ceci est concevable vu que les nœuds se déplacent en groupe.

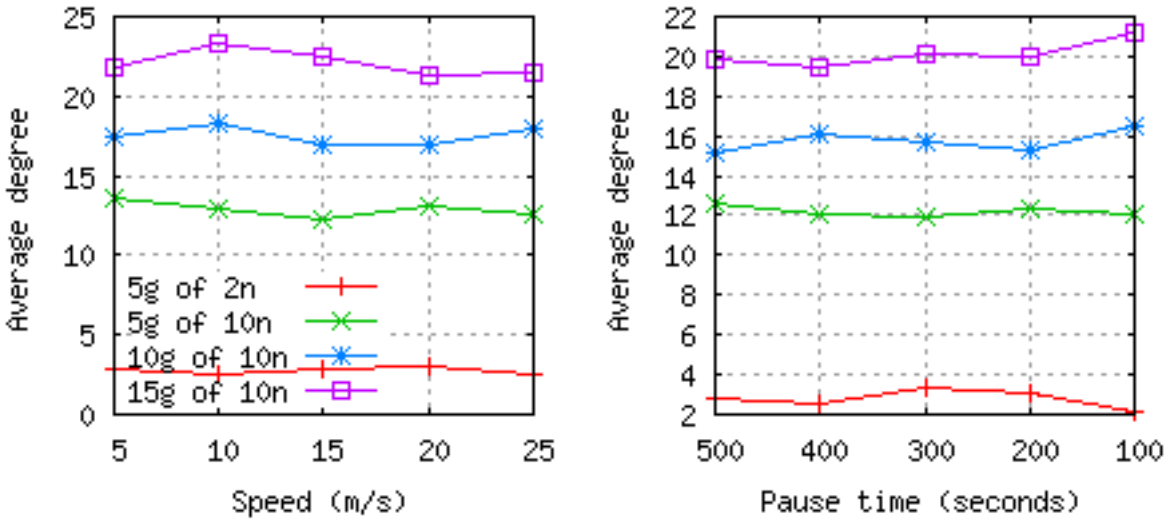



FIG. 5.7 – Degré moyen de modèle RPGM

Ce mouvement de groupe limite asymptotiquement le degré moyen de chaque nœud au nombre de membres du groupe. Ce degré exprime la densité du réseau et est donc insensible à la vitesse et au temps de pause (Figure 5.7).

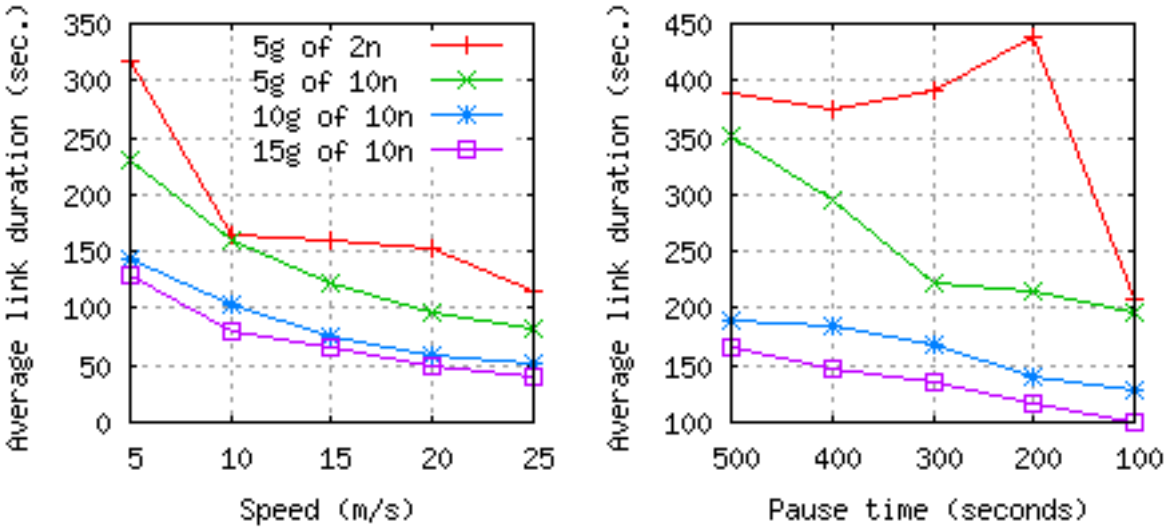



FIG. 5.8 – Durée des liens de modèle RPGM

La durée moyenne des liens décroît en fonction de la vitesse de déplacement. La variance de cette durée dépend de la taille du groupe et de la densité. Ce résultat est aussi valable pour le temps de pause (Figure 5.8).

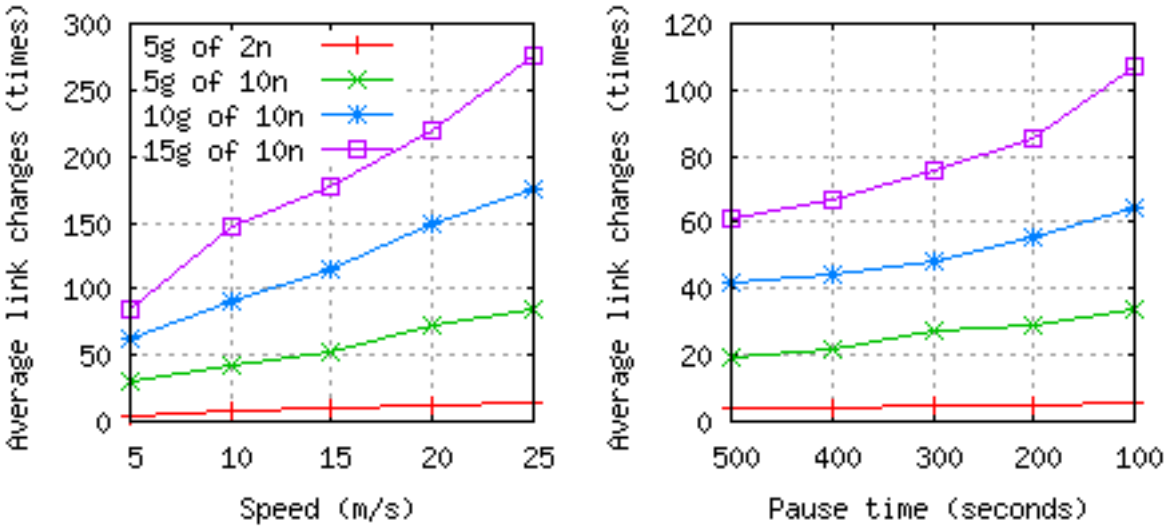



FIG. 5.9 – Nombre moyen de changements de liens de modèle RPGM

Le nombre moyen de changements de liens reflète la densité et augmente relativement avec la vitesse (Figure 5.9-(a)). Cette métrique exprime aussi les changements du temps de pause (Figure 5.9-(b)).

## 5.3 Random Waypoint

Le troisième modèle considéré est le modèle Random Waypoint. Dans la plupart des études de performance utilisant ce modèle de mobilité, les nœuds sont répartis aléatoirement sur la surface de simulation. Cependant cette distribution initiale de nœud n'est pas représentative de la façon dont les nœuds se répartissent ensuite d'eux même lorsqu'ils se déplacent.

Il existe également une relation complexe entre la vitesse des nœuds et le temps de pause dans le modèle de mobilité Random Waypoint. Par exemple, un scénario avec de rapides mouvements et de longues pauses produit au final un réseau plus stable que le scénario où les nœuds sont lents avec de courtes pauses. De longs temps de pause produisent un réseau stable même à de grandes vitesses.

Nous exprimons ici les mêmes métriques considérées précédemment :

Si la mobilité exprime bien la vitesse et le temps de pause elle est insensible à la densité (Figure 5.10).

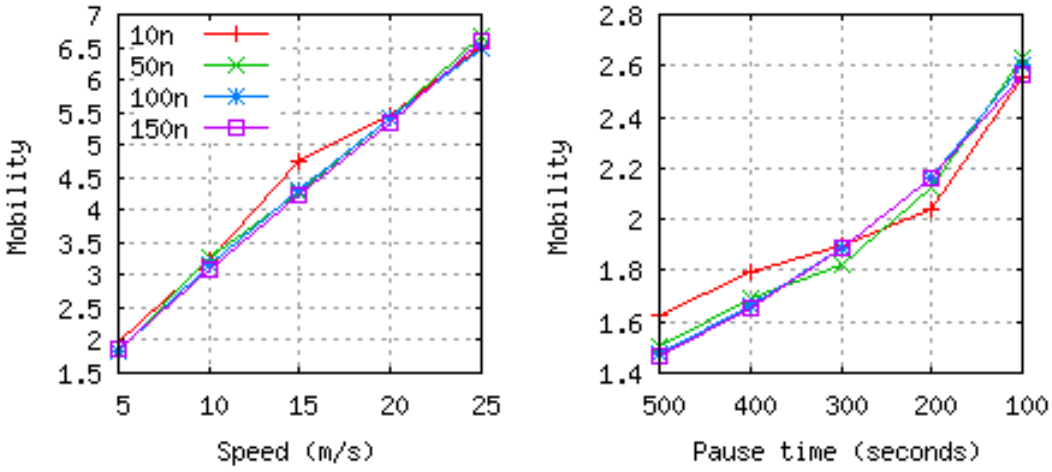



FIG. 5.10 – Mobilité de modèle RWP

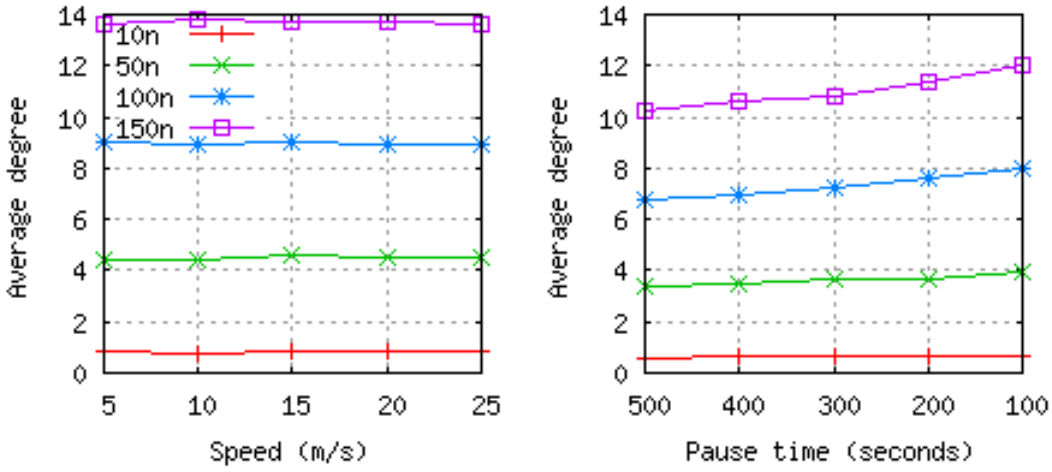



FIG. 5.11 – Degré moyen de modèle RWP

Le degré moyen augmente avec la densité et est indépendant de la vitesse de déplacement (Figure 5.11-(a)). Les résultats montrent qu'il baisse légèrement avec le temps de pause (Figure 5.11-(b)).

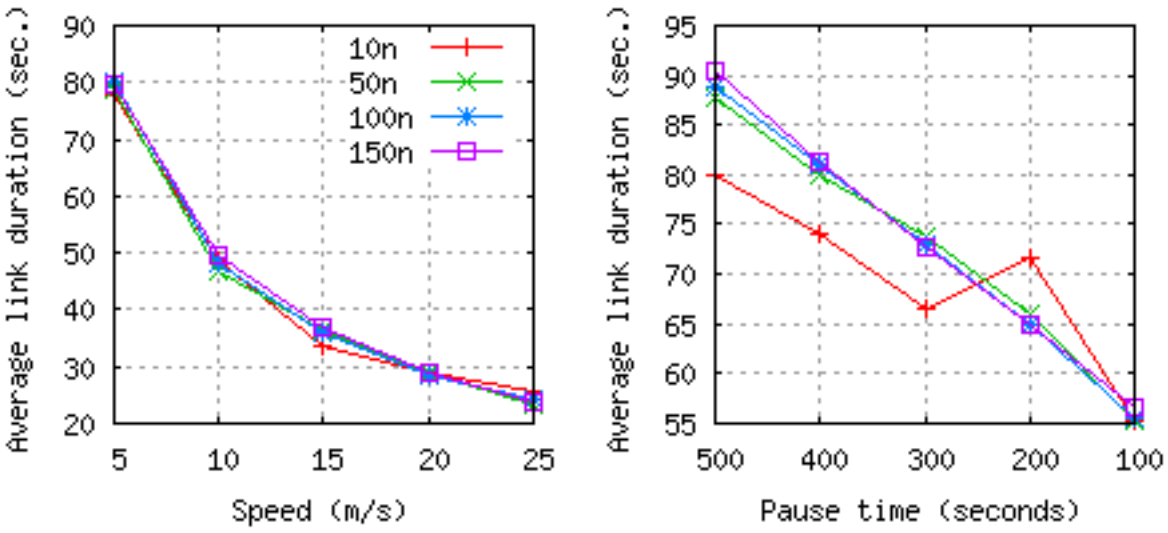



FIG. 5.12 – Durée des liens de modèle RWP

Comme pour les deux modèles précédents, pour un modèle RWP, la durée moyenne des liens décroît avec la vitesse (Figure 5.12-(a)).

Bien que cette durée moyenne reste plus faible que celle obtenue avec le modèle RPGM, elle est plus élevée que pour le modèle Manhattan.

Notons enfin, que la durée moyenne croit linéairement avec le temps de pause (Figure 5.12-(b)) et est indépendante de la densité du réseau.

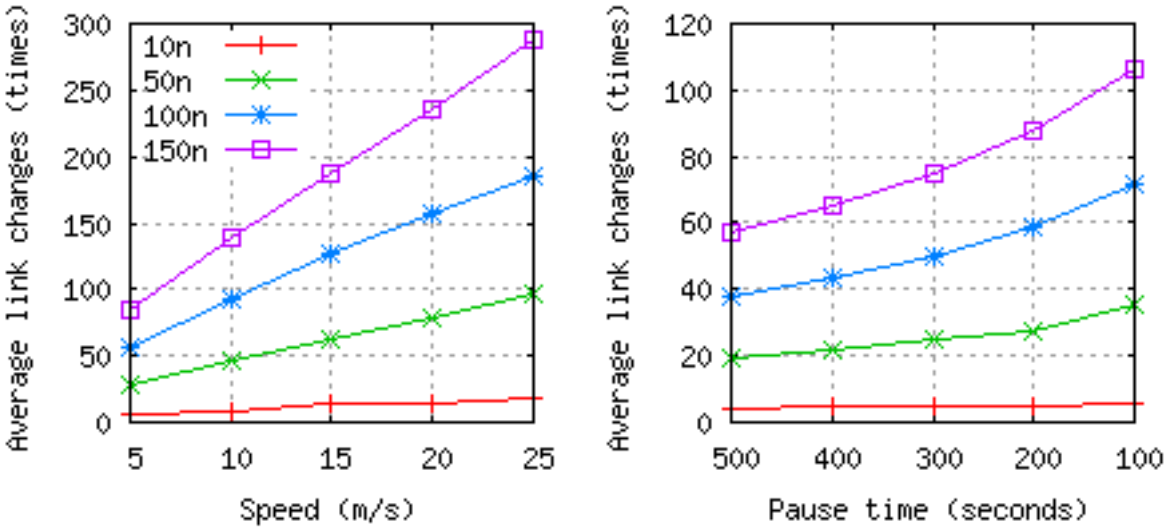



FIG. 5.13 – Nombre moyen de changements de liens de modèle RWP

Enfin, le nombre moyen de changements de liens varie comme pour le modèle RPGM en fonction de la vitesse aussi bien qu'en fonction du temps de pause (Figure 5.13).

# Conclusion

Nous remarquons que seulement dans le cas du modèle Manhattan toutes les métriques sont constantes en fonction du temps de pause. Nous pouvons ainsi penser que ces métriques restent quasi constantes pour un modèle prédictif ce qui permettrait de donner une indication sur ce type de mouvement. Nous pourrons par conséquent mettre en place des mécanismes adaptatifs au type de mobilité engendrée (prédictive ou non prédictive). S'il n'y a pas d'intérêts à utiliser des métriques obtenues par mesures pour des mouvements non aléatoires, comme paramètres des adaptations protocolaires, celles-ci pourraient permettre de déduire la nature des déplacements : prédictif ou aléatoire. Dans le cas où le mouvement est aléatoire nous proposons de mettre en place des mécanismes adaptatifs similaires à ceux présentés auparavent.

## 5.4 Adaptation au modèle de mobilité

Pour conclure notre étude, nous extrapolons des résultats des chapitres précedents un processus global d'adaptation.

Nous avons montré dans cette thèse que pour des mouvements aléatoire, le processus d'adaptation à la mobilité pouvait être fait simplement par un mobile en utilisant les métriques de densité et de mobilité, avec une mobilité mesurée par la durée de liaison pour un protocole proactif (avec protocole Hello) et mesurée par le nombre d'erreurs de route pour un protocole réactif. Nous étendons notre réfexion à des mouvements non aléatoire, des mouvements prédictifs. Pour ceux-ci il nous semble plus adapté d'évaluer la mobilité par un calcul reposant sur la modélisation du mouvement. Le problème est alors pour un nœud de savoir dans quel type de mouvement il se trouve. Nous proposons d'utiliser les caractéristiques de mobilité relevées dans ce chapitre pour résoudre cette question. Dans un phase d'initialisation le nœud mesure son environnement : s'il trouve que les métriques (duréee, changement, de liaison) sont constantes, il extrapole un mouvement prédictif, sinon un mouvement aléatoire.

Le processus d'adaptation que nous proposons est alors celui de la figure 5.14. Nous commençons par l'observation de mesures pour déterminer le modèle de mouvement. Soit il est déterministe, le protocole de routage ne fait pas d'adaptation aux métriques. Soit il est aléatoire, le protocole de routage utilise une procédure d'adaptation de fonctionnement selon le protocole : soit (cas 1) adaptation de paramètre, par exemple pour OLSR ou DSR, soit (cas 2) adaptation de mode, par exemple pour CSR.

### Cas 1 :

Adaptation de paramètre selon la densité du réseau : le protocole tente de trouver une meilleure route dans le réseau et optimise son fonctionnement par de l'adaptation aux différents niveaux de densités du réseau. Trois niveaux de densités sont considérés :

- $Density < D_{medium}$ : le nœud fonctionne en mode Mobilité (densité faible), le nœud choisit la route en utilisant la métrique de mobilité.
- $D_{medium} \leqq Density < D_{high}$ : le nœud fonctionne en mode Densité (densité moyenne), le nœud choisit la route en utilisant la métrique de densité.
- $Density \geqq D_{high}$ : le nœud fonctionne en mode Densité+Mobilité (densité haute), le nœud choisit la route en utilisant la métrique de mobilité au dessus de la densité.

### Cas 2 :

L'adaptation de mode selon la densité et la mobilité du réseau (cf. chapitre 1 et 4). Un protocole avec structure a besoin, pour les procédures de sélection de Chef de Cluster et de Serveur, de choisir parmi l'environnement réseau le moins mobile et le plus dense. Dans ce cas, nous considérons en plus la mobilité comme une condition de changement de mode.

- **Mode sans-structure :** quand la densité est faible ou la mobilité est élevée, le nœud reste en mode sans-structure et choisi la route en utilisant la métrique de mobilité.
  - $Density < D_{medium}$ ou $Mobility < M_{high}$ : le nœud fonctionne en mode sans-structure avec Mobilité (densité faible ou mobilité haute),
  - $D_{medium} \leqq Density < D_{high}$ et $Mobility \leq M_{medium}$ : le nœud change vers le mode structure avec Densité (densité moyenne et mobilité faible),
  - $Density \geqq D_{high}$ et $Mobility \leq M_{high}$ : le nœud change vers le mode structure avec Densité+Mobilité (densité haute et mobilité moyenne/faible).
- **Mode Structure avec Densité :** quand la densité est moyenne et la mobilité est faible, le nœud fonctionne en mode avec structure et choisit la route, le Chef de Cluster ou le Serveur en utilisant la métrique de densité.
  - $Density < D_{medium}$ ou $Mobility < M_{high}$ : le nœud change vers le mode sans-structure avec Mobilité (densité faible ou mobilité haute),
  - $D_{medium} \leqq Density < D_{high}$ et $Mobility \leq M_{medium}$ : le nœud reste en mode structure avec Densité (densité moyenne et mobilité faible),
  - $Density \geqq D_{high}$ et $Mobility \leq M_{high}$ : le nœud change vers le mode structure avec Densité+Mobilité (densité haute et mobilité moyenne/faible).
- **Mode Structure avec Densité+Mobilité :** quand la densité est haute et la mobilité est faible ou moyenne, le nœud fonctionne en mode avec structure et choisit la route, le Chef de Cluster ou le Serveur en utilisant la métrique de mobilité au dessus de métrique de densité.
  - $Density < D_{medium}$ ou $Mobility < M_{high}$ : le nœud change vers un mode sans-structure avec Mobilité (densité faible ou mobilité haute),
  - $D_{medium} \leqq Density < D_{high}$ et $Mobility \leq M_{medium}$ : le nœud change de mode vers un mode avec structure avec Densité (densité moyenne),
  - $Density \geqq D_{high}$ et $Mobility \leq M_{high}$ : le nœud reste en mode avec structure avec Densité+Mobilité (densité haute et mobilité moyenne/faible).

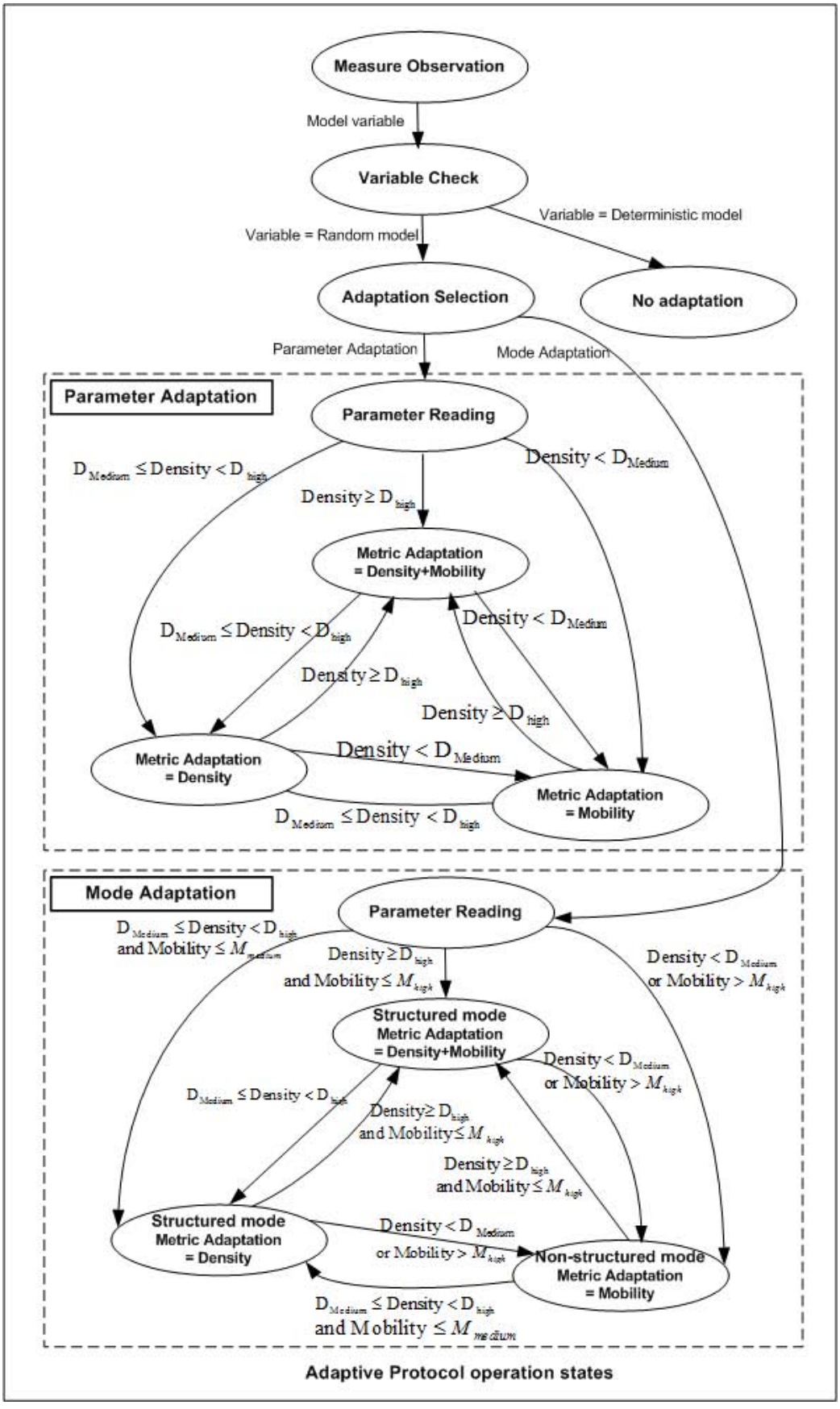



FIG. 5.14 – Proposition de processus d'adaptation

## 5.5 Conclusion

Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent bien l'impact du modèle de mobilité sur les différentes métriques de mobilité considérées. L'utilisation des métriques adéquates permet de déduire les caractéristiques intrinsèques des mouvements des nœuds. Des métriques constantes en fonction du temps de pause sont assimilées à un mouvement prédictif. Dans le cas contraire le mouvement et aléatoire. La caractérisation du mouvement établie, nous proposons d'utiliser la métrique LD dans le cas d'un mouvement aléatoire. Il serait judicieux, en particulier en fonction de la possibilité de prédire le mouvement, de mettre en place des mécanismes adaptatifs spécifiques qui permettent d'optimiser le fonctionnement des protocoles de routage en les adaptant à la variation prédictive de l'environnement (en terme de mobilité et de densité). Nous pouvons imaginer dans ce sens utiliser ces mécanismes pour des nœuds embarqués dans des moyens de transport. Nous pensons que l'étude de ces mécanismes devrait être entreprise en tenant compte de contextes applicatifs plus précis fournissant une connaissance prédictive du trafic.

# Conclusion générale

La mobilité dans les réseaux sans fil a été un sujet d'actualité ces dernières années. Plusieurs solutions sont mises en place pour les réseaux avec infrastructure. Lorsqu'il s'agit de réseaux sans fil ad hoc, il apparaît clairement que la mobilité doit être prise en charge par les nœuds. Ces derniers doivent s'adapter à l'état de l'environnement. La gestion de la mobilité ne peut être cloisonnée à la gestion du mouvement des nœuds car elle doit prendre en compte les variations dans l'environnement de chaque nœud. Les réseaux de communication récents mettent en place des mécanismes adaptatifs à ces variations. Ces mécanismes sont déployés à tous les niveaux de la pile protocolaire. Des architectures favorisant les interactions entres les différents niveaux sont proposées. Parmi ces architectures nous pouvons citer celles fondées sur le standard IEEE802.21.

Dans cette thèse nous nous sommes intéressés à la mobilité et avons mesuré son impact sur les performances des protocoles et algorithmes mis en place à plusieurs niveaux. Nous nous sommes posés alors les questions du niveau adéquat de la mesure de la mobilité, de la métrique appropriée pour traduire les changements dans l'environnement du mobile et du niveau convenable à l'adaptation à la mobilité.

Pour répondre à ces questions, nous nous sommes intéressés, dans un premier temps, aux travaux de recherche proposant d'améliorer les performances protocolaires des réseaux par l'adaptation dynamique à leur environnement. Nous avons analysé ce processus dans les réseaux mobiles ad hoc en en dégageant les caractéristiques, intérêts et limitations. Les caractéristiques relevées sont le type d'adaptation (de paramètre ou de mode), l'origine protocolaire (auto-adaptation, de même niveau que l'adaptation ou adaptation inter-couches) et la portée des informations qui déclenchent l'adaptation (à vue locale, voisinage ou réseau). Dans l'état actuel de la littérature, il s'avère que les travaux sur l'adaptation peuvent être synthétisés selon leur objectif d'adaptation : énergie, état de la liaison, charge de trafic et dynamique de la topologie. D'un autre coté, nous en retenons des limitations à l'adaptation provenant d'une part du surcoût de signalisation nécessaire à l'obtention des informations, qui limite les gains de performance de l'adaptation, et d'autre part, de la mise à jour non synchronisée à l'état du réseau.

Parmi les adaptations présentées celle de la mobilité nous parait particulièrement

intéressante pour le routage qui est par définition en charge de la gestion de la topologie. Définir une adaptation revient à modifier les paramètres du routage ou son mode de fonctionnement en fonction de la mobilité des éléments du réseau. Une adaptation largement étudiée du routage est celle à la taille du réseau qui permet de mettre en place une structure de routage adaptée à la densité du réseau (de type cluster ou réseau d'arrière plan) ; à celle-ci peut se rajouter la prise en compte de la mobilité obtenue par différentes métriques, comme en attestent les exemples proposés.

Dans une deuxième étape, nous cherchons à préciser la notion de mobilité et comment celle-ci peut être utilisée pour l'adaptation. Nous avons défini la notion de mobilité dans le contexte d'adaptation. Nous définissons trois catégories de métriques selon qu'elles se rapportent au déplacement d'un élément (les métriques de sociologie du déplacement), à l'historique du lien entre deux nœuds (les métriques de sociologie du lien) ou bien à la prédiction du déplacement. Notre taxinomie, issue de l'analyse des travaux traitant de la mobilité en réseaux ad hoc, s'appuie également sur la portée de la mesure qui impacte le trafic de signalisation (nous distinguons le calcul de la métrique au niveau local, au niveau voisinage ou encore au niveau réseau). Nous apprécions l'intérêt des métriques en regard de critères concernant leur calculabilité en environnement distribué sans connaissance globale du réseau, et ce, avec des ressources limitées. Dans l'objectif de retenir des métriques qui soient le plus universelles possible nous écartons celles qui sont dépendantes d'un système de mesure par positionnement et d'un modèle de mobilité donné. Nous relevons l'intérêt des métriques par mesure, par opposition à celles par modélisation, pour les mouvements non prédictifs de type aléatoire. Plus précisement, nous retenons quatre métriques : nombre de voisins, la durée de lien, la fréquence de changement de lien et la stabilité du lien.

Dans la suite de l'étude, nous essayons de savoir s'il existe une meilleure métrique, c'est-à-dire qui apporte le plus de gain de performance à une adaptation à la mobilité du système. Nous cherchons alors à déterminer quelle est la métrique qui est le plus corrélée avec la performance du système constitué par le réseau ad hoc. En considérant que le protocole de routage est le facteur prépondérant de performance du système, nous modélisons celui-ci par un protocole d'accès standard (IEEE802.11) et différentes options de protocoles de routages, qui sont les principaux protocoles de l'IETF (AODV, DSR et OLSR). Le modèle est résolu par simulation pour différents scénarios de mobilité aléatoire que nous moyennons pour obtenir un mouvement *"général"*, de façon à obtenir des résultats relativement indépendants du mouvement. Deux modèles de mobilité aléatoire sont étudiés RWP et RPGM. Nous analysons la performance, exprimée par plusieurs métriques, en corrélation aux métriques de mobilité retenues, à savoir, la durée du lien (LD), la fréquence de changement de liens (LC) et la stabilité des liens (LS). Les résultats que nous obtenons montrent l'importance du nombre de nœuds sur la corrélation : plus leur nombre augmente plus la corrélation entre mobilité et performance augmente. Ils mettent également en évidence l'absence d'une métrique qui soit la meilleure quel que soit le protocole et la taille du réseau. Comme l'étude d'un scénario donné, la meilleure métrique de mobilité doit être déterminée au cas par cas. Bien que ce ne soit pas la meilleure métrique nous préconisons l'utilisation de la métrique LD, en raison de sa simplicité

de calcul et de la relative indépendance vis à vis du modèle de mobilité et de sa forte influence sur les performances des protocoles de routage.

Le choix du niveau d'adaptation et de la métrique étant fait, nous avons mis en pratique l'analyse du processus d'adaptation à la mobilité en réalisant deux adaptations de routage. Au-delà de l'intérêt de proposer des mécanismes améliorant le routage, notre objectif a été de confronter sur des cas pratiques la notion de mobilité telle que nous l'avons exprimée dans notre analyse. Pour ce faire, nous avons conçu et réalisé, sous simulateur, une adaptation du protocole OLSR et une adaptation du protocole CSR. Nous avons proposé plusieurs stratégies d'adaptation pour évaluer si une métrique était plus influente qu'une autre et donc capturait mieux la mobilité. Les métriques utilisées sont respectivement pour le protocole OLSR et pour le protocole CSR la durée du lien (LD) et le nombre d'erreurs de routes (E). Ce sont deux métriques de sociologie du déplacement qui minimisent la signalisation, et chacune est directement disponible dans le protocole étudié. Nous avons également considéré la densité, facteur déterminant dans les performances des deux protocoles qui proposent un mode de routage hiérarchique, qui est davantage relatif au graphe de connexion possible dans le réseau qu'au déplacement en lui-même. Si un élément se déplace et qu'il a suffisamment de voisins son lien à un voisin donné sera rompu mais rétabli rapidement. Les résultats obtenus indiquent que la notion de mobilité et donc la pertinence en regard du gain de performance obtenu d'une métrique, dépend essentiellement de la taille du réseau. Nous avons également montré qu'une stratégie reposant sur les deux critères, dans cet ordre d'application était quasi optimale quelque soit l'environnement de densité.

Dans le dernier chapitre nous nous sommes attachés à étudier l'impact des modèles de mobilités sur les résultats obtenus précédemment. Les résultats de ce chapitre montrent bien l'impact du modèle de mobilité sur les différentes métriques de mobilité considérées. L'utilisation des métriques adéquates permet de déduire les caractéristiques intrinsèques des mouvements des nœuds. Des métriques constantes en fonction du temps de pause sont assimilées à un mouvement prédictif. Dans le cas contraire le mouvement est aléatoire. Il ressort de ce chapitre, la possibilité de caractériser la nature du mouvement. Nous avons alors proposé de mettre en place l'adaptation adéquate à chaque type de mouvement. En fonction de la possibilité de prédire le mouvement, nous mettons en place des mécanismes adaptatifs spécifiques qui permettent d'optimiser le fonctionnement des protocoles de routage en les adaptant à la variation prédictive de l'environnement (en terme de mobilité et de densité). Nous pouvons imaginer dans ce sens utiliser ces mécanismes pour des nœuds embarqués dans des moyens de transport. Nous pensons que l'étude de ces mécanismes devrait être entreprise en tenant compte de contextes applicatifs plus précis fournissant une connaissance prédictive du trafic.

Les perspectives de ce travail sont assez nombreuses. Tout d'abord les principes que nous avons proposés pourraient être enrichis en particulier ceux du dernier chapitre en testant des configurations variées tant en terme de modèles de mobilité que de types de protocoles. Cela dit il est clair que les gains de l'adaptation seront d'autant plus significatifs que le contexte est précis et connu de façon à mettre en place des mécanismes d'adaptation adéquats.

Notre travail s'est également beaucoup focalisé sur la performance rendue aux

utilisateurs en terme de taux de paquets livrés ou taux d'échecs de routes. Nous pourrions aussi étendre ces études en intégrant d'autres types de critères liés par exemple au volume de signalisation. On peut dans ce sens considérer une vue plus large que la vue locale et tenir compte de la qualité de service globale. Il est clair que la mise en place de mécanismes adaptatifs nécessite également de vérifier que les ressources soient partagées équitablement entre nœuds. Notamment entre ceux qui s'adaptent à la mobilité et les autres.

Une perspective intéressante serait également d'enrichir nos types de réseaux : nous nous sommes focalisés sur des réseaux ad hoc, et nous pourrions également intégrer des études sur des systèmes ou le mouvement serait plus prédictif (comme les réseaux satellitaires, réseaux de capteurs ou réseaux véhiculaires). Dans cette perspective les critères de performances les plus significatifs sont spécifiques à chaque système. Notons enfin que nous ne nous sommes pas trop focalisés sur les fluctuations de la qualité du support de communication qui sont désormais bien exploités au niveau de la couche physique (nous pensons en particulier à des mécanismes de modulation et de codages adaptatifs ou encore à des modes de fonctionnement coopératif). Il serait alors judicieux afin de permettre un fonctionnement harmonieux entre les différents niveaux d'utiliser les métriques de mobilité de façon appropriée pour guider les choix en particulier de niveau physique. Il est inutile de perdre du temps à mettre en place une adaptation de niveau physique qui retarde le recouvrement de la mobilité à un niveau plus élevé.

# Bibliographie


[1] C. S. R. Murthy and B. Manoj, *Ad Hoc Wireless Networks : Architectures and Protocols (Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series)*. Prentice Hall PTR ; Special edition, June 3, 2004.

[2] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, "Ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing," *RFC 3561*, July 2003.

[3] D. Johnson, D. Maltz, and Y. Hu, "The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks (dsr)," *Internet-Draft*, 16 April 2003.

[4] T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized link state routing protocol (olsr)," *RFC3626*, October 2003.

[5] R. Ogier, F. Templin, and M. Lewis, "Topology broadcast based on reverse-path forwarding routing protocol (tbrf)," *Network Working Group, Request for Comments : 3684. http ://www.ietf.org/rfc/rfc3684.txt*, February 2004.

[6] I. Chakeres and C. Perkins, "Dynamic manet on-demand routing protocol," *IETF Internet Draft, draft-ietf-manet-dymo-12.txt*, February 2008.

[7] C. Yongtao, H. Chen, W. Jun, and Z. Chunlei, "A distributed algorithm for connecting dominating sets in wireless ad hoc networks communications," *2006 International Conference on Circuits and Systems Proceedings*, vol. 3, pp. 1472–1476, 2006.

[8] *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) 802.11, Institute of Electronic and Electrical Engineers (IEEE), 1999.*

[9] *Bluetooth Core Specification v2.0, Bluetooth Special Interest Group, http ://www.bluetooth.org.*

[10] *IEEE Draft Std 802.15.4, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), 2003.*

[11] S. Zhao, Z. Wu, A. Acharya, and D.Raychaudhuri, "Parma : A phy/mac aware routing metric for ad-hoc wireless networks with multi-rate radios," *Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, 2005 (WoWMoM 2005)*, pp. 286–292, 2005.

[12] F.Jaddi and B. Paillassa, "Mobility and density self-adaptative routing strategies in adhoc networks," *3rd IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems, LOCAN, Vancouver, Canada*, 9-12 October 2006.

[13] L. Qin and T. Kunz, "Mobility metrics to enable adaprtive roiting in manet," *IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, 2006 (WiMob'2006).*, 2006.

[14] S. Charoenpanyasak, B. Paillassa, and F. Jaddi, "Experimental study on tcp enhancement interest in ad hoc networks," *International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC 2007), Guadeloupe, 04-09, MAR-07, IEEE*, Mars 2007.

[15] V. Srivastava and M. Motani., "Cross-layer design : a survey and the road ahead," *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 12, pp. 112–119, December 2005.

[16] V. T. Raisinghani and S. Iyer., "Cross-layer design optimizations in wireless protocol stacks," *Computer Communications*, vol. 27(8), pp. 720–725, May 2004.

[17] W. Berrayana, H. Youssef, S. Lohier, and G.Pujolle, "Xlengine : une architecture cross-layer modele pour le support de la qos dans les reseaux sans fil ieee 802.11," *Journees Doctorales en Informatique et Reseaux - JDIR 2007*, January 2007.

[18] R. Winter, J. Schiller, N. Nikaein, and C. Bonnet, "Crosstalk : Cross-layer decision support based on global knowledge," *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, pp. 2–8, January 2006.

[19] V. T. Raisinghani and S. Lyer., "Eclair : An efficient cross layer architecture for wireless protocol stacks," *5th World Wireless Congress, San Francisco, USA, May 25-28 2004.*, May 2004.

[20] *Projet MobileMan : http ://cnd.iit.cnr.it/mobileMAN/.*

[21] R. Sasanka, J. Srinivasan, and W. Yuan, "The illinois grace project : Global resource adaptation through cooperation," *Proceedings of the Workshop on Self-Healing, Adaptive, and self-MANaged Systems (SHAMAN) (held in conjunction with the 16th Annual ACM International Conference on Supercomputing)*, pp. 144–155, June 2002.

[22] R. Knopp, N. Nikaein, C. Bonnet, H. Aiache, , V. Conan, S. Masson, G. Guibe, and C. L. Martret, "Overview of the widens architecture, a wireless ad hoc network for public safety," *1st IEEE International Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), Santa Clara, USA*, October 2004.

[23] S. Singh, M. Woo, and C. S. Raghavendra, "Power-aware routing in mobile ad hoc networks," *Proceedings of the Fourth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, October 1998.

[24] C.-K. Toh, H. Cobb, and D. A. Scott, "Performance evaluation of battery-life-aware routing schemes for wireless ad hoc networks," *IEEE International Conference on Communications*, vol. 9, pp. 2824–2829, 2001.

[25] J. J.-Y. Leu, M.-H. Tsai, T.-C. Chiang, and Y.-M. Huang, "Adaptive power-aware clustering and multicasting protocol for mobile ad-hoc networks," *Ubiquitous Intelligence and Computing*, vol. 4159, pp. 331–340, 2006.

[26] A. Misra and S. Banerjee, "Mrpc : Maximizing network lifetime for reliable routing in wireless environments," *WCNC 2002 - IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, March 2002.

[27] R. Dube, C. D. Rais, K.-Y. Wang, and S. K. Tripathi, "Signal stability-based adaptive routing (ssa) for ad-hoc mobile networks," *IEEE Personal Communications*, Febuary 1997.

[28] C.-K. Toh, "Associativity-based routing for ad-hoc mobile networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 4, no. 2, pp. 1–36, March 1997.

[29] G. Lim, K. Shin, S. Lee, H. Yoon, and J. S. Ma, "Link stability and route lifetime in ad-hoc wireless networks," *Proceedings of the International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW 02)*, 2002.

[30] R. J. Punnoose, P. V. Nikitin, J. Broch, and D. D. Stancil, "Optimizing wireless network protocols using real-time predictive propagation modeling," *Radio and Wireless Conference (RAWCON'99)*, 1999.

[31] A. Kamerman and L. Monteban, "Wavelan-ii : a high-performance wireless lan for the unlicensed band," *Bell Labs Technical Journal 2(3)*, pp. 118–133, 1997.

[32] Q. Pang, V. Leung, and S. Liew, "A rate adaptation algorithm for ieee 802.11 wlans based on mac-layer loss differentiation," *BroadNets. Proceedings of the Seconnd International Conference on Broadband Networks, Boston, MA*, pp. 659–667, October 2005.

[33] J. Kim, S. Kim, S. Choi, and D. Qiao, "Cara : Collision-aware rate adaptation for ieee 802.11 wlans," *Proceedings of INFOCOM, Barcelona, Spain*, pp. 146–157, April 2006.

[34] Y. P. Chen, J. Zhang, and A. N. Ngugi, "An efficient rate-adaptive mac for ieee 802.11," *Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks*, vol. 4864, pp. 233–243, 2007.

[35] G. Holland, N. Vaidya, and P. Bahl, "A rate-adaptive mac protocol for multi-hop wireless networks," *Proceedings of MobiCom, Rome, Italy*, pp. 236–251, July 2001.

[36] D. S. J. D. Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, "A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing," *Proceedings of the Ninth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '03), San Diego, California,*, September 2003.

[37] J. Macker and S. Corson, "Mobile ad-hoc networks (manet) : Routing protocol performance issues and evaluation considerations," *IETF RFC 2501*, January 1999.

[38] S.-J. Lee and M. Gerla, "Dynamic load-aware routing in ad-hoc networks," *Proc. IEEE ICC 01*, pp. 3206–3210, 2001.

[39] H. Hassanein and A. Zhou, "Routing with load balancing in wireless ad-hoc networks," *Proc. ACM MSWiM*, pp. 89–96, 2001.

[40] X. Wang, S. Tagashira, and S. Fujita, "Fdar : A load-balanced routing scheme for mobile ad-hoc networks," *Ad-Hoc, Mobile, and Wireless Networks, 6th International Conference, ADHOC-NOW 2007, Morelia, Mexico, September 24-26, 2007*, pp. 186–197, September 2007.

[41] S. Giannoulis, C. Katsanos, S. Koubias, and G. Papadopoulos, "A hybrid adaptive routing protocol for ad-hoc wireless networks," *Proceedings. 2004 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*, 2004.

[42] Z. Haas, M. Pearlman, and P. Samar, "The zone routing protocol (zrp) for ad-hoc networks," *draft-ietf-manet-zone-zrp-02.txt, IETF, http ://www.ietf.org*, July 2000.

[43] Z. Haas and M. R. Pearlman, "The performance of query control schemes for the zone routing protocol," *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. August 2001, pp. 427 – 438, 9, issue 4.

[44] X. Zhang and L. Jacob, "International journal of communication systems," *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMMUNICATION SYSTEMS*, vol. 16, issue 9, pp. 809 – 821, November 2003.

[45] M. BENZAID, P. MINET, and K. A. Agha, "Utilisation des techniques des reseaux ad-hoc pour l'optimisation de la mobilite dans les reseaux ip," *Thesis : UNIVERSITE PARIS XI UFR SCIENTIFIQUE D'ORSAY*, 2004.

[46] H. Seba, "Arpm : An adaptive routing protocol for manets," *Pervasive Services, 2006 ACS/IEEE International Conference*, 2006.

[47] S. Carson and J. Macker, "Mobile ad hoc networking (manet) : Routing protocol performance issues and evaluation considerations," *RFC n2501, IETF*, January 1999.

[48] *The Network simulator-ns-2, http ://www.isi.edu/nsnam/ns.*

[49] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies, "A survey of mobility models for ad hoc network research," *Wireless Communications F4 Mobile Computing (WCMC) : Special issue on Mobile Ad Hoc Networking : Research, Trends and Applications*, 2002.

[50] F. Bai, N. Sadagopan, and A. Helmy, "Important : a framework to systematically analyze the impact of mobility on performance of routing protocols for adhoc networks," *INFOCOM 2003*, April 2003.

[51] P. Johansson, T. Larsson, N. Hedman, B. Mielczarek, and M. Degermark :, "Scenario-based performance analysis of routing protocols for mobile ad-hoc networks," *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, Seattle, Washington, United States*, 1999.

[52] J. Boleng, W. Navidi, and T. Camp, "Metrics to enable adaptive protocols for mobile ad hoc networks," *Proceedings of the International Conference on Wireless Networks (ICWN 02)*, pp. 293–298, 2002.

[53] M. Sanchez and P. Manzoni, "A java based simulator for ad-hoc networks," *Future Generation Computer Systems*, vol. 17(5), pp. 573–583, 2001.

[54] X. Hong, M. Gerla, G. Pei, and C.-C. Chiang, "A group mobility model for ad hoc wireless networks," *ACM/ IEEE MSWiM*, August 1999.

[55] R. Fontana and S. Gunderson, "Ultra-wideband precision asset location system," *IEEE Conf. on Ultra Wideband Systems and Technologies*, pp. 147–150, 2002.

[56] C. Gentile and L. Klein-Berndt, "Robust location using system dynamics and motion constraints," *Proc. of IEEE International Conference on Communications, Paris*, 20-24 June 2004.

[57] J. Tsumochi, K. Masayama, H. Uehara, and M. Yokoyama, "Impact of mobility metric on routing protocols for mobile ad hoc networks," *Proc. IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM03)*, pp. 322–325, 2003.

[58] J. Y. L. Boudec and M. Vojnovic, "Perfect simulation and stationarity of a class of mobility models," *IEEE Infocom 2005, Miami, FL, 2005 (Infocom 2005 Best Paper Award)*, 2005.

[59] J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y. C. Hu, and J. Jetcheva, "A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols," *Mobicom 98, Dallas Texas*, pp. 25–30, 1988.

[60] B. Kwak, N. Song, and L. Miller, "A standard measure of mobility for evaluating mobile ad-hoc network performance," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E86-B, pp. 3236–3243, November 2003.

[61] F. Jaddi and B. Paillassa, *CSR une extension hierachique adatative du protocole de routage ad-hoc DSR*. PhD thesis, INPT-ENSEEIHT, 2006.

[62] P. Basu, N. Khan, and T. D. C. Little, "A mobility based metric for clustering in mobile ad hoc networks," *Proceedings of the 21st International Conference on Distributed Computing Systems ICDCSW, IEEE*, 2001.

[63] W. Su, S.-J. Lee, and M. Gerla, "Mobility prediction in wireless networks," *Proc. of IEEE MILCOM 2000*, October 2000.

[64] C. Gentile and R. V. Dyck, "Kinetic spanning trees for minimum-power routing in manets," *Vehicular Technology Conference, 2002. VTC Spring 2002. IEEE 55th*, vol. 3, pp. 1415–1419, 2002.

[65] A. McDonald and T. Znati, "A path availability model for wireless ad-hoc networks," *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, vol. 1, pp. 35–40, September 1999.

[66] A. B. McDonald and T. Znati, "A mobility-based framework for adaptive clustering in wireless ad hoc networks," *IEEE JSAC, 17(8)*, pp. 1466–1487, August 1999.

[67] C. Gentile, J. Haerri, and R. E. V. Dyck, "Kinetic minimum-power routing and clustering in mobile ad-hoc networks," *IEEE Proc. Vehicular Technology Conf. Fall 2002*, pp. 1328–1332, September 2002.

[68] J. Haerri, F. Filali, and C. Bonnet, "On the application of mobility predictions to multipoint relaying in manets : kinetic multipoint relays," *AINTEC 2005, Asian Internet Engineering Conference, Bangkok, Thailand*, December 2005.

[69] R. A. Santos, R. M. E. AMIEE, MIEEE, and N. L. Seed, "Using a short-term predictive algorithm to improve the communications speed in fast mobile ad-hoc networks," *London Communications Symposium(LCS2003), 8th - 9th September 2003*, September 2003.

[70] Y. C. Tseng, Y. F. Li, and Y. C. Chang, "On route lifetime in multihop mobile ad hoc networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 2, issue 4, pp. 366–376, Oct.-Dec 2003.

[71] A. Khelil, P. J. Marron, and K. Rothermel, "Contact-based mobility metrics for delay-tolerant ad hoc networking," *mascots, Proceedings of the 13th IEEE International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*, pp. 435–444, 2005.

[72] M. Ghassemian, M. Mostafavi, V. Friderikos, and A. H. Aghvami, "On mobility applied for ad hoc network protocol evaluation," *The 7th IFIP International Conference on Mobile and Wireless Communications Networks (MWCN 2005)*, Septembre 2005.

[73] S. Jiang, D. He, and J. Rao, "A prediction-based link availability estimation for mobile ad-hoc networks," *Proc. IEEE INFOCOM 2001, Alaska, USA*, April 2001.

[74] A. MacDonald and T. Znati, "Predicting node proximity in ad-hoc networks : A least overhead adaptive model for selecting stable routes"„" *Proceedings of ACM/MobiHoc2000, Boston, MA*, pp. 29–33, August 2000.

[75] Q. Tran, A. Dadej, and S.Perreau, "Characterizing mobility in ad hoc networks : A generalized approach," *Telecommunication Networks and Services Group Seminars 2005*, November 2005.

[76] M. Gerharz, C. de Waal, M. Frank, and P. Martini, "Link stability in mobile wireless ad hoc networks," *Proceedings of 27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN'02), Tampa, Florida*, November 2002.

[77] M. Gerharz, C. de Waal, P. Martini, and P. James, "Strategies for finding stable paths in mobile wireless ad hoc networks," *Proceedings of the 28th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN 03), Kongiswinter*, 2003.

[78] M. Ghassemian, V. Friderikos, and A. H. Aghvami, "A novel algorithm for supervisory control by monitoring mobility and traffic in wireless ad hoc networks," *Wireless World Research Forum 12 meeting*, November 2004.

[79] M. Ghassemian, V. Friderikos, and A. H. Aghvami, "A generic algorithm to improve the performance of proactive ad hoc mechanisms," *Proceedings of the Sixth IEEE International Symposium on World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WOWMOM)*, pp. 362–367, 2005.

[80] J. Francisco, "Um-olsr," tech. rep., University of Murcia, Spain, http ://masimum.dif.um.es/ ?Software :UM-OLSR, 2008.

[81] C. E. Perkins, E. M. Loyer, and S. R. Das, "Performance comparison of two on-demand routing protocols for ad hoc networks," *IEEE Personal Commun. Mag*, pp. 16–28, February 2001.

[82] L. Perrone, Y. Yuan, and D. Nicol, "Modeling and simulation best practices for wireless ad hoc networks," *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, vol. 1, pp. 685–693, 2003.

[83] P. Lassila, E. Hyytia, and H. Koskinen, "Connectivity properties of random waypoint mobility model for ad hoc networks," *The Fourth annual Mediterranean workshop on Ad Hoc Networks (Med-Hoc-Net 2005) (ile de Porquerolles, France)*, June 2005.

[84] T. Clausen, P. Jacquet, and L. Viennot, "Comparative study of routing protocols for mobile ad-hoc networks.," *Proceeding of The First Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop. MindPass Center for Distributed Systems, Aalborg University and Project Hipercom, INRIA Rocquencourt, The First Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop*, September 2002.

[85] M. Benzaid, P. Minet, K. A. Agha, C. Adjih, and G. Allard, "Integration of mobile-ip and olsr for a universal mobility," *Wireless Networks journal (Winet) Special Issue on Ad-hoc Networking*, 2004.

[86] E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs," *Numerische Mathematik*, vol. 1, pp. 269–271, 1959.

[87] A. Qayyum, A. Laouiti, and L. Viennot, "Multipoint relaying technique for flooding broadcast messages in mobile wireless networks," *HICSS : Hawaii International Conference On System Sciences, Hawai, USA*, January 2002.

[88] T. Clausen, P. Minet, and C. Perkins, "Multipoint relay flooding for manets," *draft-perkins-manet-mprf-00.txt*, February 2004.

[89] A. Qayyum, L. Viennot, and A. Laouiti, "Multipoint relaying : An efficient technique for flooding in mobile wireless networks," *Research Report 3898, INRIA, http ://www.inria.fr*, February 2000.

[90] A. Qayyum, *Analysis and evaluation of channel access schemes and routing protocols for wireless networks.* PhD thesis, Universite de PARIS-SUD XI, 2000.

[91] L. Viennot, "Complexity results on election of multipoint relays in wireless networks," *Tech. Rep. 3584, INRIA, http ://www.inria.fr*, December 1998.

[92] L. Anis, *Unicast et multicast dans les reseaux ad hoc sans fil.* PhD thesis, Universite de Versailles Saint Quentin en Yvelines, July 2002.

[93] D. Gantsou, P. Sondi, and S. Hanafi, "Revisiting multipoint relay selection in the optimized link state routing protocol," *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*, vol. 2, no.1, pp. 4–15, 2009.

[94] W. Navidi and T. Camp, "Stationary distributions for the random waypoint mobility model," *IEEE Trans. Mob. Comput*, vol. 3, pp. 99–108, 2004.

[95] S. Obilisetty, A. Jasti, and R. Pendse, "Link stability based enhancements to olsr (ls-olsr)," *Vehicular Technology Conference, VTC-2005-Fall. IEEE 62nd, Sept. 25-28*, pp. 306–310, 2005.

[96] U. of Bonn, "Bonnmotion : A mobility scenario generation and analysis tool." http ://iv.cs.uni-bonn.de/wg/cs/applications/bonnmotion/, 2009. Acces au 10 Juin 2009.

# Publications

## Articles de revues internationales

- Cholatip Yawut, Béatrice Paillassa, Riadh Dhaou. Mobility Metrics Evaluation for Self-Adaptive Protocols. Dans : Journal of Networks, Academy Publisher, Finland, Vol. Issue 1 N. ISSN : 1796-2056, Volume 3, p. 53-64, Janvier 2008.

## Conférences et workshops internationaux

- Cholatip Yawut, Béatrice Paillassa, Riadh Dhaou. Mobility versus Density metric for OLSR enhancement. Dans : Asian Internet Engineering Conference (AINTEC 2007), Phuket, Thailand, 27-29 Nov 2007, Vol. 4866, Springer, LNCS, Novembre 2007.
- Cholatip Yawut, Béatrice Paillassa, Riadh Dhaou. On Metrics for Mobility Oriented Self Adaptive Protocols. Dans : International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC 2007), Guadeloupe,, 04-09 Mars 2007, IEEE Computer Society, Mars 2007 (selected paper).

## Conférences sans actes publiés

- Cholatip Yawut. Amélioration de la performance d'OLSR en utilisant la durée du lien. Dans : Colloque des Doctorants - EDIT'07, Toulouse, 24-25 Mai 2007.

## Rapports

- Riadh Dhaou, Cholatip Yawut, Béatrice Paillassa, André-Luc Beylot, Monique Becker, Dominique Verchere, Eugene Borcoci, Zhili Sun, Amine Houyou. Intra- and inter-domain routing in the NGI. Rapport de contrat, NoE EURONGI : D.JRA1.3.3, IRIT, Juin 2005.

# Résumé :

Les études protocolaires sur les réseaux multi-sauts mobiles proposent d'améliorer la performance du réseau en liant le comportement des protocoles à sa dynamique d'évolution. Le protocole s'adapte à l'état du réseau grâce à un ensemble de métriques. Ainsi pour les protocoles de routage il s'agit de trouver des chemins tout en considérant l'état énergétique des nœuds, la bande passante des liens, la qualité de service, ou encore la dynamique de la topologie qui est liée à la qualité des liens sans fil et à la mobilité des éléments du réseau. Le travail présenté traite de l'adaptation à la mobilité dans les protocoles de routage et s'intéresse aux métriques de mobilité.

Dans une première étape nous analysons le processus d'adaptation en en dégageant les caractéristiques, les contraintes et l'intérêt, et étudions qualitativement les métriques de mobilité. Nous examinons différents travaux de recherche ayant pour objet la mobilité et ses métriques dont nous proposons une taxinomie originale. Nous mettons en évidence l'intérêt des métriques obtenues par mesure locale et de voisinage.

Dans une deuxième étape, nous évaluons par simulation les métriques. L'objectif est de déterminer une *"meilleure"* métrique de mobilité, c'est-à-dire celle qui apportera le plus de gain de performance à une adaptation protocolaire. Le postulat est que plus la métrique influe sur les performances d'un protocole, plus il est intéressant que le protocole adapte son comportement en fonction de sa valeur. L'analyse de corrélation entre performances et métriques, sur plusieurs protocoles de routage, ne permet pas de mettre en avant une meilleure métrique qui soit indépendante du contexte, à savoir de la densité ou du modèle de mobilité. Nous montrons néanmoins l'intérêt de la métrique durée de liaison.

Finalement, nous développons deux applications à partir des métriques sélectionnées par l'analyse. Ce sont la densité, exprimée par le nombre de voisins, ainsi que la mobilité, exprimée par la durée de liaison pour la première application, et par le nombre d'erreurs de route pour la seconde application. La première application met en place un choix adaptatif des éléments MPR (Multi-Point Relay) dans le protocole de routage Optimized Link State Routing (OLSR), la deuxième développe une élection adaptative des chefs de clusters et un changement de mode adaptatif (avec ou sans structure) pour le protocole Cluster Source Routing (CSR). Pour les deux applications plusieurs stratégies d'adaptations sont considérées ; le meilleur résultat est obtenu dans les deux cas par la stratégie d'adaptation à la mobilité en plus de la densité. Ce travail se prolonge par l'étude de validation des résultats en rapport au modèle de mobilité. Nous en déduisons une méthode pour appliquer, selon les conditions de mobilité et de densité, des adaptations.



**MOT CLES :** réseaux ad hoc, routage, OLSR, MPR, CSR, chef de cluster et serveur, adaptation, mobilité, densité