

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE DU PROGRAMME DE MAÎTRISE EN
MATHÉMATIQUES ET INFORMATIQUE APPLIQUÉES

PAR
ABDELHAMID ZEBDI

DZ-MAODV : NOUVEAU PROTOCOLE DE ROUTAGE MULTICAST POUR
LES RÉSEAUX ADHOC MOBILES BASÉ SUR LES ZONES DENSES

AVRIL 2006

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

DÉDICACE

*Je dédie ce travail à ma grand-mère
À mes parents
À mes frères et sœurs
À tous mes ami (es)*

REMERCIEMENTS

Je voudrais avant tout remercier l'Unique pour tous ses bienfaits trop souvent négligés.

Il est important ensuite de remercier ardemment toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire. Les premières pensées se dirigent vers mon directeur de recherche Boucif Amar Bensaber que je remercie pour sa patience et ses encouragements indéfectibles.

Il serait ingrat de ne pas mentionner ma grande reconnaissance envers les membres du jury d'évaluation pour leur sincérité.

Je remercie également tous les professeurs, les étudiants et les membres du personnel du département des mathématiques et d'informatique appliquées pour leur amitié sincère.

Je remercie particulièrement Mme Chantal Lessard, pour sa disponibilité permanente et son aide assidue.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	10
2	LA COMMUNICATION DE GROUPE	14
2.1	DÉFINITIONS	14
2.1.1	<i>Conversations</i>	14
2.1.2	<i>Description des entités</i>	15
3	GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES	16
3.1	LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES	16
3.1.1	<i>Le concept</i>	16
3.1.2	<i>Modélisation d'un réseau Ad hoc Mobile</i>	17
3.1.3	<i>Utilité et applications</i>	18
3.1.4	<i>Gestion et transfert de l'information</i>	19
3.2	LE MODÈLE DES ENVIRONNEMENTS MOBILES	21
3.3	CARACTÉRISTIQUES DES RÉSEAUX AD HOC MOBILES	23
4	THÉORIE DU ROUTAGE	24
4.1	DÉFINITION DU ROUTAGE	24
4.2	LE ROUTAGE DANS LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES	25
4.2.1	<i>Introduction</i>	25
4.3	LES PROTOCOLES DE ROUTAGE POUR LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES	26
4.3.1	<i>Classification</i>	26
4.4	LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES ET LE MULTICAST	28
4.5	LES PROTOCOLES DE ROUTAGE MULTICAST DANS LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES	30
4.6	LA PROBLÉMATIQUE DU ROUTAGE DANS LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES	31
4.7	L'ÉVALUATION DES PROTOCOLES DE ROUTAGE	33
4.8	LA CONCEPTION DES STRATÉGIES DE ROUTAGE	34
5	ETUDE COMPARATIVE DES ARCHITECTURES DE ROUTAGE DANS LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES	35
5.1	CARACTÉRISTIQUES DES ARCHITECTURES DE TYPE ARBRE	36
5.1.1	<i>Avantages des architectures de type Arbre</i>	36
5.1.2	<i>Inconvénients des architectures de type Arbre</i>	36
5.2	CARACTÉRISTIQUES DES ARCHITECTURES DE TYPE MAILLE	37
5.2.1	<i>Avantages des architectures de type maille</i>	37
5.2.2	<i>Inconvénients des architectures de type maille</i>	38
5.2.3	<i>Critères de comparaison des protocoles</i>	39
5.3	ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE MAODV & ODMRP	39
5.3.1	<i>Avantages MAODV</i>	39
5.3.2	<i>Avantages ODMRP</i>	40
5.3.3	<i>Comparaison qualitative</i>	40
5.3.4	<i>La mobilité</i>	41
6	SYNTHÈSE DE L'ETAT DE L'ART	41
6.1	INTRODUCTION	41
6.2	CLASSIFICATION DES PROTOCOLES DE ROUTAGE AU SEIN DES RÉSEAUX AD HOC MOBILES	42
6.3	PROBLÉMATIQUE DU ROUTAGE	43
6.4	OBJECTIFS	44
6.5	APPROCHE THEORIQUE	45
6.6	CONCLUSION	46
7	AVANT PROPOS	48

8	ARCHITECTURE PROPOSÉE.....	49
8.1	TECHNIQUE DE DÉCOUPAGE DU RÉSEAU	49
8.2	PROCESSUS D'IDENTIFICATION DES ZONES DENSES	49
8.2.1	<i>Technique d'identification des zones denses.....</i>	50
8.3	PROCESSUS DE CONSTRUCTION DU RÉSEAU	53
8.4	ALGORITHME D'ÉLECTION D'UN LEADER	55
8.4.1	<i>Format des paquets LER et LAA.....</i>	56
9	TECHNIQUE DE ROUTAGE AVEC LES ZONES DENSES	60
9.1	LE ROUTAGE DES PAQUETS AU SEIN DU RÉSEAU	60
9.1.1	<i>Limitation des protocoles actuels.....</i>	60
9.2	SCHÉMA GÉNÉRAL DU ROUTAGE	62
9.2.1	<i>Définition du protocole MAODV</i>	62
9.2.2	<i>Schéma de routage du protocole MAODV.....</i>	62
10	ARCHITECTURE DU PROTOCOLE DZ-MAODV.....	65
10.1	GESTION DES ZONES DENSES	66
10.1.1	<i>La gestion intra zone dense</i>	67
10.1.2	<i>La gestion inter zone dense</i>	71
11	DESCRIPTION DES SIMULATIONS.....	73
11.1	ARCHITECTURE DE SIMULATION.....	74
11.2	PROCÉDURE DE CALCUL DES DISTANCES ET DES COORDONNÉES	74
11.3	STRUCTURE DES NŒUDS, DES ZONES ET DES PAQUETS.....	76
11.3.1	<i>Structure des nœuds</i>	76
11.3.2	<i>Structure des zones.....</i>	77
11.3.3	<i>Structure des paquets</i>	78
11.4	PROCÉDURE DE GESTION DE LA MOBILITÉ	81
11.4.1	<i>Fonction de répartition des nœuds.....</i>	81
11.4.2	<i>Fonction de répartition des directions</i>	82
11.5	GESTION DU PROCESSUS DE SIMULATION	83
11.6	PARAMÈTRES DE SIMULATION	84
12	RESULTATS ET INTERPRETATIONS DES SIMULATIONS.....	87
12.1	MÉTRIQUES ET RATIOS	87
12.2	GRAPHES ET ANALYSES	88
12.2.1	<i>Le ratio de livraison de paquets</i>	88
12.2.2	<i>Le ratio du nombre de paquets de données transmis par paquet de données reçu</i>	91
12.2.3	<i>Le ratio du nombre de paquets de contrôle transmis par paquet de données reçu</i>	94
12.2.4	<i>Le ratio du nombre de paquets de contrôle et de paquets de données transmis par paquet de données reçu.....</i>	97
12.2.5	<i>Le total de paquets de contrôle dans le réseau</i>	100
12.2.6	<i>Le temps moyen de transfert de données.....</i>	102
13	CONCLUSION.....	105
14	PERSPECTIVES.....	108
15	BIBLIOGRAPHIE.....	109

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1: SCHÉMA DES COMMUNICATIONS DE GROUPE	15
FIGURE 2: MODÉLISATION D'UN RÉSEAU AD HOC	17
FIGURE 3: LE CHANGEMENT DE LA TOPOLOGIE DES RÉSEAUX AD HOC	18
FIGURE 4 : LE MÉCANISME D'INONDATION (BROADCAST)	20
FIGURE 5: SCHÉMA DE DÉCOMPOSITION DES RÉSEAUX MOBILES	21
FIGURE 6: LE MODÈLE DES RÉSEAUX MOBILES AVEC INFRASTRUCTURE	22
FIGURE 7: SCHÉMA DE ROUTAGE ENTRE UNE SOURCE ET UNE DESTINATION	24
FIGURE 8: CLASSIFICATION DES PROTOCOLES	27
FIGURE 9: SCHÉMA D'UN SIMPLE RÉSEAU AD HOC CONSTITUÉ DE TROIS UNITÉS MOBILES	32
FIGURE 10 : ARCHITECTURE DU RÉSEAU AD HOC MOBILE EN MODE ARBRE	36
FIGURE 11: ARCHITECTURE DE RÉSEAU AD HOC MOBILE EN MODE MAILLE	38
FIGURE 12: SCHÉMA ILLUSTRATIF DU PREMIER CRITÈRE DE CONSTRUCTION D'UNE ZONE DENSE	50
FIGURE 13: SCHÉMA ILLUSTRATIF DU DEUXIÈME CRITÈRE DE CONSTRUCTION D'UNE ZONE DENSE	51
FIGURE 14: SCHÉMA ILLUSTRATIF DU TROISIÈME CRITÈRE DE CONSTRUCTION D'UNE ZONE DENSE	52
FIGURE 15: SCHÉMA ILLUSTRATIF DE LA MATRICE DE LIENS POUR L'ENSEMBLE DES NŒUDS DU RÉSEAU	54
FIGURE 16: STRUCTURE DU PAQUET LER POUR L'ÉLECTION D'UN LEADER	56
FIGURE 17: STRUCTURE DU PAQUET LAA POUR LA CONFIRMATION DU NOUVEAU LEADER	57
FIGURE 18: SCHÉMA D'ÉLECTION D'UN LEADER AU SEIN D'UN GROUPE	58
FIGURE 19: SCHÉMA DU ROUTAGE AVEC LES ZONES DENSES	61
FIGURE 20: SCHÉMA DE DÉCOUVERTE DE ROUTE AVEC LE PROTOCOLE DE ROUTAGE MAODV	64
FIGURE 21: SCHÉMA DE TRANSITION D'ÉTATS D'UN NŒUD DANS LE RÉSEAU	65
FIGURE 22: MISE À JOUR DE LA TABLE DE ROUTAGE DU LEADER D'UNE ZONE DENSE	68
FIGURE 23: L'ORGANIGRAMME D'ÉLECTION D'UN NŒUD LEADER AU SEIN D'UNE ZONE DENSE	70
FIGURE 24: SCHÉMA DE LA SURFACE DE SIMULATION	74
FIGURE 25: SCHÉMA DE CALCUL DES DISTANCES PAR RAPPORT AUX AXES DE LA SURFACE	75
FIGURE 26: SCHÉMA DES PROPRIÉTÉS D'UN NŒUD MOBILE	77
FIGURE 27: DÉCOUPAGE DE LA SURFACE DE SIMULATION EN ZONES AVEC SES PROPRIÉTÉS	78
FIGURE 28: STRUCTURE DU PAQUET RREQ ENTRE (LEADER, NŒUDS HORS DE SA ZONE)	79
FIGURE 29: STRUCTURE DU PAQUET RREP ENTRE (LEADER, NŒUDS HORS DE SA ZONE)	80
FIGURE 30: RATIO DE LIVRAISON DE PAQUETS DE DONNÉES POUR UNE VITESSE DE NŒUDS DE 20 M/S	89
FIGURE 31: RATIO DE LIVRAISON DE PAQUETS DE DONNÉES POUR UNE VITESSE DE NŒUDS DE 15 M/S	89
FIGURE 32: RATIO DE LIVRAISON DE PAQUETS DE DONNÉES POUR UNE VITESSE DE NŒUDS DE 10 M/S	90
FIGURE 33: RATIO DE LIVRAISON DE PAQUETS DE DONNÉES POUR UNE VITESSE DE NŒUDS DE 5 M/S	90
FIGURE 34: LE NOMBRE DE PAQUETS DE DONNÉES TRANSMIS PAR PAQUET DE DONNÉES REÇU AVEC UNE VITESSE DE NŒUDS DE 20 M/S	92

FIGURE 35: LE NOMBRE DE PAQUETS DE DONNÉES TRANSMIS PAR PAQUET DE DONNÉES REÇU AVEC UNE VITESSE DE NŒUDS DE 15 M/S.....	92
FIGURE 36: LE NOMBRE DE PAQUETS DE DONNÉES TRANSMIS PAR PAQUET DE DONNÉES REÇU AVEC UNE VITESSE DE NŒUDS DE 10 M/S.....	93
FIGURE 37: LE NOMBRE DE PAQUETS DE DONNÉES TRANSMIS PAR PAQUET DE DONNÉES REÇU AVEC UNE VITESSE DE NŒUDS DE 5 M/S.....	93
FIGURE 38: LE NOMBRE DE PAQUETS DE CONTRÔLE TRANSMIS PAR PAQUET DE DONNÉES REÇU AVEC UNE VITESSE DE NŒUDS DE 20 M/S.....	94
FIGURE 39: LE NOMBRE DE PAQUETS DE CONTRÔLE TRANSMIS PAR PAQUET DE DONNÉES REÇU AVEC UNE VITESSE DE NŒUDS DE 15 M/S.....	95
FIGURE 40: LE NOMBRE DE PAQUETS DE CONTRÔLE TRANSMIS PAR PAQUET DE DONNÉES REÇU AVEC UNE VITESSE DE NŒUDS DE 10 M/S.....	95
FIGURE 41: LE NOMBRE DE PAQUETS DE CONTRÔLE TRANSMIS PAR PAQUET DE DONNÉES REÇU AVEC UNE VITESSE DE NŒUDS DE 5 M/S.....	96
FIGURE 42: LE NOMBRE DE PAQUETS DE CONTRÔLE ET DE PAQUETS DE DONNÉES TRANSMIS PAR PAQUET DE DONNÉES REÇU AVEC UNE VITESSE DE NŒUDS DE 20 M/S.....	97
FIGURE 43: LE NOMBRE DE PAQUETS DE CONTRÔLE ET DE PAQUETS DE DONNÉES TRANSMIS PAR PAQUET DE DONNÉES REÇU AVEC UNE VITESSE DE NŒUDS DE 15 M/S.....	98
FIGURE 44: LE NOMBRE DE PAQUETS DE CONTRÔLE ET DE PAQUETS DE DONNÉES TRANSMIS PAR PAQUET DE DONNÉES REÇU AVEC UNE VITESSE DE NŒUDS DE 10 M/S.....	98
FIGURE 45: LE NOMBRE DE PAQUETS DE CONTRÔLE ET DE PAQUETS DE DONNÉES TRANSMIS PAR PAQUET DE DONNÉES REÇU AVEC UNE VITESSE DE NŒUDS DE 5 M/S.....	99
FIGURE 46: LE NOMBRE TOTAL DE PAQUETS DE CONTRÔLE AVEC UNE VITESSE DE NŒUDS DE 20 M/S.....	100
FIGURE 47: LE NOMBRE TOTAL DE PAQUETS DE CONTRÔLE AVEC UNE VITESSE DE NŒUDS DE 15 M/S.....	101
FIGURE 48: LE NOMBRE TOTAL DE PAQUETS DE CONTRÔLE AVEC UNE VITESSE DE NŒUDS DE 10 M/S.....	101
FIGURE 49: LE NOMBRE TOTAL DE PAQUETS DE CONTRÔLE AVEC UNE VITESSE DE NŒUDS DE 5 M/S.....	102
FIGURE 50: LE TEMPS MOYEN DE TRANSFERT D'UN PAQUET DE DONNÉES AVEC UNE VITESSE DE NŒUDS DE 20 M/S.	103

TABLE DES TABLEAUX

TABLEAU 1: TABLEAU COMPARATIF DES ARCHITECTURES DE RÉSEAUX (ARBRE, MAILLE).....	45
TABLEAU 2: TABLEAU DES CHAMPS DU PAQUET LER POUR L'ÉLECTION D'UN LEADER.	57
TABLEAU 3: TABLEAU DES CHAMPS DU PAQUET LAA POUR LA CONFIRMATION DU NOUVEAU LEADER.....	57
TABLEAU 4: TABLEAU DES VALEURS (PUISANCE DU SIGNAL, DISTANCE) ENTRE LES NŒUDS DU RÉSEAU.	59
TABLEAU 5: TABLEAU DES MOYENNES DES COMPOSANTES DES VECTEURS $R(i)$	59
TABLEAU 6: TABLEAU DES RÔLES RELATIFS AUX ÉTATS TRANSITOIRES DES NŒUDS.....	66
TABLEAU 7: TABLEAU DES CHAMPS DU PAQUET RREQ ENTRE (LEADER, NŒUDS HORS DE SA ZONE).....	79
TABLEAU 8: TABLEAU DES CHAMPS DU PAQUET RREP ENTRE (LEADER, NŒUDS HORS DE SA ZONE).....	80

Partie I :

INTRODUCTION

1 INTRODUCTION

L'évolution rapide de la technologie de télécommunication sans fil, a permis la manipulation de l'information à travers des unités de calcul portables. Ces unités ont des caractéristiques particulières (une faible capacité de stockage, une source d'énergie autonome...) et accèdent au réseau à travers une interface de communication sans fil.

Ce nouvel environnement résultant appelé (Mobile) permet aux unités de calcul une libre mobilité et ne pose aucune restriction sur la localisation des usagers.

La mobilité (ou le nomadisme) est le nouveau mode de communication utilisé. Elle engendre de nouvelles caractéristiques propres à l'environnement mobile: une fréquente déconnexion, un débit de communication modeste, et des sources d'énergie limitées. C'est pourquoi les contraintes de l'environnement mobile nous obligent à changer la vision classique des problèmes liés aux systèmes distribués. En effet, les processus distribués doivent tenir compte de l'apparition de la nouvelle entité: "*unité mobile*" avec toutes ses propriétés (mode de communication, ressources, méthode d'acheminement des données «routage » ...etc.).

Les réseaux ad hoc se distinguent des autres formes de réseaux sans fil par une absence totale d'infrastructure fixe. Un nombre quelconque de mobiles équipés de cartes d'interface radio et des couches protocolaires adéquates suffisent pour former un réseau ad hoc.

Les débits atteints aujourd'hui sur ce type de réseaux rendent possible le transfert de flux multimédia soumis à de fortes contraintes [18]. Dès lors, il est légitime de chercher à fournir aux applications des garanties sur le délai, sur les taux de pertes ou encore sur la bande passante. Les

solutions utilisées dans le monde filaire sont inadaptées aux contraintes liées à l'utilisation du médium radio et à l'absence d'administration centralisée [4].

En effet, les ondes hertziennes se propagent moins vite que la lumière. En conséquence, les réseaux radio sont moins rapides que les réseaux filaires utilisant des fibres optiques.

De plus, la propagation des ondes radio est très sensible à l'environnement. Une onde radio peut être fortement atténuée par un obstacle ou un signal de bruit. Le médium radio ⁽¹⁾ est donc moins fiable que son homologue filaire. Plusieurs signaux peuvent aussi entrer en collision et il n'est pas possible d'isoler des parties du réseau au moyen de commutateurs [23]. En conséquence, la bande passante est partagée entre les mobiles proches les uns des autres.

Le fonctionnement ad hoc ajoute d'autres contraintes à celles-ci. D'une part, l'absence totale d'administration centralisée rend complexe et coûteuse l'utilisation des techniques de multiplexage des communications utilisées dans les réseaux avec point d'accès (FDMA, TDMA, etc.) [2]. En effet, pour utiliser ce type de mécanismes, il faut concevoir un protocole distribué permettant aux nœuds de se partager les fréquences, les codes ou les unités de temps.

D'autre part, la mobilité des nœuds d'un tel réseau provoque des changements fréquents de topologie. Le routage dans de tels réseaux étant aussi distribué, les routeurs sont les mobiles et un transfert de données peut aisément être interrompu par le départ d'un nœud sur la route utilisée.

C'est pourquoi le problème de routage est loin d'être évident dans les réseaux mobiles, où c'est difficile de localiser la destination à un instant donné. Le degré de difficulté du problème augmente dans le cas où tous les sites peuvent se déplacer et d'une façon aléatoire, ce qui est le cas pour les réseaux ad hoc mobiles. En conséquence, une nouvelle approche de routage s'avère nécessaire à travers une nouvelle architecture décentralisée qui aura comme but de réduire la charge du réseau et faciliter la gestion du routage en diminuant la consommation en terme

¹ Technique utilisée pour gérer l'accès au réseau et la détection des conflits

d'énergie et de bande passante pour chaque élément du réseau. La plupart des algorithmes de routage du monde filaire reposent sur la connaissance d'informations précises sur l'état du réseau, considèrent que les pertes sont nuisibles, que la bande passante disponible est large ou encore que la topologie du réseau est globalement stable. Plusieurs travaux ont été réalisés mais il est encore trop tôt pour que l'un d'entre eux s'impose comme étant la solution pour un protocole de routage au sein des réseaux ad hoc.

Notre travail présent une alternative d'application de routage Multicast dans les réseaux Ad hoc mobiles. Le présent mémoire est constitué de cinq parties : une introduction qui décrit d'une façon générale les réseaux ad hoc mobiles. Ensuite une deuxième partie incluant un état de l'art qui illustre les caractéristiques des réseaux Ad hoc mobiles et les problèmes de mise en œuvre d'application Multicast dans ce type de réseau, en focalisant sur l'aspect le plus important soit les techniques d'acheminements de données (routage) d'une source émettrice vers un groupe Multicast. La troisième partie est une proposition d'un nouveau protocole de routage Multicast basé sur les zones denses (espaces à fortes concentrations de nœuds Multicast). La quatrième partie présente le processus d'expérimentation à travers des simulations et des résultats qui démontrent les performances de notre nouveau protocole par rapport à un protocole déjà existant (MAODV). Finalement, le mémoire se termine par une brève conclusion qui résume notre travail de recherche.

Partie II : ÉTAT DE L'ART

2 LA COMMUNICATION DE GROUPE

De tout temps, les hommes ont communiqué entre eux : par le geste, la parole, la gravure, l'écriture. Depuis, les moyens de communications sont restés toujours le point de mesure principal relatif au développement d'une société.

Alors que l'évolution technologique a connu son sommet par la création d'Internet et sa propagation à travers les quatre coins du monde, ce dernier joue un rôle efficace dans la distribution rapide et gratuite de l'information. Il manquait toutefois un mode de communication à grande échelle, c'est à dire à un très grand nombre de destinataires au même temps. C'est dans cette veine que la diffusion (*Broadcast*) a été mise sur pied. Ce type de transmission diffuse des informations à toutes les adresses d'un réseau.

Mais un réel problème se posait lorsque les destinataires sont un groupe de récepteurs bien définis de l'ensemble des membres du réseau, donc comment on peut atteindre seulement cet ensemble parmi les usagers de tout le réseau ? C'est dans cette optique que les travaux de recherches sur la communication de groupe, *le Multicast*, ont commencée, vers 1994 [30].

2.1 DÉFINITIONS

2.1.1 Conversations

Une conversation est un transfert d'information entre deux participants d'un groupe actif.

Il existe quatre types de conversations entre des participants (figure 1), que ce soit les composants de base d'une association de groupe ou dans une sous-association du groupe [22].

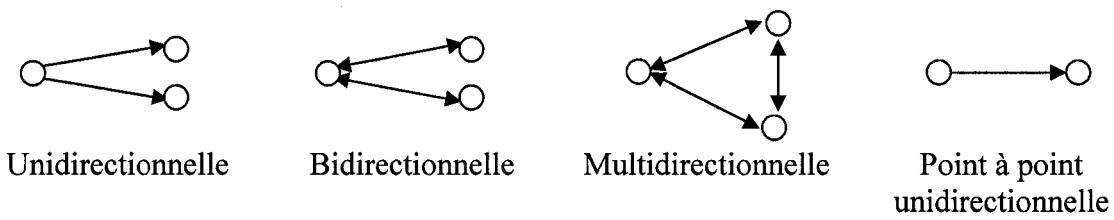


Figure 1: Schéma des communications de groupe.

2.1.2 Description des entités

Les sessions Multicast sont créées par un initiateur, une entité responsable de :

- Débuter la session.
- Déterminer les paramètres suivants :
 - Le nombre d'abonnés possible.
 - Les détails sur les connexions.
 - La qualité de service.
 - La sécurité.

Souvent, l'initiateur est l'émetteur. L'émetteur est l'entité qui émet les paquets vers les destinataires.

Les abonnés sont les entités (ordinateurs, applications) qui se sont joints au groupe et qui vont recevoir les données.

Les superviseurs (réparateurs, serveurs) sont des intermédiaires entre l'initiateur et les abonnés qui sont responsables de certaines opérations lors du réacheminement des informations erronées.

3 GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES

Les réseaux mobiles ad hoc⁽²⁾ sont une collection d'entités mobiles⁽³⁾ interconnectées par une technologie sans fil formant un réseau temporaire sans l'aide de toute administration ou de tout support fixe. Ces réseaux s'organisent automatiquement de façon à être déployables rapidement et qui doivent pouvoir s'adapter aux conditions de propagation (canal variable, interférences,...), aux trafics et aux différents mouvements pouvant intervenir au sein des nœuds mobiles [19].

Les réseaux mobiles présentent une architecture originale. En effet, l'atténuation des signaux avec la distance fait que le médium peut être réutilisé simultanément en plusieurs endroits différents sans pour autant provoquer de collisions. On appelle ce phénomène la réutilisation spatiale, il sert de base aux concepts de réseau cellulaire.

La contrepartie de la réutilisation spatiale est que certaines paires de stations peuvent être hors de portée mutuelle, ce qui nécessite l'emploi d'un routage interne par des stations intermédiaires.

3.1 LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES

3.1.1 Le concept

Le concept des réseaux ad hoc mobiles tente d'étendre les notions de la mobilité à toutes les composantes de l'environnement. Ici, contrairement aux réseaux basés sur la communication cellulaire, aucune administration centralisée n'est disponible, ce sont les nœuds mobiles eux-mêmes qui forment, d'une manière ad hoc, une infrastructure du réseau. Aucune supposition ou

² Un groupe de travail nommé MANet a été créé au sein de l'IETF (*Internet Engineering Task Force*), www.ietf.org

³ Ils sont aussi communément nommés MANet pour Mobile Ad Hoc Network.

limitation n'est faite sur la taille du réseau ad hoc, le réseau peut contenir des centaines ou des milliers d'unités mobiles [26].

Les réseaux ad hoc sont idéals pour les applications caractérisées par une absence (ou la non-fiabilité) d'une infrastructure préexistante, tel que les applications militaires et les autres applications de tactique comme les opérations de secours (incendies, tremblement de terre..) et les missions d'exploration.

3.1.2 Modélisation d'un réseau Ad hoc Mobile

Un réseau mobile ad hoc, appelé généralement MANET (*Mobile Ad hoc NETwork*), consiste en une grande population, relativement dense, d'unités mobiles qui se déplacent dans un territoire quelconque et dont le seul moyen de communication est l'utilisation des interfaces sans fil, sans l'aide d'une infrastructure préexistante ou administration centralisée. Un réseau ad hoc peut être modéliser par un graphe $G_t = (V_t, E_t)$ où V_t représente l'ensemble des nœuds (i.e. les unités ou les hôtes mobiles) du réseau et E_t modélise l'ensemble les connections qui existent entre ces nœuds.

Si $e = (u, v)$, cela veut dire que les nœuds u et v sont en mesure de communiquer directement à l'instant t . La figure 2 représente un réseau Ad hoc de 10 unités mobiles sous forme d'un graphe:

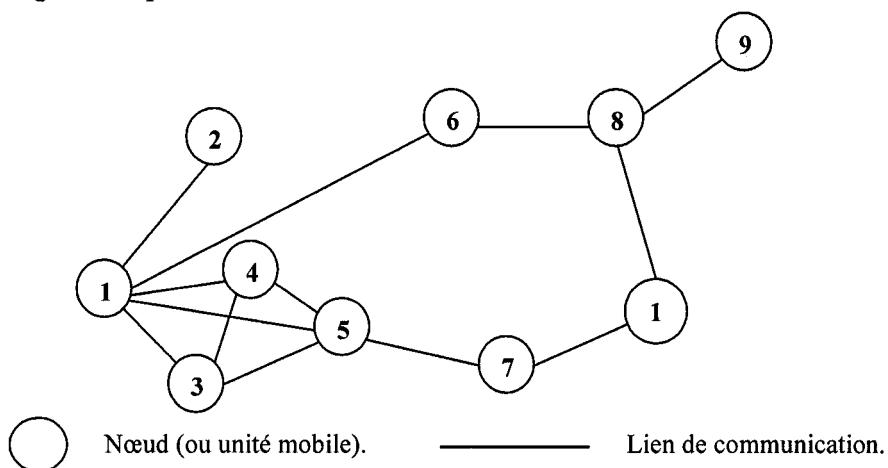


Figure 2: Modélisation d'un réseau Ad hoc.

La topologie du réseau peut changer à tout moment, elle est donc dynamique et imprévisible ce qui fait que la déconnexion des unités soit très fréquente.

Exemple :

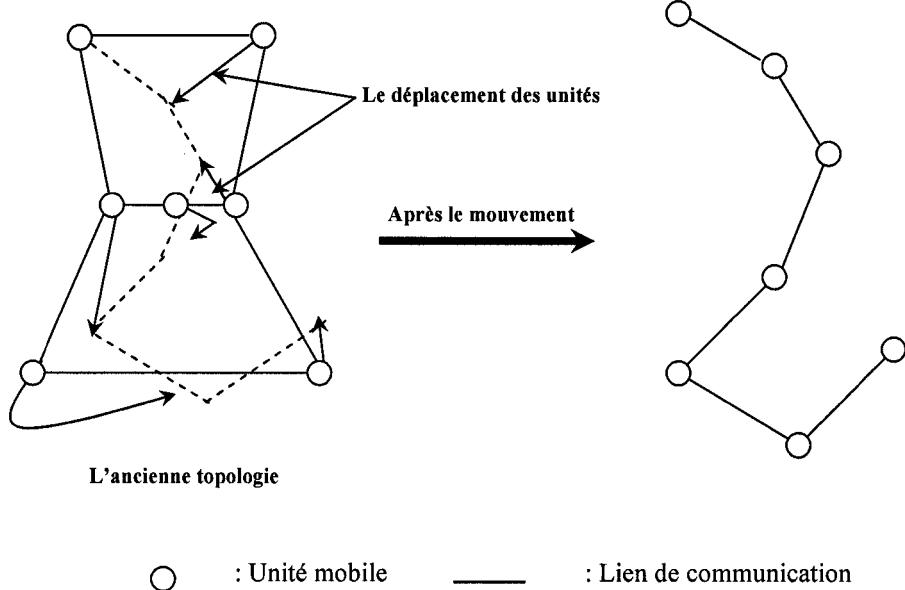


Figure 3: Le changement de la topologie des réseaux Ad hoc.

3.1.3 Utilité et applications

De très nombreux systèmes utilisent déjà ces techniques relatives à la technologie sans fil, et connaissent une très forte expansion à l'heure actuelle (notamment la radio téléphonie mobile) mais requièrent une importante infrastructure logistique et matérielle fixe.

Les réseaux ad hoc sont idéals pour les applications caractérisées par une absence (ou la non fiabilité) d'une infrastructure préexistante, telles que :

- Les applications militaires.
- Les autres applications de tactique comme les opérations de secours (incendies, tremblement de terre) et les missions d'exploration.
- Les bases de données parallèles.
- L'enseignement à distance, les systèmes de fichiers répartis.

- La simulation distribuée interactive et plus simplement les applications de calcul distribué ou *Métacomputing*.

Remarque:

De façon générale, les réseaux ad hoc sont utilisés dans toute application où le déploiement d'une infrastructure réseau filaire est trop contraignant, soit parce que difficile à mettre en place, soit parce que la durée d'installation du réseau ne justifie pas un tel investissement en terme de câblage et de configuration.

3.1.4 Gestion et transfert de l'information

3.1.4.1 La notion de "Multihoping"

Les stratégies de routage utilisées dans les réseaux Ad hoc sont caractérisées par le fait de pouvoir acheminer les paquets de données sans l'aide des stations de base utilisées dans la communication cellulaire (*Base Station, Mobile Station*).

Dans le modèle cellulaire, la communication entre deux nœuds est faite en utilisant les stations de base (*Base Station*), par conséquent aucune unité mobile n'est utilisée comme routeur intermédiaire, le modèle cellulaire est dit alors "Single Hop" (i.e. le nombre de routeurs mobiles intermédiaires est nul). La contrepartie de ce modèle est le modèle de communication sans infrastructure. Dans ce modèle plusieurs nœuds peuvent participer au routage c'est pour cela que l'environnement des réseaux Ad hoc est dit "Multihop" (i.e. le nombre de stations mobiles qui peuvent être utilisées comme routeurs intermédiaires peut dépasser un).

3.1.4.2 L'inondation

L'inondation ou la diffusion pure (*Broadcast*), consiste à faire propager un paquet (de données ou de contrôle) dans le réseau entier. Un nœud qui initie l'inondation envoie le paquet à tous ses

voisins directs. De même, si un nœud quelconque du réseau reçoit le paquet, il le rediffuse à tous ses voisins.

Ce comportement se répète jusqu'à ce que le paquet atteigne tous les nœuds du réseau (Figure 4).

Notons que les nœuds peuvent être amenés à appliquer, durant l'inondation, certains traitements de contrôle, dans le but d'éviter certains problèmes, tels que le bouclage et la duplication des messages.

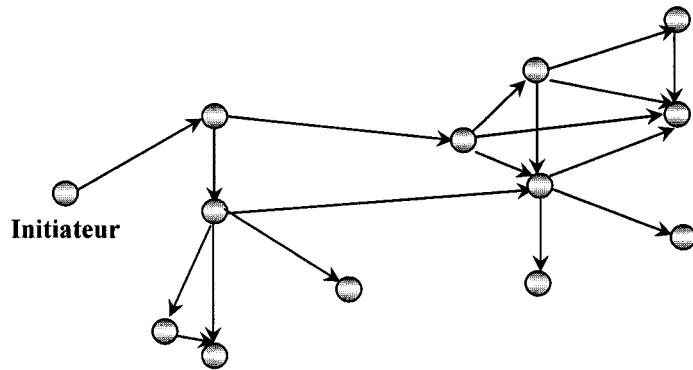


Figure 4 : Le mécanisme d'inondation (Broadcast).

Le mécanisme d'inondation est utilisé généralement dans la première phase du routage, plus exactement dans la procédure de découverte des routes, et cela dans le cas où le nœud source ne connaît pas la localisation exacte de la destination. Un paquet de requête de route est inondé par la source afin qu'il atteigne la station destination. Il faut noter que l'inondation est très coûteuse surtout dans le cas où le réseau est volumineux (latence, surcharge des messages...etc.), c'est pour cela que les protocoles de routage essaient de minimiser au maximum la propagation des paquets inondés en rajoutant d'autres paramètres de diffusion.

3.1.4.3 L'info Ad-Hoc

Les réseaux Ad hoc (*Mesh Networks ou NAN (Neighborhood Area Networks)*) pour réseaux de voisinage) dessinent-ils le futur des transmissions sans fil ?

Les réseaux Ad hoc, sont des réseaux radioélectriques qui se déploient facilement voire automatiquement entre personnes souhaitant communiquer entre elles, sans qu'il y ait besoin de développer toute une infrastructure.

Fonctionnant un peu sur le principe du *Peer to Peer*, il suffit que deux terminaux soient à proximité pour qu'ils puissent communiquer entre eux si nécessaire. Plusieurs techniques pour la constitution de ce genre de réseaux sont à l'étude actuellement dans de nombreux laboratoires de recherche.

3.2 LE MODÈLE DES ENVIRONNEMENTS MOBILES

Un environnement mobile est un système composé de sites mobiles et qui permet à ses utilisateurs d'accéder à l'information indépendamment de leurs positions géographiques. Les réseaux mobiles ou sans fil, peuvent être classés en deux classes : les réseaux avec infrastructure et les réseaux sans infrastructure (Figure 5).

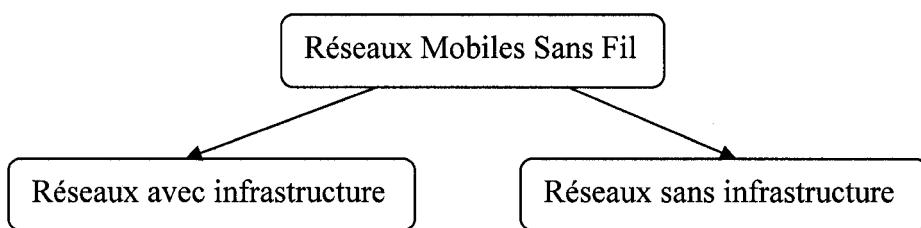


Figure 5: Schéma de décomposition des réseaux mobiles.

Le modèle de système intégrant des sites mobiles et qui a tendance à se généraliser, est composé de deux ensembles d'entités distinctes:

1. Les "sites fixes" du réseau filaire (*Wired Network*).
2. Les "sites mobiles" (*Wireless Network*).

Certains sites fixes, appelés stations de base (SB) sont munis d'une interface de communication sans fil pour la communication directe avec les sites mobiles localisés dans une zone géographique limitée, appelée cellule comme le montre la figure 6 :

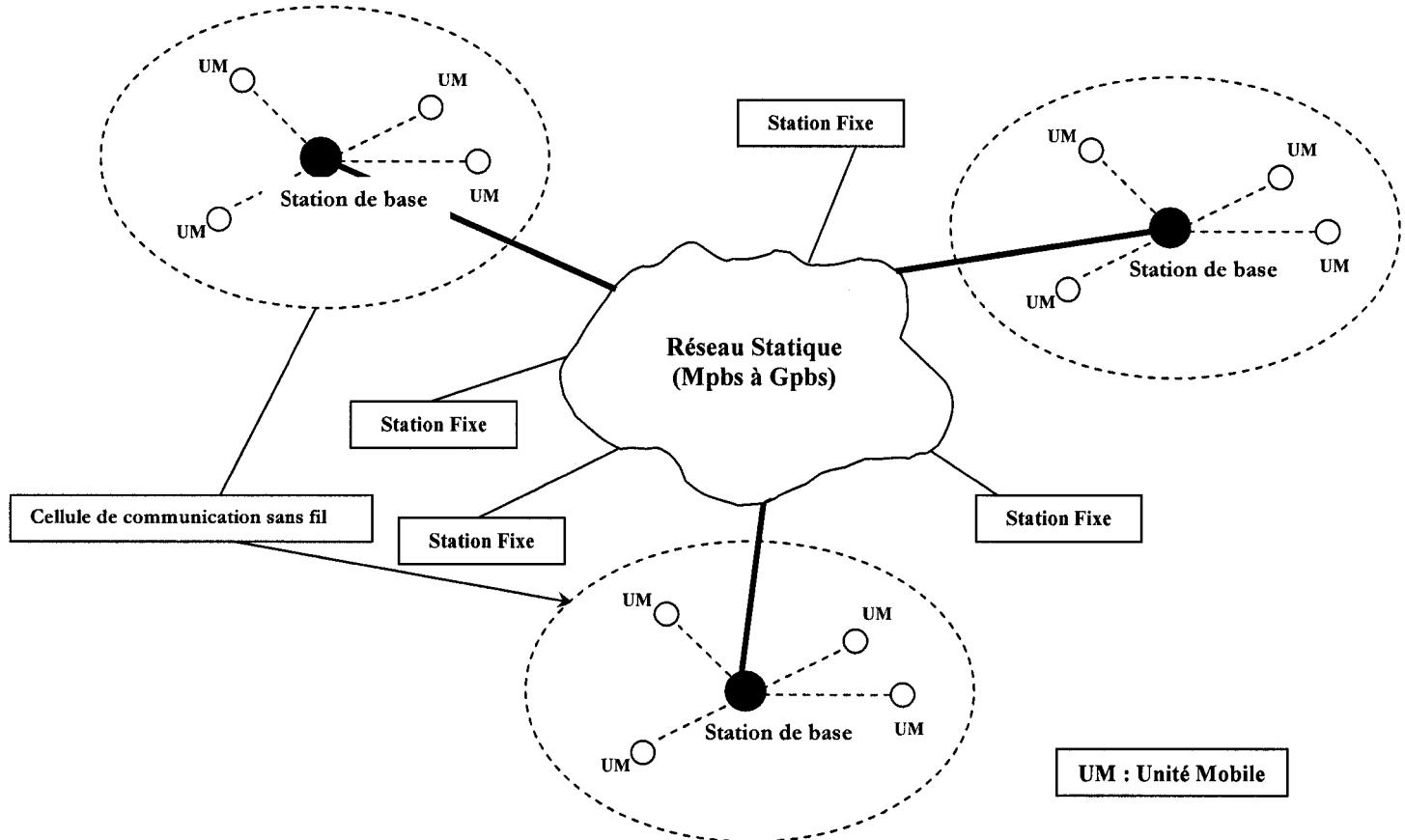


Figure 6: Le modèle des réseaux mobiles avec infrastructure.

- A chaque station de base correspond une cellule à partir de laquelle des unités mobiles peuvent émettre et recevoir des messages. Alors que les sites fixes sont interconnectés entre eux à travers un réseau de communication filaire.
- Une unité mobile ne peut être, à un instant donné, directement connectée qu'à une seule station de base. Elle peut communiquer avec les autres sites à travers la station à laquelle elle est directement rattachée.

- Dans le modèle de réseau sans infrastructure fixe préexistante l'entité "site fixe" n'existe pas, tous les sites du réseau sont mobiles et se communiquent d'une manière directe en utilisant leurs interfaces de communication sans fil.
- L'absence de l'infrastructure ou du réseau filaire composé des stations de base, oblige les unités mobiles à se comporter comme des routeurs qui participent à la découverte et la maintenance des chemins pour les autres hôtes du réseau.

3.3 CARACTÉRISTIQUES DES RÉSEAUX AD HOC MOBILES

En conclusion, les réseaux Ad hoc mobiles sont caractérisés par ce qui suit:

Une topologie dynamique: Les unités mobiles du réseau, se déplacent d'une façon libre et arbitraire. Par conséquent, la topologie du réseau peut changer, à des instants imprévisibles, d'une manière rapide et aléatoire. Les liens de la topologie peuvent être unis ou bidirectionnels.

Une bande passante limitée: Un des caractéristiques primordiales des réseaux basés sur la communication sans fil est l'utilisation d'un médium de communication partagé. Ce partage fait que la bande passante réservée à un hôte est modeste.

Des contraintes d'énergie: Les hôtes mobiles sont alimentés par des sources d'énergie autonomes comme les batteries ou les autres sources consommables. Le paramètre d'énergie doit être pris en considération dans tout contrôle fait par le système.

Une sécurité physique limitée: Les réseaux mobiles ad hoc sont plus touchés par le paramètre de sécurité, que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui font que le contrôle des données transférées doit être minimisé.

L'absence d'infrastructure: Les réseaux ad hoc se distinguent des autres réseaux mobiles par la propriété d'absence d'infrastructures préexistante et de tout genre d'administration centralisée. Les

hôtes mobiles sont responsables d'établir et de maintenir la connectivité du réseau d'une manière continue.

4 THÉORIE DU ROUTAGE

4.1 DÉFINITION DU ROUTAGE

Le routage est une méthode d'acheminement des informations à la bonne destination à travers un réseau de connexion donné. Le problème de routage consiste à déterminer un acheminement optimal des paquets à travers le réseau au sens d'un certain critère de performance. Il s'agit de trouver l'investissement au moindre coût en capacités nominales et de réserves qui assure le routage du trafic nominal et qui garantit sa survabilité en cas de n'importe quelle coupure d'arc ou panne de nœud.

Exemple :

Si on suppose que les coûts des liens sont identiques, le chemin indiqué dans la figure 7 est le chemin optimal reliant la station source et la station destination. Une bonne stratégie de routage utilise ce chemin dans le transfert des données entre les deux stations.

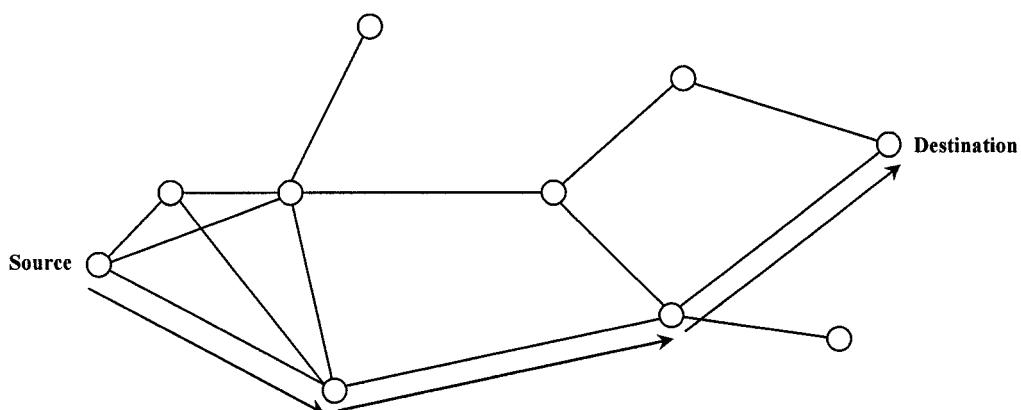


Figure 7: Schéma de routage entre une source et une destination.

Comme l'architecture d'un réseau ad hoc sans fil est caractérisée par une absence d'infrastructure fixe préexistante, à l'inverse des réseaux de télécommunication classiques. Ce dernier doit s'organiser automatiquement de façon à être déployable rapidement et pouvoir s'adapter aux conditions de propagation, au trafic et aux différents mouvements pouvant intervenir au sein des nœuds.

Dans le but d'assurer la connectivité d'un tel type de réseau, chaque nœud est susceptible d'être mis à contribution pour participer au routage et pour retransmettre les paquets d'un nœud qui ne sont pas en mesure d'atteindre leur destination; tout nœud joue ainsi le rôle de station et de routeur.

Finalement, chaque nœud participe donc à un protocole de routage qui lui permet de découvrir les chemins existants, afin d'atteindre les autres nœuds du réseau. Le fait que la taille d'un réseau ad hoc peut être énorme, implique que la gestion de routage de l'environnement doit être complètement différente des approches utilisées dans le routage classique (Réseaux Filaires). Le problème qui se pose dans le contexte des réseaux ad hoc est l'adaptation de la méthode d'acheminement utilisée avec le grand nombre d'unités existant dans un environnement caractérisé par de modestes capacités de calcul et de sauvegarde.

4.2 LE ROUTAGE DANS LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES

4.2.1 Introduction

Les réseaux mobiles présentent une architecture originale. En effet, l'atténuation des signaux avec la distance, fait que le médium peut être réutilisé simultanément en plusieurs endroits différents sans pour autant provoquer de collisions, ce phénomène est appelé la réutilisation spatiale (*Spatial Reuse*) [6] et il sert de base au concept de la communication cellulaire.

La contrepartie de la réutilisation spatiale est que certaines paires de nœuds peuvent alors être hors de portée mutuelle, ce qui nécessite l'emploi d'un routage interne par des nœuds intermédiaires.

La gestion de ce routage consiste à établir une sorte d'architecture globale où l'on doit tenir compte de la mobilité des nœuds et de la versatilité du médium physique. Pour parvenir à des protocoles efficaces d'accès, de communication, d'allocation de ressources et de routage, ces nouvelles approches doivent faire appel à des algorithmes de pointe utilisant des heuristiques.

Le problème de routage est loin d'être évident dans les réseaux ad hoc, où c'est difficile de localiser la destination à un instant donné, la conception des stratégies de routages doit tenir compte de tous les facteurs et limitations physiques imposés par l'environnement dans le but de concevoir un protocole de routage qui ne dégrade pas les performances du système.

4.3 LES PROTOCOLES DE ROUTAGE POUR LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES

4.3.1 Classification

Suivant la manière de création et de maintenance des routes lors de l'acheminement des données, les protocoles de routage peuvent être séparés en deux catégories (Figure 8), les **protocoles proactifs** et les **protocoles réactifs**. Les protocoles proactifs établissent les routes à l'avance en se basant sur l'échange périodique des tables de routage, alors que les protocoles réactifs cherchent les routes à la demande (voir : Annexe de classification des protocoles de routage dans les réseaux ad hoc mobiles (*Page 112*)).

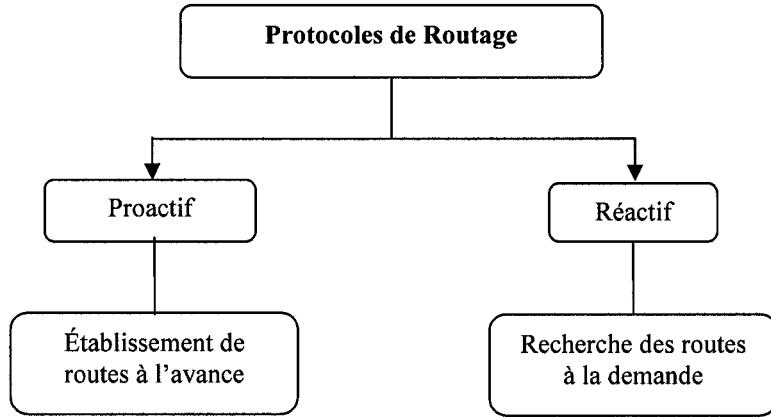


Figure 8: Classification des protocoles.

4.3.1.1 *Les Protocoles de Routage Proactifs*

Les protocoles de routage Proactifs pour les réseaux mobiles Ad hoc, sont basés sur la même philosophie des protocoles de routage utilisés dans les réseaux filaires conventionnels. Les deux principales méthodes utilisées sont :

- La méthode Etat de Lien (*Link State*).
- La méthode du Vecteur de Distance (*Distance Vector*).

Les deux méthodes exigent une mise à jour périodique des données de routage qui doit être diffusée par les différents nœuds de routage du réseau.

4.3.1.2 *Les Protocoles de Routage Réactifs*

Les protocoles de routage appartenant à cette catégorie, créent et maintiennent les routes selon les besoins. Lorsque le réseau a besoin d'une route, une procédure de découverte globale de routes est lancée, et cela dans le but d'obtenir une information spécifique, inconnue au préalable.

Remarque :

A l'heure actuelle, il est un peu plus difficile de conserver ce découpage manichéen et une troisième classe est apparue, celle des protocoles hybrides ou hiérarchiques. On peut même envisager de définir une quatrième classe, celle des protocoles géographiques.

Il semble a priori normal d'avoir différents types de protocole étant donnée que les scénarios d'usage des réseaux ad hoc mobiles sont aussi très variées et exploitées sur une grande échelle.

4.4 LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES ET LE MULTICAST

Actuellement, une demande croissante provient des applications faisant appel à des protocoles de communication multipoints (*Multicast*) au sein desquelles un flot de données doit être distribué vers diverses destinations de façon efficace. Ce type de communication met en jeu plus de deux participants qui désirent échanger des informations et s'accompagne généralement de critères de qualité de service à respecter (par opposition aux communications point à point (*Unicast*) où seul deux entités interviennent).

Afin de supporter ce genre d'applications, les réseaux offrent généralement le concept de groupe de multidiffusion, de sorte qu'un émetteur puisse considérer l'ensemble de ses destinations comme une seule entité. Il incombe alors au protocole de multidiffusion de distribuer les données à tous les membres du groupe considéré.

Les applications ayant recours à des communications Multicast couvrent un très large spectre, incluant les bases de données parallèles, l'enseignement à distance, les systèmes de fichiers répartis, la simulation distribuée interactive et plus simplement les applications de calcul distribué ou *Métacomputing*.

Comme nous allons nous intéresser à la faisabilité de telles applications dans les réseaux sans fil, deux fonctionnalités nous paraissent primordiales :

- Permettre des communications Multicast.
- Assurer certains critères de qualité de service (*QoS*) et de sécurité.

Jusqu'à présent, les systèmes de communication construits soit sur un modèle OSI, soit autour de l'architecture Internet, l'ont été dans le but de supporter des services point à point. Les besoins des applications Multicast sont intrinsèquement différents: les groupes sont le plus souvent dynamiques, tout participant peut joindre/quitter un groupe et de telles opérations doivent être simples, sans effet de bord sur les autres participants. Les protocoles existants (IP, UDP) peuvent suffire aux applications ne requérant pas des communications Multicast fiables mais les applications émergeantes (simulation distribuée interactive, conférence multimédia) ne peuvent se satisfaire de ce type de communication. C'est pourquoi, il est particulièrement intéressant d'étudier les problèmes de communications Multicast dans les réseaux Ad hoc mobiles.

Les communications Multicast s'accompagnent de plus, des problèmes de qualité de service suivants:

1. Contrôle de dépendances temporelles (délais de transmission, ordre, synchronisation).
2. Mise en œuvre de paramètres de contrôle de session pour chaque participant.

Les concepts émergeants de qualité de service ont peu été étudiés sur ce type de réseaux. Même si on voit apparaître des champs réservés pour des critères de qualité de service dans les nouveaux protocoles, les techniques permettant de les utiliser sont encore émergeantes à cause de l'absence d'aspect quantitatif pour les mesurer.

De ce point de vue, il y a une certaine similitude entre la notion d'appartenance d'un nœud à un réseau ad hoc et la notion d'appartenance d'un hôte à un groupe Multicast.

Un réseau ad hoc est un réseau *peer-to-peer*, i.e., il permet à deux nœuds qui sont chacun à portée radio l'un de l'autre (conditions appropriées de propagation radio) de rentrer en communication directement.

Si les conditions de propagation radio ne permettent pas d'établir un lien direct entre deux nœuds MANet (éloignement trop important entre l'émetteur et le récepteur), la mise en œuvre d'un routage multi-sauts est nécessaire afin d'acheminer les paquets de données jusqu'à leur destination finale.

4.5 LES PROTOCOLES DE ROUTAGE MULTICAST DANS LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES

L'étude des protocoles de communication Multicast est intéressante tant du point de vue théorique que pratique. Au sein de la révolution qui s'opère dans les réseaux, et notamment tout ce qui concerne les communications de groupe, il semble intéressant d'étudier deux caractéristiques :

- **L'extensibilité** : la capacité à gérer un grand nombre d'utilisateurs avec un coût par utilisateur faible.
- **L'individualité** : la capacité à prendre en compte les besoins différents des utilisateurs du fait de leur non-homogénéité.

Bien que ces deux aspects soient bénéfiques et louables, ils sont souvent incompatibles et nécessitent un compromis. Il est donc intéressant d'étudier comment mettre en œuvre ce service au sein d'un réseau en utilisant soit des communications point-à-point soit des communications Multicast. Une multidiffusion tend à accroître l'extensibilité tandis que des communications point-à-point accroissent l'efficacité individuelle. Il est donc intéressant d'étudier la mise en

œuvre de protocoles de multidiffusion au sein des réseaux qui permettent d'obtenir un bon compromis entre efficacité (individualité) et extensibilité.

4.6 LA PROBLÉMATIQUE DU ROUTAGE DANS LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES

Les défis majeurs rencontrés dans ce type de réseau sont le calcul des routes et la mise en œuvre des algorithmes de routage de façon totalement distribuée du fait qu'il n'y a aucune entité centralisée au sein de cet environnement dynamique.

On ne peut donc pas compter, comme dans les réseaux cellulaires classiques, sur la présence des nombreux points fixes que sont les BS (*Base Station*), HLR (*Home Location Register*), VLR (*Visitor Location Register*) [1]. Cette absence de tout point de coordination implique la mise en œuvre d'algorithmes de routage robustes. D'où la gestion de ce routage consiste à établir une sorte d'architecture flexible où l'on doit tenir compte de la mobilité des stations et de la versatilité du médium physique. Pour parvenir à des protocoles efficaces d'accès, de communication, d'allocation de ressources et de routage, ces nouvelles approches doivent faire appel à des algorithmes de pointe.

Dans la pratique, il est impossible qu'un hôte puisse garder les informations de routage concernant tous les autres nœuds, dans le cas où le réseau serait volumineux. Certains protocoles, comme le DSR [20] et le AODV [3], utilisent la sauvegarde des données de routage concernant une destination donnée (dans le cas où la source ne possède pas déjà de telles informations).

Cependant, ces protocoles ne spécifient pas les destinations que les nœuds doivent garder leurs données de routage. Le problème ne se pose pas dans le cas de réseaux de petites tailles, car l'inondation (la diffusion pure) faite dans ces réseaux n'est pas coûteuse. Par contre dans un réseau volumineux, le manque de données de routage concernant les destinations peut impliquer

une diffusion énorme dans le réseau, et cela si on considère seulement la phase de découverte de routes. Le trafic causé par la diffusion, dans ce cas, est rajouté au trafic déjà existant dans le réseau ce qui peut dégrader considérablement les performances de transmission du système caractérisé principalement par une faible bande passante.

Dans le cas où le noeud destination se trouve dans la portée de communication du noeud source le routage devient évident et aucun protocole de routage n'est initié. Malheureusement, ce cas est généralement rare dans les réseaux Ad hoc. Une station source peut avoir besoin de transférer des données à une autre station qui ne se trouve pas dans sa portée de communication (Figure 9).

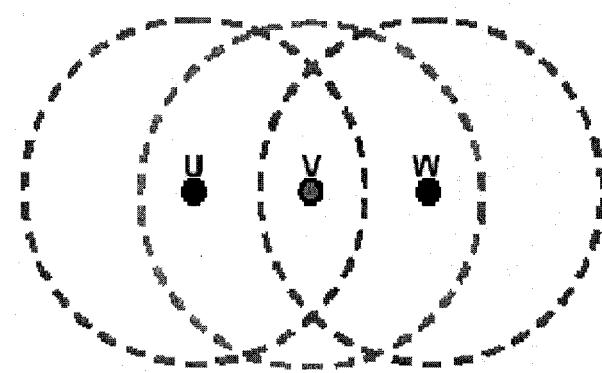


Figure 9: Schéma d'un simple réseau Ad hoc constitué de trois unités mobiles.

Remarque:

L'unité mobile W n'est pas dans la portée de communication de l'unité U (indiquée par le cercle d'origine U) et vice versa. Dans le cas où l'unité U veut transférer des paquets à W, elle doit utiliser les services de l'unité V dans l'envoi des paquets, puisque l'unité V contient dans sa portée de communication les unités U et W.

Dans la pratique, le problème de routage est plus compliqué à cause de la non-uniformité de la transmission sans fil et de la possibilité du déplacement imprévisible de tous les nœuds concernés par le routage. En conséquent, toute conception de protocole de routage doit étudier les problèmes suivants :

- Minimisation de la charge du réseau.
- Support fiable pour les communications multipoints.
- Garantir un routage optimal.
- Assurer une bonne qualité de service avec un facteur de sécurité maximal en réduisant le temps de latence ainsi que le nombre de nœuds intermédiaires.

4.7 L'ÉVALUATION DES PROTOCOLES DE ROUTAGE

Les protocoles de routage doivent être évalués afin de mesurer les performances de la stratégie utilisée et de tester sa fiabilité. L'utilisation d'un réseau Ad hoc réel dans une évaluation est difficile et coûteuse, en outre de telles évaluations ne donnent généralement pas des résultats significatifs. Le réseau réel n'offre pas la souplesse de varier les différents paramètres de l'environnement et pose en plus le problème d'extraction de résultats, c'est pour cela que la majorité des travaux d'évaluation de performances utilisent le principe de simulation vu les avantages qu'il offre.

En effet, la simulation permet de tester les protocoles sous une variété de conditions. Durant ces simulations on doit varier les différents facteurs de l'environnement tels que le nombre d'unités mobiles, l'ensemble des unités en mouvement, les vitesses des mouvements, le territoire du réseau et la distribution des unités dans ce territoire. Initialement, chaque unité est placée

aléatoirement dans l'espace de simulation. Chaque unité se fait attribuée une vitesse et une direction vers laquelle elle se déplace de façon répétitive jusqu'à la fin de la simulation.

Les paramètres mesurés dans une évaluation dépendent de la stratégie de routage appliquée, notre simulation doit être en mesure d'évaluer :

- Le contrôle utilisé dans le mécanisme de mise à jour de routage.
- Les délais moyens du transfert des paquets.
- Le nombre moyen de nœuds traversés par les paquets de données.

4.8 LA CONCEPTION DES STRATÉGIES DE ROUTAGE

L'étude et la mise en œuvre d'algorithmes de routage pour assurer la connexion des réseaux Ad-hoc au sens classique du terme (tout sommet peut atteindre tout les autres), est un problème complexe. L'environnement est dynamique et évolue donc au cours du temps, la topologie du réseau peut changer fréquemment. Il semble donc important que toute conception de protocole de routage devrait étudier les problèmes suivants :

- 1- La minimisation de la charge du réseau :** l'optimisation des ressources du réseau renferme deux autres sous problèmes qui sont l'évitement des boucles de routage, et l'empêchement de la concentration du trafic autour de certains nœuds ou liens.
- 2- Offrir un support pour pouvoir effectuer des communications multipoints fiables :** le fait que les chemins utilisés pour router les paquets de données puissent évoluer, ne doit pas avoir d'incidence sur le bon acheminement des données. L'élimination d'un lien, pour cause de panne ou pour cause de mobilité devrait, idéalement, augmenter le moins possible les temps de latence.

- 3- **Assurer un routage optimal** : la stratégie de routage doit créer des chemins optimaux et pouvoir prendre en compte différentes métriques de coûts (bande passante, nombre de liens, ressources du réseau, délais de bout en bout,...etc.). Si la construction des chemins optimaux est un problème dur, la maintenance de tels chemins peut devenir encore plus complexe, la stratégie de routage doit assurer une maintenance efficace de routes avec le moindre coût possible.
- 4- **Le temps de latence** : la qualité des temps de latence et de chemins doit augmenter dans le cas où la connectivité du réseau augmente.

5 ETUDE COMPARATIVE DES ARCHITECTURES DE ROUTAGE DANS LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES

Notre plan de travail débutera par une analyse comparative détaillée qui va porter sur l'étude des points fort et des points faibles de chacun des protocoles de communication Multicast Ad hoc pour essayer de combiner en un seul modèle une solution qui peu être fiable et avantageuse par rapport aux problèmes recensés avec un maximum de compromis entre les différents facteurs susceptibles d'influencer le bon fonctionnement du routage. Ensuite, on pourra considérer qu'on possède au moins deux protocoles de chaque classe (Arbre, Maille) qui vont jouer le rôle d'une référence expérimentale durant nos simulations pour le nouveau protocole. Enfin, à la proposition de notre nouveau protocole doté d'un support stochastique, on pourra entamer l'ensemble des simulations avec une diversité de contexte (nombre de nœuds, vitesse de mobilité) en comparant toujours nos apports par rapport à ses deux protocoles pour tester l'efficacité et la robustesse de notre solution.

5.1 CARACTÉRISTIQUES DES ARCHITECTURES DE TYPE ARBRE

Un réseau Multicast peut être représenté par un arbre, où le nœud source sera la racine et l'ensemble des nœuds mobiles du réseau représente les feuilles et les nœuds de chaque branche de cet arbre (Figure 10). L'utilité de cette schématisation et que chaque nœud du réseau aura un lien unique vers son nœud voisin. MAODV [28] et AMRIS [12] sont deux protocoles de routage Multicast de type Arbre.

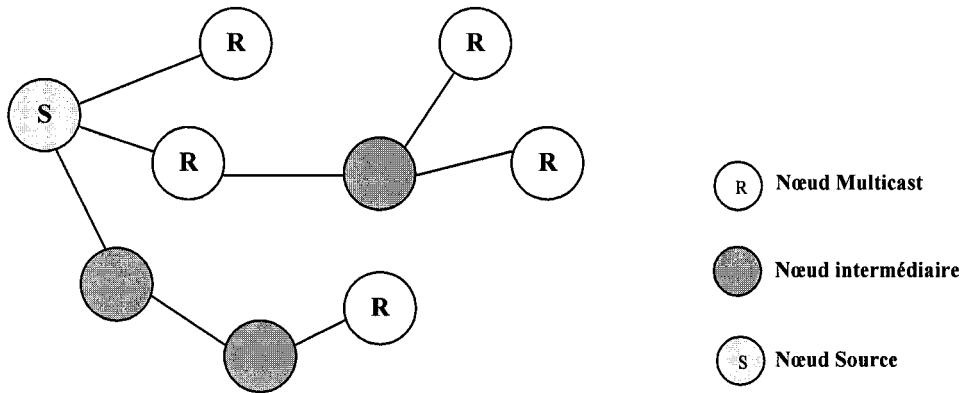


Figure 10 : Architecture du réseau Ad hoc mobile en mode Arbre.

5.1.1 Avantages des architectures de type Arbre

- Minimiser le nombre de paquets à transmettre ainsi que le nombre de paquets de contrôle.
- Une meilleure façon d'exploiter la bande passante.
- Une implication d'un nombre restreint de nœuds intermédiaires.
- Une économie d'énergie pour les nœuds du groupe.

5.1.2 Inconvénients des architectures de type Arbre

- Le problème de mobilité des nœuds avec une variation de vitesse.

- Une rupture d'un lien implique une re-génération de l'arbre tout entier. (Contrainte de mise sur une grande échelle : i.e. problème de « *scalabilité* »).
- Maintenir à jour l'état de chaque branche d'arbre pour chaque changement.
- Quand il y a des sources multiples, les arbres partagés ou les arbres séparés de Multicast sont nécessaires.
- Dans les arbres partagés, l'optimalité de chemin est perdue.
- Dans un groupe Multicast séparé, chaque nœud doit maintenir des entrées pour chaque source (problèmes de mise à l'échelle).

5.2 CARACTÉRISTIQUES DES ARCHITECTURES DE TYPE MAILLE

Contrairement à une architecture de type Arbre, l'architecture maillée est un graphe fortement connexe où pour chaque source il doit exister plus qu'un chemin vers une destination (Figure 11). Cette approche bénéficie de l'avantage de la connectivité du réseau pour procurer plusieurs chemins entre les nœuds, il existe plusieurs protocole de routage adoptant ce schéma de représentation comme : CAMP [16], ODMRP [17].

5.2.1 Avantages des architectures de type maille

- Fournir une multitude de chemins entre une source et une destination afin de diminuer le risque d'échecs des liens et, en conséquence, faire face aux problèmes de la mobilité.
- Dans les scénarios de Multicast en multiples sources, les structures maillées fournissent des chemins plus optimaux que des architectures en Arbres [10].

5.2.2 Inconvénients des architectures de type maille

- Employez plusieurs copies par paquet pour les *Broadcast* (une prodigalité relative à la consommation de bande passante).
- Risque de congestion du réseau pour chaque paquet transmis.
- Très forte consommation énergétique au niveau des nœuds mobiles (exigeante en terme de calcul).

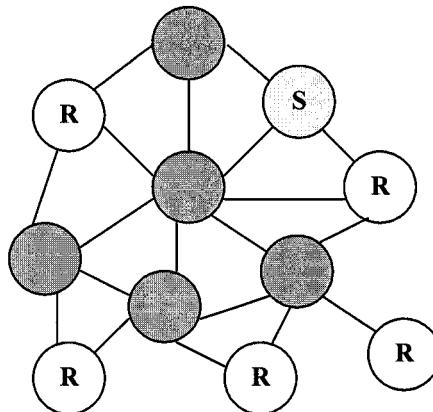


Figure 11: Architecture de réseau Ad hoc mobile en mode Maille.

Réflexions :

Comme la mobilité des nœuds est une caractéristique majeure dans les réseaux Ad hoc, les architectures de protocoles de routage en Maille s'avèrent mieux adaptées (à la première analyse) par rapport à celle des Arbres.

Une étude comparative [5] appropriée des deux protocoles de routage de chaque architecture MAODV (*Multicast Ad hoc On Demande Vector*) et ODMRP (*On Demand Multicast Routing Protocol*) nous montre en détails une évaluation exacte de chaque protocole.

L'insuffisance en matière de réglementation rationnelle pour la comparaison des protocoles demande une illustration des démarches à suivre pour un tel procédé.

5.2.3 Critères de comparaison des protocoles

- Calcul du ratio relatif au nombre de paquets transmis par communication de groupe.
- Le contrôle de la connectivité au sein d'un canal sans fil avec la prise en compte de la sécurité.
- La qualité des transmissions par rapport à la vitesse de mobilité des nœuds.
- Temps de monopolisation d'un paquet avant transmission.
- Le nombre de nœuds impliqués dans le routage y compris les nœuds intermédiaires.
- Une meilleure consommation énergétique.
- La possibilité de mise à grande échelle (scalabilité).

5.3 ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE MAODV & ODMRP

Ces deux protocoles appartiennent à la famille des protocoles réactifs (*On-Demand*), mais chacun d'eux utilise une architecture de routage différente de l'autre. L'étude comparative sera portée à mettre en évidence les avantages et les inconvénients de chaque protocole, suite à des simulations faites sur les deux schémas de routage dans les mêmes circonstances afin de conclure sur l'efficacité de chacun et les adaptations à faire pour améliorer les performances [21].

L'ensemble des avantages et inconvénients recensés durant cette étude est résumé dans les points suivants :

5.3.1 Avantages MAODV

- Minimiser la consommation d'énergie par paquet, en cherchant le plus court chemin en sauts.

- Minimiser les coûts par paquet, le but est de maximiser le temps de vie individuel de chaque nœud dans le réseau incluant les coûts liés à l'énergie.

5.3.2 Avantages ODMRP

- Tous les nœuds intermédiaires (sur le plus court chemin ou non) forment un groupe d'expédition (*Forwarding Group*).
- Un groupe d'expédition (FG) construit un maillage qui fournit des chemins multiples, dont un est le plus court.
- Tous les nœuds dans le groupe d'expédition (FG) expédient des paquets Multicast (redondance par inondation).

5.3.3 Comparaison qualitative

- Les deux protocoles découvrent des itinéraires de groupe Multicast seulement en présence des paquets de données à livrer à une destination de groupe Multicast.
- La découverte d'itinéraire est basée sur le cycle de requête / réponse ou les informations de routage sont stockées et échangées entre les nœuds qui composent chaque chemin dans le réseau.
- MAODV emploie un arbre Multicast bidirectionnel partagé.
- ODMRP maintient une topologie de maille enracinée de chaque source.
- Dans MAODV, l'arbre est figé d'avance, donc toutes les ruptures de lien forcent des actions de réparation ou de reconstruction d'arbre.
- MAODV, seul le nœud source maintient à jour les informations de l'arbre Multicast en envoyant les messages périodiques (*Hello*) au groupe.

- ODMRP fournit les chemins alternatifs et un échec de lien n'a pas besoin de déclencher la reconstruction des mailles.
- Dans ODMRP, des itinéraires de la source Multicast aux récepteurs sont périodiquement régénérés par la source.
- Dans MAODV, un arbre bidirectionnel est plus efficace et évite d'envoyer les paquets doubles aux récepteurs.

5.3.4 La mobilité

- ODMRP est généralement inchangé par rapport à la mobilité des nœuds, alors que MAODV est plus sensible aux changements relatifs à la mobilité.
- La topologie de maille d'ODMRP tient compte des chemins alternatifs en le rendant de ce fait plus robuste que MAODV.
- MAODV se base sur un cheminement simple sur son arbre Multicast, par conséquent, il doit réagir aux cassures de liens en lançant des réparations.

6 SYNTHESE DE L'ETAT DE L'ART

6.1 INTRODUCTION

Un réseau dit Ad Hoc, est un réseau sans infrastructure fixe avec une possibilité d'auto-configuration. L'ensemble des nœuds mobiles constituant le réseau joue le rôle de routeurs dynamiques intermédiaires pour la transmission des données d'une source quelconque à une destination dynamiquement. Ce mode de routage peut être implémenté de la manière la plus simple ; considérant la réussite d'un échange entre deux nœuds relative à la distance

géographique qui les sépare. Sauf que, si un récepteur ne se trouve pas sur la portée d'un émetteur, l'acheminement optimal des paquets à travers des routes calculées reste un grand défi et pose alors implicitement le problème de routage dans les réseaux ad hoc mobiles.

En conséquent, toute conception de protocole de routage doit étudier les problèmes suivants :

- Minimisation de la charge du réseau
- Support fiable pour les communications multipoints.
- Garantir un routage optimal
- Assurer une bonne qualité de service avec un facteur de sécurité maximal en réduisant le temps de latence.

6.2 CLASSIFICATION DES PROTOCOLES DE ROUTAGE AU SEIN DES RÉSEAUX AD HOC MOBILES

Les protocoles de routage peuvent être séparés en deux catégories, suivant la manière de création et de maintenance des routes lors de l'acheminement des données :

Les protocoles proactifs : établissent les routes à l'avance en se basant sur l'échange périodique des tables de routage.

Les protocoles réactifs : cherchent les routes à la demande.

Cependant, une troisième catégorie de routage peut être utilisée en mariant les deux approches citées ci-dessus, cette manière de faire peut compenser les insuffisances sentis dans l'une des approches et existante dans l'autre, or, ce qui est important dans cette façon de voir c'est de bien pouvoir arriver à une solution de routage qui sera moins exigeante en calcul de chemins vue la capacité énergétique limitée des nœuds mobiles en tenant compte de l'aspect mobilité et enlevant la contrainte sur leurs scalabilités.

Compte tenu de la diversité des modes de transmission réseau, le Multicast représente un axe de recherche à part entière dans le processus de développement des protocoles liés aux réseaux sans fil, étant donné ses particularités liées aux notions de gestion de groupe. Ceci dit, plusieurs approches de recherches sont coulées dans ce sens [13] divisés sur deux axes principaux. La première approche vise à construire un arbre (partagé ou non) de liens qui illustre d'avance l'ensemble des chemins reliant une source à l'ensemble des destinations susceptibles de participer à une communication Multicast se basant sur l'idée qu'il existe uniquement un seul chemin entre une source et une destination afin d'obtenir une utilisation optimale de la bande passante, une fois le nombre de paquets transmis sera minimal. La deuxième approche nommée Maillée (*Meshed*) considère qu'entre une source et une destination, il peu y avoir plus qu'un seul chemin offrant ainsi une optimalité dans le calcul des chemins les plus courts pour faire face au problème de mobilité des nœuds qui nécessite une reconstruction de tout l'arbre dans la méthode précédente [25].

6.3 PROBLÉMATIQUE DU ROUTAGE

Le problème de routage consiste à déterminer un acheminement optimal des paquets à travers le réseau au sens d'un certain nombre de critères de performance. Le problème consiste à trouver l'investissement de moindre coût en capacités nominales et de réserves qui assure le routage du trafic nominal et garantit sa survabilité en cas de n'importe quelle panne d'arc ou de noeud. Le problème qui se pose dans le contexte des réseaux ad hoc est l'adaptation de la méthode d'acheminement utilisée avec le grand nombre d'unités existantes dans un environnement caractérisé par de modestes capacités de calcul et de sauvegarde et des changements rapides de topologie. La grande majorité des algorithmes de Multicast au sein des réseaux filaires met en

œuvre une structure d'arbre (partagé ou non). L'arbre est le moyen le plus efficace en terme de ressources pour connecter N nœuds et garantit la non duplication des données. De plus, les décisions de routage sont très simples et se limitent à retransmettre les données sur les autres interfaces, exceptée celle par laquelle le message est arrivé. Vouloir transposer directement ces principes aux réseaux sans fil peut se révéler très inefficace. Il ne faut pas perdre de vue que l'emploi d'un protocole de routage Multicast pour envoyer une donnée à un ensemble de destinataires doit permettre de réduire le nombre de ressources réseau employées. De plus, la mise en œuvre d'un protocole Multicast peut s'avérer utile car elle offre aussi un moyen robuste pour joindre des destinataires dont l'adresse n'est pas connue a priori ou qui change régulièrement. Comme nous l'avons souligné plus haut, il est important de réduire le nombre de transmissions (et la consommation d'énergie au sein des mobiles) dans un réseau sans fil car la bande passante est limitée. Le Multicast doit permettre d'optimiser la gestion du médium radio en évitant les retransmissions superflues de messages (approche Maillée) et en tirant parti de la caractéristique de diffusion inhérente au médium radio.

Comme, il est toujours difficile de faire table rase du passé, les premières propositions de protocole de Multicast pour les réseaux ad hoc furent des adaptations de techniques déjà présentes dans la filaire [15].

6.4 OBJECTIFS

Le but de notre travail est d'essayer de mener à terme une expérience d'adaptation d'un nouveau protocole de routage Multicast pour les réseaux ad hoc en tenant compte des faiblesses liées au développement par arbre et en tirant profil des avantages de l'approche maillée afin de mettre fin au problème de mise à l'échelle avec une utilisation adéquate de la bande passante, notre objectif

primordial est d'atteindre des résultats fiables à travers des simulations utilisant le plus possible des scénarios proches de la pratique pour concrétiser les solutions proposées.

6.5 APPROCHE THEORIQUE

Une comparaison technique des deux classes de routage Multicast dans les réseaux Ad hoc selon les critères suivants :

- Taux d'envoi de paquets.
- Robustesse à la mobilité.
- Nombre de transmission par paquet (l'efficacité de la bande passante).
- Le retard calculé par paquet transmis.
- Le nombre de nœuds impliquer dans le routage.
- L'efficacité énergétique.
- La marge de manœuvre dans le réseau, la scalabilité, permet d'établir une liste appropriée sur l'ensemble des avantages et des dysfonctionnements de chacune des classes selon le tableau 1 :

Schéma	Avantages	Inconvénients
Arbre	Un nombre minimal de copies par paquet => utilisation efficace de la bande passante Nombre de nœuds minimal dans le routage => utilisation efficace de l'énergie	Un lien cassé => régénération de tout l'arbre Chaque nœud doit maintenir le lien vers la racine => problème de scalabilité
Maillée	Multiples chemins de routage => faire face aux cassures de liens et à la mobilité des nœuds	Utilisation de plusieurs copies du même paquet durant la transmission => congestion de la bande passante

Tableau 1: Tableau comparatif des architectures de réseaux (Arbre, Maille).

6.6 CONCLUSION

Comme les réseaux sans fil de la nouvelle génération auront le défi de supporter des médias qui exigent de nouvelles applications informatiques civiles ou militaires nécessitant des services Multicast ajoutant ainsi une nouvelle contrainte pour la réussite d'une telle technologie. En effet les fonctionnalités Multicast comme la gestion du groupe, le routage, la fiabilité, la qualité de service et la sécurité sont difficiles à implanter surtout quand les acteurs sont des postes mobiles. Notre objectif sera d'étudier la possibilité d'adaptation d'un protocole déjà existant et même la proposition d'un nouveau protocole de communication Multicast dédié aux réseaux ad hoc mobiles qui répond aux exigences de ce mode de réseaux. Pour se faire il faut :

- Opter pour un protocole souple utilisant la technique d'acheminement de type arbre afin d'éviter les complications liées aux complexités des algorithmes de calcul de chemins comme les algorithmes de Bellman-Ford ou celui de Djikstra [7].
- Adopter un découpage du réseau en zones : chose qui va permettre une décentralisation de calcul et une facilité de localisation des nœuds cibles.
- Employer un modèle mathématique pour la constitution des zones de façon à détecter périodiquement chaque concentration des nœuds Multicast.
- Mise en œuvre d'un schéma de routage simple qui traite chaque zone comme une entité (nœud) à part entière, afin de minimiser la surcharge du réseau et d'éviter sa congestion.
- Former des zones autonomes avec une gestion complètement indépendante du nœud source.
- Assurer un routage de données optimal à moindre coût avec une intervention d'un nombre minimal de nœuds intermédiaires.

Partie III :
CONCEPTION D'UN NOUVEAU
PROTOCOLE DE ROUTAGE
MULTICAST POUR LES RÉSEAUX AD
HOC MOBILES DZ-MAODV

7 AVANT PROPOS

Quand on étudie un protocole de routage, il est nécessaire de prendre en compte la notion de robustesse et de flexibilité [8]. Celle-ci n'est pas quantifiée mais peut être caractérisée (le comportement de l'algorithme dépend plus ou moins du facteur mobilité).

La robustesse est liée en premier lieu à la structure de communication utilisée par le protocole. Un arbre est un exemple de structure de communication non robuste. Étant donné que c'est un graphe de connexité minimale, la moindre rupture d'un lien entraîne la non connexité de tout l'ensemble, ce qui nécessite de régénérer l'arbre. Ainsi, tout le trafic Multicast est concentré sur un ensemble de chemins critiques.

D'autre part, une solution moyennement adaptée au problème d'optimalité dans le calcul des chemins de transmission entre la source et les récepteurs est celle qui s'appuie sur l'architecture maillée (CAMP, ODMRP), mais elle reste limitée à cause des problèmes de congestion du réseau à travers les cycles (boucles) que peuvent prendre les paquets transmis.

L'autre façon de procéder, et qui représente une solution fiable : c'est une architecture décentralisée qui consiste à diviser le réseau en zones capable d'avoir une autonomie de gestion et qui communiquent avec la source principale à travers un flux qui gère en même temps le routage inter groupe et le routage intra groupe. Mais certaines approches pour ce type d'architecture restent sans valeur ajoutée par rapport aux deux modèles cités auparavant due à la non rationalisation des méthodes de décentralisation. Ce qui va amener à des insuffisances au niveau de la gestion du routage. Les travaux de Chelius, Fleury [9] et, Gerla [24] portent sur une méthode mathématique de création de groupes qui s'appuie sur la théorie des graphes.

Cette méthode permet d'éviter l'ensemble des anomalies recensées dans les autres algorithmes de découpage en sous groupes. Notre approche améliore cette technique et l'enrichit en tenant profit de la gestion décentralisée.

8 ARCHITECTURE PROPOSÉE

8.1 TECHNIQUE DE DÉCOUPAGE DU RÉSEAU

Dans le cas où les membres d'un groupe seraient répartis localement de manière très dense, il est tout aussi efficace de réaliser une diffusion de rayon réduit dans cette zone que de mettre en place une structure de diffusion compliquée. De même, un *Broadcast* global optimisé est généralement aussi efficace qu'un arbre lorsque quasiment tous les nœuds du réseau font partie du groupe. Pour mettre en œuvre un protocole adaptatif, qui soit en mesure d'évaluer la configuration, il est nécessaire de caractériser et d'identifier ce que nous appelons les *zones denses*.

8.2 PROCESSUS D'IDENTIFICATION DES ZONES DENSES

Le réseau s'identifie par un ensemble de nœuds dans une surface bien identifiée, cet ensemble se divise en deux catégories :

- Les nœuds Multicast qui vont participer à une communication de groupe.
- Les nœuds non-Multicast qui peuvent jouer le rôle d'intermédiaires.

Chaque nœud appartenant au réseau possède une connaissance détaillée de son voisinage direct.

Cette connaissance permet de schématiser notre réseau sous forme d'un graphe connexe non orienté $H(V, E)$.

8.2.1 Technique d'identification des zones denses

Définition : Soit $H = (V, E)$ un graphe non orienté où V représente l'ensemble des sommets (nœuds) et E l'ensemble des arêtes (liens entre les nœuds). On colore en blanc l'ensemble des nœuds qui se sont volontairement abonnés à un groupe Multicast donné et en gris les nœuds qui ne font que retransmettre le flux (nœuds intermédiaires). On note $\Gamma_i(x)$ le i ème voisinage d'un sommet x . $Z = (V^1, E^1)$ est une zone dense si et seulement si :

1. Z est un sous-graphe partiel de H .
2. Z est connexe.
3. V^1 comporte au moins un sommet blanc.
4. Pour tout sommet gris $s \in V^1$:

a) $\Gamma_1(s) \cap V^1$ ne comporte aucun sommet gris. En d'autres termes, dans toute chaîne incluse dans la zone dense, on ne peut jamais avoir deux sommets gris successifs, ce qui permet de respecter la règle suivante : un nœud qui a pour unique rôle de relayer ne le fait qu'entre deux nœuds membres du groupe de Multicast (Figure 12).

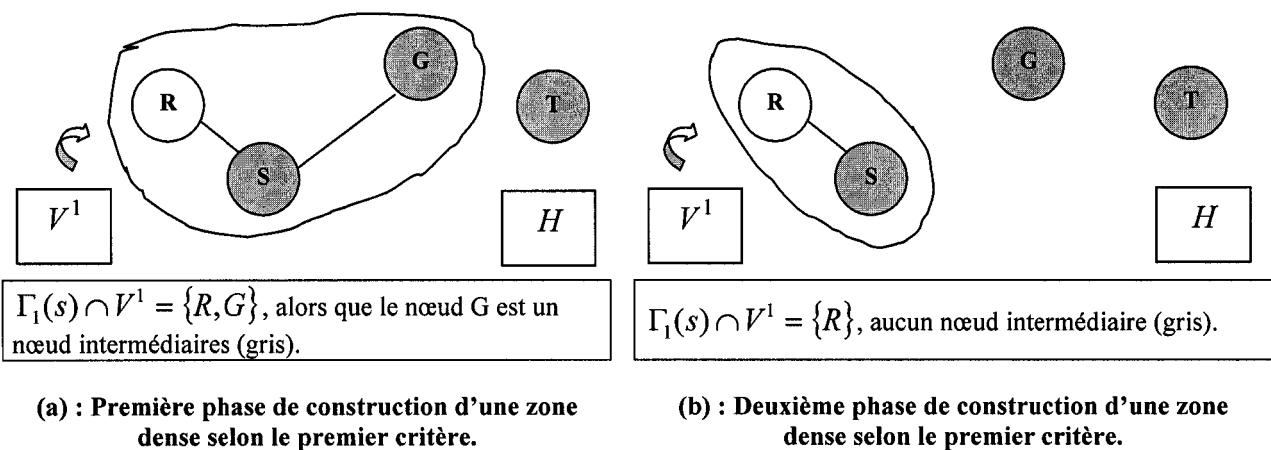


Figure 12: Schéma illustratif du premier critère de construction d'une zone dense.

Une fois les conditions préliminaires réunies. Une construction d'une zone dense est initiée par un nœud intermédiaire gris (s) qui établit les liens de communication avec le maximum de nœuds adjacents (Figure 12 (a)). Parmi les liens possibles, il y a des liens vers d'autres nœuds intermédiaires comme le nœud (g) (Figure 12 (a)). Ce type de liens sera refusé dans la construction d'une zone dense selon le premier critère, et donc le lien vers le nœud (g) est éliminé (Figure 12 (b)) et seul le lien vers les nœuds Multicast (R) qui sera pris en considération.

- b) $K = |\Gamma_1(s) \cap V^1| \leq 2$, si $K = 2$ alors les deux sommets de $\Gamma_1(s) \cap V^1$ ne sont pas adjacents. Cette condition signifie qu'un sommet gris ne sera pas maintenu s'il n'est pas essentiel (il n'effectue pas de retransmission, ou est redondant) (Figure 13).

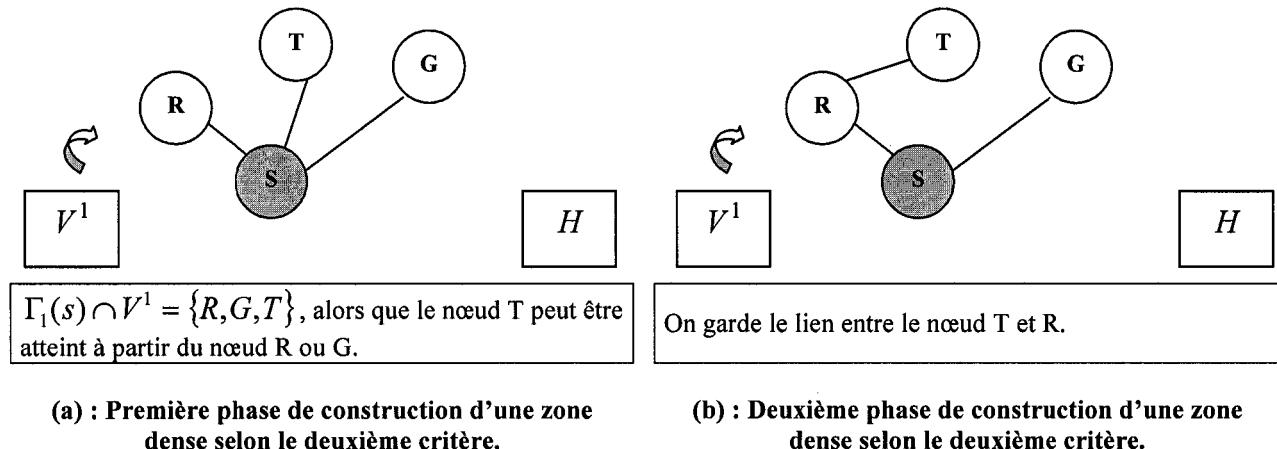
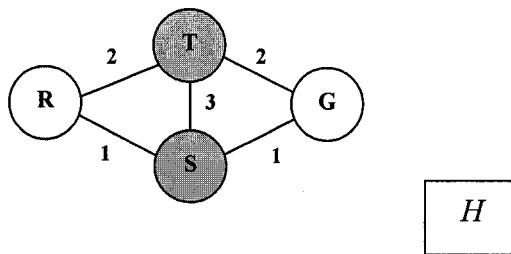


Figure 13: Schéma illustratif du deuxième critère de construction d'une zone dense.

Si le premier critère est vérifié, on va calculer la cardinalité de l'ensemble $\Gamma_1(s) \cap V^1$ qui va nous indiquer le nombre de nœuds adjacents au nœud intermédiaire (s) (Figure 13 (a)). Nous remarquons que le lien entre les nœuds (s) et (T) peut être substitué par le lien direct entre deux nœuds Multicast (R) et (T) (Figure 13 (b)), et donc ce critère

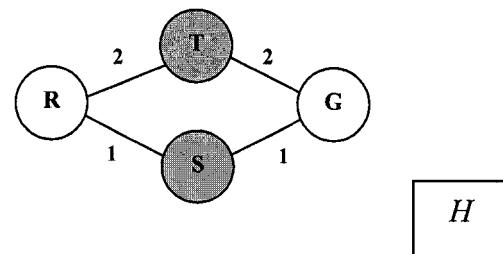
favorise plus les liens entre les noeuds Multicast plus que les liens directes entre le noeud construisant la zone dense (s) et les noeuds Multicast adjacents.

- c) Pour tout sommet $\mu \in \Gamma_2(s) \cap V^1$, on a : $\Gamma_1(s) \cap V^1 \not\subset \Gamma_1(\mu) \cap V^1$. Cette dernière condition est également une condition de non-redondance des sommets gris. Si on considère un sommet s et un sommet μ à distance 2 de s , dont le 1-voisinage contient celui de s , on crée des chemins redondants (Figure 14).



Plusieurs chemins possibles entre les noeuds R et G, alors qu'il faut garder uniquement un et un seul chemin.

(a) : Première phase de construction d'une zone dense selon le troisième critère.



Uniquement le chemin 1 ou le chemin 2 sera gardé.

(b) : Deuxième phase de construction d'une zone dense selon le troisième critère.

Figure 14: Schéma illustratif du troisième critère de construction d'une zone dense.

Une fois le deuxième critère vérifié, on peut construire les chemins de notre réseau. Seul une chemin sera maintenu parmi l'ensemble des chemins possibles (Figure 14 (a)). Le choix du chemin sera conditionné par l'élimination des liens directs entre les noeuds intermédiaires et seuls les chemins incluant les noeuds Multicast avec le minimum de noeuds intermédiaires seront retenus (Figure 14 (b)).

Remarque :

Il est assez facile de transposer la définition précédente en un algorithme distribué. Notons néanmoins que pour calculer une zone dense de façon totalement distribuée en ayant seulement la connaissance de son 2-voisinage il est nécessaire de transformer la condition 4 précédente (tester en pratique si un nœud gris n'est pas redondant dans une zone dense).

8.3 PROCESSUS DE CONSTRUCTION DU RÉSEAU

Le processus d'identification d'une zone dense se déclenche via les nœuds intermédiaires ayant un nombre de nœuds Multicast supérieur à 1 dans leurs tables *Unicast Route Table*⁽⁴⁾.

L'identification des zones denses doit se faire avant chaque communication Multicast, elle a comme objectif de marquer les nœuds (Multicast et autres) par leurs zones respectives. Cela signifie, que chaque nœud sera marqué au niveau de sa table *Multicast Route Table*⁽⁵⁾ en mettant à jour le champ : *Numéro de la zone*. Ce procédé permet d'associer à chaque zone dense un leader une fois que les trois conditions définies à la section 9.2.1 seront réunies pour l'existence de cette zone.

La notion de leader du groupe diffère de celle illustrée dans le protocole de routage MAODV [29]. Dans notre cas, le leader de chaque groupe est responsable en partie de la gestion du groupe (adhésion et retrait des membres, routage intra/inter groupe) qui découle de la gestion principale du nœud source.

Initialement, un apprentissage du voisinage est obligatoire pour l'ensemble des nœuds du réseau. Cet apprentissage signifie que chaque nœud doit avoir des informations relatives à la distance et l'énergie d'émission de chacun des nœuds qui sont à sa portée et qui font partie de son voisinage

⁴ Unicast Route Table : Table de routage Unicast (point à point).

⁵ Multicast Route Table : Table de routage Multicast.

directe (*Hop Count = 1*). Cette connaissance du voisinage directe de chaque nœud permet d'établir un schéma graphique de notre réseau à base d'une traduction matricielle des liens entre un nœud et l'ensemble des autres nœuds du réseau.

Si notre réseau contient N nœuds mobiles, la matrice qui correspond à ce réseau sera la matrice carrée N où chaque ligne et chaque colonne représente un nœud du réseau :

Tel qu'illustré à la figure 15, pour chaque cellule (i,j) : $N(i,j) = \begin{cases} 1 & \text{Si } j \text{ est voisin de } i \\ -1 & \text{Si } i = j \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$

	1	...	i	...	N
1	-1	0	1	0	1
...	1	-1	0	0	0
I	1	0	-1	1	1
...	1	1	0	-1	0
N	0	0	0	0	-1

Figure 15: Schéma illustratif de la matrice de liens pour l'ensemble des nœuds du réseau

Une fois la matrice conçue, le réseau peut être schématisé sous la forme d'un graphe non orienté où les sommets représentent les nœuds de notre réseau et les arrêtes sont les liens entre ces nœuds.

À l'aide de cette matrice, chaque nœud peut mettre à jour sa *Unicast Route Table* en créant une entrée pour chaque nœud voisin. Cette entrée est créée à l'aide des messages *HELLO* qu'envoie chaque nœud à son voisinage direct par le biais d'une diffusion (*Broadcast*).

8.4 ALGORITHME D'ÉLECTION D'UN LEADER

Le processus d'élection d'un leader est initié par le nœud intermédiaire ayant identifié la zone dense. Ce procédé est valable uniquement à l'initiation d'une session de communication Multicast par le nœud source. Le nœud intermédiaire génère un message de type *Leader Election Request (LER)* qui sera envoyé à tous les membres du groupe Multicast de la même zone dans le but de leur demander de procéder au calcul du nœud qui assure la meilleure gestion de routage et de transmission de paquets pour tous les nœuds de la zone. Cet objectif peut être atteint par la technique de calcul du nœud le plus **connectif**⁽⁶⁾. Chaque nœud Multicast au sein de chaque zone dense calcule un vecteur de rapports (Puissance signal /distance) à partir des informations contenues dans sa *Unicast Route Table*, chaque nœud Multicast correspond à un vecteur R qui a toutes ces composantes $R(i) \geq \alpha$, où α est le seuil de connectivité minimale.

Le leader au sein de chaque zone dense est le nœud Multicast (vecteur) possédant la meilleure moyenne sur ses composantes :

Soit R_1, \dots, R_N les N vecteurs de chaque zone dense parmi les M zones denses construites.

Chaque vecteur est relatif à un seul nœud Multicast dans la zone dense. Il est défini par les composantes calculons le rapport d'énergie d'émission du nœud concerné / distance qui le sépare aux autres nœuds de sa zone dense. L'ensemble de ces rapports constitue un vecteur de taille : $(N-1)$ après le retrait du rapport du nœud concerné par rapport à lui-même, vu que la distance est nulle, d'où chaque vecteur sera représenté comme suit :

$$R_i = (R_1^{(i)}, \dots, R_{N-1}^{(i)}) , i = 1, \dots, N-1$$

⁶ Le nœud ayant un nombre maximal de connexions vers les autres nœuds de la zone dense.

Avec : $R_j^{(i)} = \frac{Puissance(i \rightarrow j)}{Distance_{ij}}$ et cela pour chaque noeud $(i) = 1, \dots, N$ avec $i \neq j$.

I) $R_j^{(i)} \geq \alpha \quad j = 1, \dots, N-1$

On note par $\bar{R}_1, \dots, \bar{R}_N$ les moyennes des composantes de chaque vecteur :

$$\bar{R}_i = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^{N-1} R_k^{(i)}, \text{ avec } i = 1, \dots, N$$

II) On choisit le vecteur ayant la plus grande moyenne: $\bar{R}_i = \max_{1 \leq i \leq N} (\bar{R}_i)$.

Finalement, un seul vecteur $R(i)$ sera choisi parmi l'ensemble des vecteurs calculés. Ce noeud leader sera approuvé par le noeud intermédiaire par l'envoi d'un paquet *Leader Approval Address (LAA)* qui incite les noeuds de la zone dense de prendre le noeud i comme leader avec son adresse comme adresse du leader de la zone dense.

8.4.1 Format des paquets LER et LAA

Les formats de paquets *LER* et *LAA* sont identiques au format du paquet *HELLO* employé dans le réseau et défini dans MAODV [29].

8.4.1.1 Format du paquet Leader Election Request (LER)

Ce paquet est envoyé soit par le noeud intermédiaire suite à l'identification de la zone dense avant le début de la session de communication Multicast, soit il est envoyé par les noeuds Multicast de la zone dense suite à une demande de réélection d'un nouveau leader (Figure 16).

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1
Type	M	Adresse Zone Dense										Nombre de sauts									
Adresse IP Groupe Multicast											Numéro Séquence Groupe Multicast										

Figure 16: Structure du paquet LER pour l'élection d'un leader.

Le tableau 2 suivant donne une explication des différents champs du paquet avec leur fonction.

Type	7 = LER, c'est un message de requête pour l'élection d'un leader.
M	Mode : 0 = Nouvelle élection, 1 = Réélection.
Adresse Zone Dense	L'identifiant de la zone dense.
Nombre de sauts	Le nombre de sauts depuis la création de la requête, incrémenter à chaque passage au niveau d'un nœud intermédiaire.
Adresse IP Groupe Multicast	L'adresse IP du groupe Multicast.
Numéro Séquence Groupe Multicast	Le numéro de séquence dans le groupe Multicast.

Tableau 2: Tableau des champs du paquet LER pour l'élection d'un leader.

8.4.1.2 Format du paquet Leader Approval Address (LAA)

Une fois le choix de leader est consenti, le nœud initiateur de la requête d'élection (nœud intermédiaire, nœud du groupe Multicast) énonce l'adresse du nouveau leader au reste des nœuds de la zone dense à travers la diffusion d'un paquet *Leader Approval Address (LAA)* (Figure 17).

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1
Type	M	Adresse Zone Dense								Adresse IP Leader										Nombre de sauts	
		Adresse IP Groupe Multicast																		Numéro Séquence Groupe Multicast	

Figure 17: Structure du paquet LAA pour la confirmation du nouveau leader.

Le tableau 3 explique les champs avec leur rôle respectif dans le paquet.

Type	8 = LAA, confirmation de l'élection d'un nouveau leader.
M	Mode : 0 = Nouvelle élection, 1 = Réélection.
Adresse Zone Dense	L'identifiant de la zone dense.
Adresse IP Leader	L'adresse IP du nouveau leader de la zone dense.
Nombre de sauts	Le nombre de sauts qui est incrémenter à chaque passage d'un nœud intermédiaire.
Adresse IP Groupe Multicast	L'adresse IP du groupe Multicast.
Numéro Séquence Groupe Multicast	Le numéro de séquence dans le groupe Multicast.

Tableau 3: Tableau des champs du paquet LAA pour la confirmation du nouveau leader.

Exemple :

On propose une étude de cas pour décrire le processus d'élection d'un leader au sein d'une zone dense qui contient 6 nœuds : un nœud intermédiaire et quatre nœuds appartenant au groupe Multicast. On définit entre chaque deux nœuds liés; deux couples de paramètres (P,D) indiquant pour chaque nœud $R(i)$: sa puissance d'émission ainsi que la distance qui le sépare du nœud $R(i+1)$ respectivement et vice versa (Figure 18). Ces couples (Puissance du signal d'émission, distance) constituent la base de calcul pour l'algorithme d'élection du leader au sein de la zone dense, où chaque nœud construit un vecteur de rapport (Puissance signal émission / distance) par rapport aux nœuds voisins directs. Une fois ces vecteurs calculés, on procède à la sélection du meilleur vecteur ayant la plus grande moyenne avec un maximum de composantes toutes supérieures ou égal au seuil de connectivité α défini à 1.

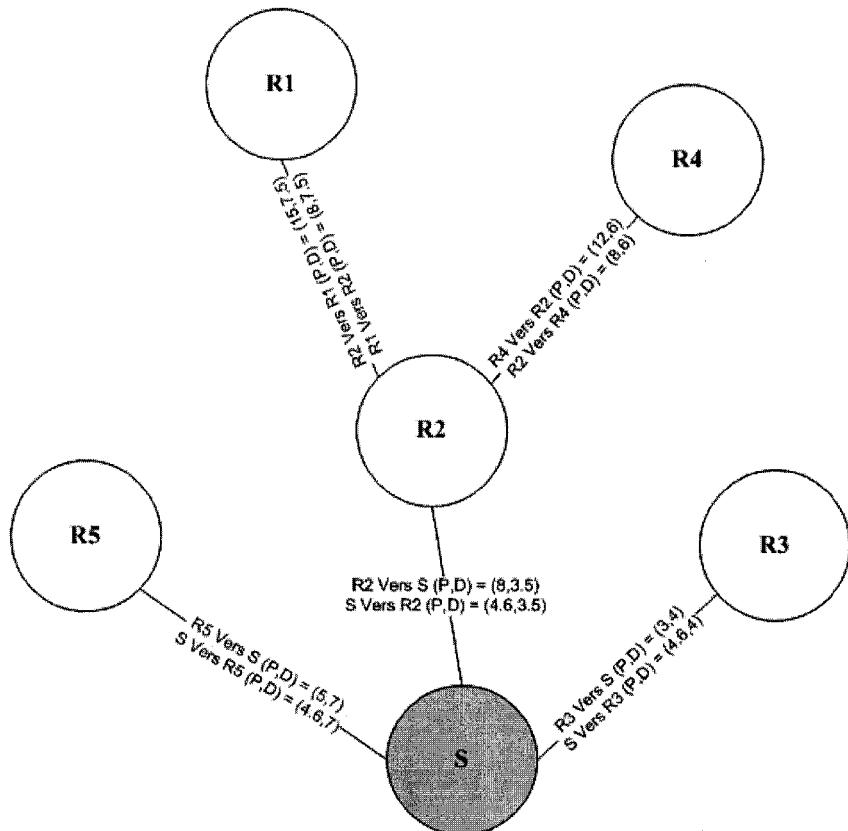


Figure 18: Schéma d'élection d'un leader au sein d'un groupe.

De Vers	Le nœud R1	Le nœud R2	Le nœud R3	Le nœud R4	Le nœud R5
Le nœud R1	-1	2	0	0	0
Le nœud R2	1.067	-1	0	2	0
Le nœud R3	0	0	-1	0	0
Le nœud R4	0	1.33	0	-1	0
Le nœud R5	0	0	0	0	-1
Vecteur $R_j^{(i)}$	(1.067,0,0,0)	(2,0,1.33,0)	(0,0,0,0)	(0,2,0,0)	(0,0,0,0)

Tableau 4: Tableau des valeurs (puissance du signal, distance) entre les nœuds du réseau.

Si on choisit un seuil de connectivité $\alpha = 1$, alors seul les vecteurs R1, R2, R4 seront valides à la deuxième étape de test.

La deuxième étape consiste à sélectionner le vecteur ayant le maximum de composantes non nulles maximales parmi tous les vecteurs candidats. Cela peut se faire à l'aide de calcul de la moyenne de chaque vecteur en prenant uniquement le vecteur avec la plus grande moyenne (Tableau 5).

	Le nœud R1	Le nœud R2	Le nœud R3	Le nœud R4	Le nœud R5
Vecteur $R_j^{(i)}$	(1.067,0,0,0)	(2,0,1.33,0)	(0,0,0,0)	(0,2,0,0)	(0,0,0,0)
Moy $R_j^{(i)}$	0.26675	0.8325	0	0.5	0

Tableau 5: Tableau des moyennes des composantes des vecteurs R(i).

Dans notre exemple (Tableau 5), c'est le vecteur R2 qui sera le leader de cette zone dense.

Remarque :

Chaque nœud de la zone dense sauvegarde l'adresse du leader de sa zone dans sa table de routage Multicast (Multicast Route Table).

Ce mécanisme d'élection reste valable tout au long de la durée de vie de la session de communication du groupe.

9 TECHNIQUE DE ROUTAGE AVEC LES ZONES DENSES

Chaque nœud dans le réseau maintient deux tables en plus de sa structure initiale :

- 1- *Unicast Route Table* : contient l'adresse des nœuds de voisinage directe.
- 2- *Multicast Route Table*: contient l'adresse des nœuds du groupe Multicast.

Ces deux tables constituent la norme de structure dans le protocole de routage MAODV, d'autres modifications de structures sont nécessaires afin d'implémenter notre modèle.

Le réseau est identifié par l'existence des zones de fortes concentrations de nœuds Multicast, dites les **zones denses**. A travers ces zones dites denses, il est très utile d'introduire une certaine souplesse de calcul des chemins avec une meilleure gestion de l'imprédictible mobilité des nœuds.

9.1 LE ROUTAGE DES PAQUETS AU SEIN DU RÉSEAU

9.1.1 Limitation des protocoles actuels

Les arbres de diffusion construits par une approche réactive (*On-Demand*), comme dans MAODV, peuvent avoir de nombreux défauts. Les routes construites par ce mécanisme, que ce soit en Unicast ou en Multicast, ne sont pas optimales.

S'il est reconnu que l'optimisation de la bande passante est un problème important dans les réseaux sans fil, il semble que les protocoles actuels tentent surtout d'optimiser le surcoût du trafic de contrôle induit par la mise en œuvre d'un arbre/maillage pour réaliser une opération

Multicast, sans réellement résoudre le problème de l'optimisation de la bande passante consommée par les (re)diffusions des données. On peut néanmoins supposer que la diffusion des données est plus consommatrice que le trafic de contrôle. Il faut donc apporter une attention toute particulière à ce point, sans pour autant négliger le surcoût dû au trafic de contrôle. En d'autres termes le protocole proposé doit répondre à une meilleure utilisation de la bande passante en minimisant au maximum le nombre de nœuds intermédiaires pour une communication de groupe, et ainsi avoir des chemins de transmission optimaux.

Le schéma du réseau sera hiérarchique. Chaque zone dense représente une unité basique du réseau avec une gestion interne indépendante de la gestion globale du nœud source (Figure 19).

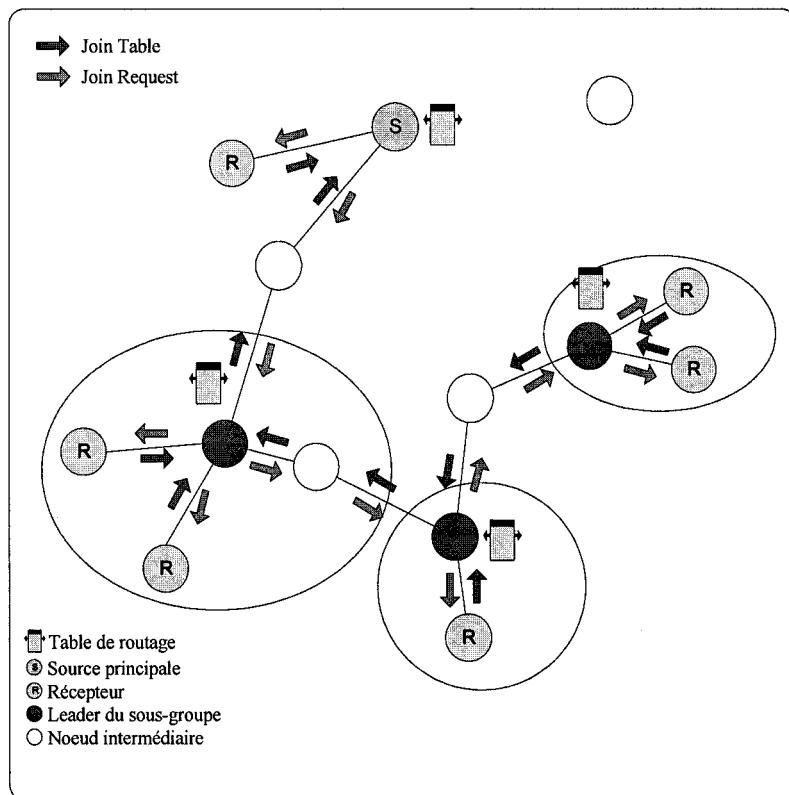


Figure 19: Schéma du routage avec les zones denses.

Avec une telle stratégie, il restera un nombre très minime de nœuds à faire communiquer depuis la source vers les autres nœuds. Pour cela, on peut adopter le schéma de routage réactif de type

arbre MAODV afin de gérer le routage entre l'ensemble des nœuds (source, nœuds hors zones denses et leaders des zones denses qui regroupent le maximum de nœuds Multicast proches).

9.2 SCHÉMA GÉNÉRAL DU ROUTAGE

9.2.1 Définition du protocole MAODV

L'algorithme de routage "MAODV" [29] (*Multicast Ad hoc On Demand Vector*) est un protocole de routage destiné aux réseaux dit "mobiles". MAODV est un algorithme "*On Demand*" c'est-à-dire qu'il ne construit des routes entre nœuds que lorsqu'elles sont demandées par des nœuds sources. Il maintient ces routes aussi longtemps que le nœud source en a besoin. De plus, MAODV constitue des arborescences connectant les membres des groupes Multicast. Les arbres sont composés des membres des groupes et des nœuds nécessaires pour connecter les membres. MAODV utilise un numéro de séquence pour assurer la "fraîcheur" des routes.

9.2.2 Schéma de routage du protocole MAODV

MAODV construit les routes par l'emploi d'un cycle de requêtes *Route Request / Route Reply*. Lorsqu'un nœud source désire établir une route vers une destination pour laquelle il ne possède pas encore de route, il *Broadcast* un paquet *Route Request (RREQ)* à travers le réseau. Les nœuds recevant le paquet mettent à jour leur information relative à la source et établissent des pointeurs de retour vers la source dans les tables de routage. Outre l'IP de la source, le numéro de séquence courant et l'ID de Broadcast, le paquet *RREQ* contient également le numéro de séquence de la destination le plus récent connu de la source. Un nœud recevant un paquet *RREQ* émettra un paquet *Route Reply (RREP)*, soit qu'il est la destination, soit qu'il possède une route vers la destination avec un numéro de séquence supérieur ou égal à celui repris dans le paquet *RREQ*. Si

tel est le cas, il envoie (en mode *Unicast*) un paquet *RREP* vers la source. Sinon, il rediffuse le paquet *RREQ*. Les nœuds conservent chacun une trace des IP sources et des ID de Broadcast des paquets *RREQ*. Si ils reçoivent un paquet *RREQ* qu'ils ont déjà traité, ils l'écartent et ne le transmettent pas. Les nœuds établissent des pointeurs de propagation vers la destination alors que les paquets *RREP* reviennent vers la source. Une fois que la source a reçu les paquets *RREP*, elle peut commencer à émettre des paquets de données vers la destination. Si, ultérieurement, la source reçoit un paquet *RREP* contenant un numéro de séquence supérieur ou le même mais avec un nombre de sauts "*hop*" plus petit, elle mettra à jour son information de routage vers cette destination et commencera à utiliser la meilleure route.

Une route est maintenue aussi longtemps qu'elle continue à être active. Une route est considérée active tant que des paquets de données transitent périodiquement de la source à la destination selon ce chemin. Lorsque la source arrêtera d'émettre des paquets de données, le lien expirera et sera alors effacé des tables de routages des nœuds intermédiaires. Si un lien se rompt alors qu'une route est active, le nœud extrémité du lien rompu émet un paquet "*Route Error*" (*RERR*) vers le nœud source pour lui notifier que la destination est désormais inatteignable. Après réception du paquet *RERR*, si la source désire toujours la route, elle peut réinitier un processus de découverte de route.

Un nœud qui désir rejoindre un groupe Multicast diffuse (*Broadcast*) un paquet *RREQ* avec l'adresse IP de destination positionnée à celle du groupe Multicast et le "*flag*" (*Join*) positionné pour indiquer la volonté de rejoindre le groupe. Tout nœud membre de l'arborescence Multicast recevant ce paquet *RREQ* et ayant un numéro de séquence assez "frais" est susceptible d'émettre un paquet *RREP*. Les nœuds établissent des pointeurs de routage alors que les paquets *RREP* voyagent vers la source. À la réception des paquets *RREP*, la source retient la route avec le numéro de séquence le plus récent ou à défaut avec le plus petit nombre de sauts *hops*. Après une

période donnée de découverte, le nœud source émettra un message d'activation Multicast (*MACT*) au nœud suivant sélectionné (Figure 20).

Ce message active la route. Un nœud ayant préparé un routage Multicast qui ne recevait pas de message *MACT* dans la période spécifiée expirera et effacera le pointeur. Si un nœud recevant le message *MACT* ne fait pas partie de l'arborescence, il aura à conserver la trace de la meilleure route pour les paquets *RREP* reçus. Dès lors, il doit également émettre en *Unicast* un message *MACT* vers son prochain nœud, et ainsi de suite jusqu'à atteindre un nœud de l'arborescence.

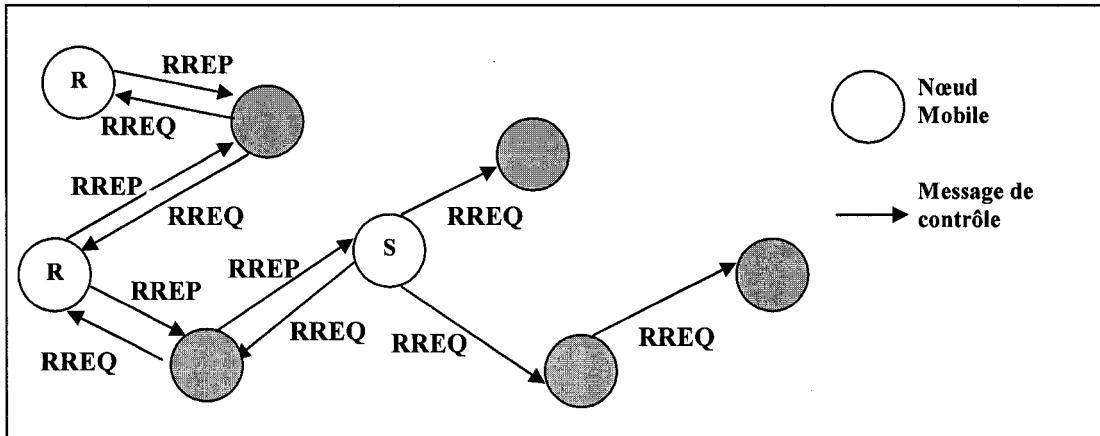


Figure 20: Schéma de découverte de route avec le protocole de routage MAODV.

Remarque :

L'ensemble des tâches de routage avec le protocole MAODV sont en détails dans le fichier draft : *Multicast Ad hoc On-Demand Distance Vector (MAODV) Routing* [29].

10 ARCHITECTURE DU PROTOCOLE DZ-MAODV

DZ-MAODV est en majorité semblable à son homologue MAODV, à l'exception de, l'entité zone dense et de la notion de leader à l'intérieur de cette zone, qui nécessitent une gestion particulière en terme de routage et de transmission de paquets. Un nœud au sein d'un réseau ad hoc mobile utilisant le protocole DZ-MAODV, peut avoir un état parmi les états : neutre, intermédiaire, Multicast, leader de zone dense. L'ensemble de ces états constitue les phases de transitions que peut engendrer la mobilité d'un nœud sur son statut dans le réseau (Figure 21).

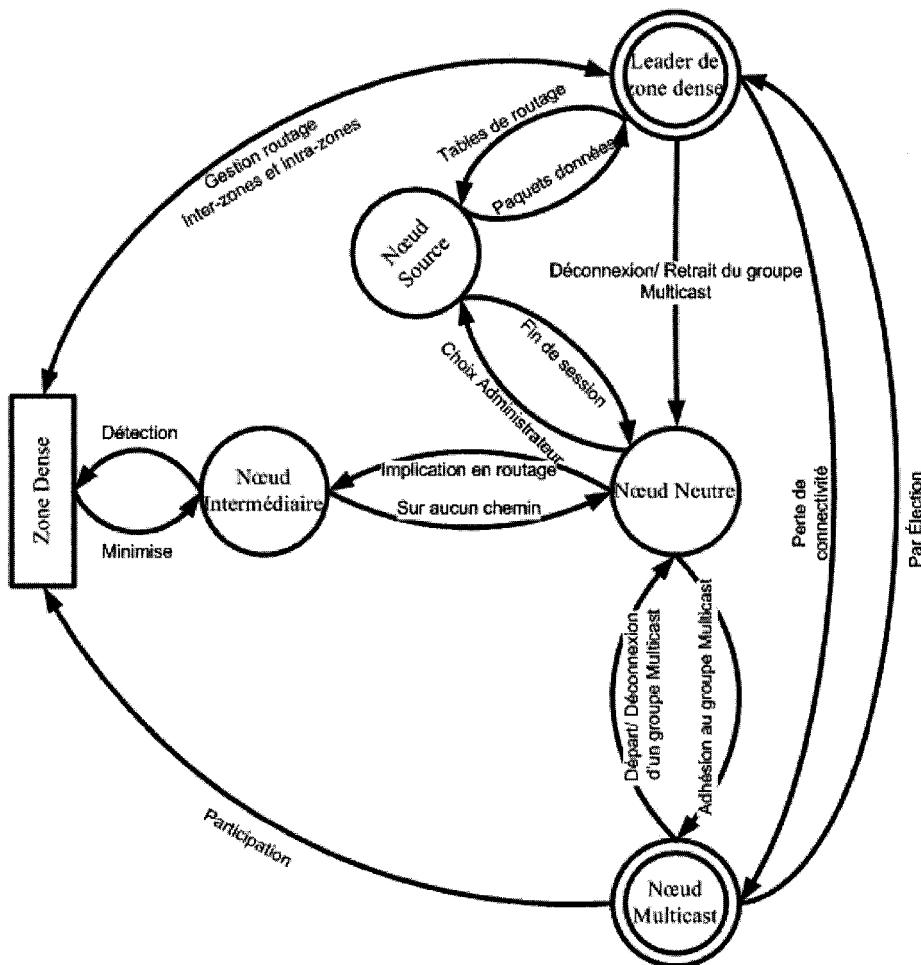


Figure 21: Schéma de transition d'états d'un nœud dans le réseau.

L'ensemble des états illustrés dans la figure 21 est résumé dans le tableau suivant :

ÉTAT	RÔLE
Nœud intermédiaire	<ul style="list-style-type: none"> - Un nœud qui peut détecter une zone dense à base de l'algorithme de trois critères. - S'impliquer dans le routage par la retransmission des paquets de données et de contrôle vers les nœuds adjacents.
Nœud neutre	<ul style="list-style-type: none"> - Peut devenir le nœud source pour une communication Multicast par l'initiation d'une session et vice versa. - Peut être un nœud intermédiaires par la participation dans le processus de routage si il se trouve dans le tracé de chemin pour la communication des paquets au nœuds voisins et vice versa. - Peut être un nœud multicast une fois il adhère à une session de groupe et vice versa. - Peut être un nœud leader d'une zone dense s'il adhère à une session de groupe et être le nœud le plus connectif de la zone dense et vice versa.
Nœud source	<ul style="list-style-type: none"> - Peut être un nœud leader d'une zone dense en même temps d'être le nœud émetteur des paquets de données. - Peut redevenir un nœud neutre si la communication de groupe est finie.
Leader d'une zone dense	<ul style="list-style-type: none"> - Gestion du routage inter et intra zone dense. - Stockage des routes vers les nœuds de la zone dense.
Nœud Multicast	<ul style="list-style-type: none"> - Participer dans une communication Multicast. - Être élu pour devenir le nœud leader d'une zone dense.
Zone dense	<ul style="list-style-type: none"> - Concentration d'un ensemble de nœuds du réseau pour une gestion centrale du routage.

Tableau 6: Tableau des rôles relatifs aux états transitoires des nœuds.

10.1 GESTION DES ZONES DENSES

Les zones denses sont présentées comme des secteurs du réseau entier possédant une concentration élevée des nœuds Multicast. Une fois que les zones denses sont calculées en utilisant l'algorithme entièrement distribué pour leur identification, il faut mettre en place un mécanisme capable de relier l'ensemble de ces zones denses entre elles et de relier chaque zone au nœud source. Avant d'accomplir une telle tâche, deux problèmes doivent être résolus :

1. L'intercommunication des zones denses : au moins un chemin doit exister entre chaque zone dense et la source Multicast. Ce chemin peut rencontrer d'autres zones denses puisque la notion de zone dense est principalement dérivée pour augmenter la fiabilité et la robustesse, mais pour fournir également un bon protocole Multicast qui permet une meilleure mise à l'échelle. On doit prêter beaucoup d'attention à la conception et au déploiement de cette structure inter zone dense.
2. Déterminer l'ensemble de nœuds à l'intérieur d'une zone dense qui vont participer au déploiement de la structure inter zone dense. Fondamentalement, on peut imaginer que des zones denses vont être reliées par un ensemble de chemins très courts.

Une solution initiale consiste à doter l'ensemble de paquets de contrôle qui vont circuler à travers les zones denses par un mécanisme qui facilite leur détection comme paquets provenant ou destinés à une zone dense avec l'ajout d'un champ qui indique le numéro de la zone dense.

10.1.1 La gestion intra zone dense

10.1.1.1 La transmission des paquets

Le nœud Multicast leader, une fois élu parmi l'ensemble des nœuds Multicast de la même zone, doit initier une session de mise à jour de sa table de routage (*Multicast Route Table*) qui doit contenir toutes les routes vers les nœuds de sa zone par l'envoi d'un message *HELLO* à tous les nœuds d'une façon périodique pendant tout le temps de la simulation (Figure 22).

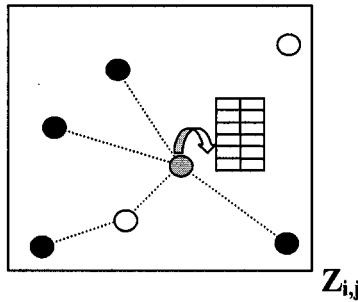


Figure 22: Mise à jour de la table de routage du leader d'une zone dense.

Cette table de routage permet au nœud leader de procéder à la diffusion (*Broadcast*) des paquets de données sur un périmètre réduit (la zone dense). Cette technique permet :

- Une réduction des délais moyens de transmission de paquets par la réduction des délais d'attente liés à des communications *Unicast* dans une structure classique de type Arbre.
- De baisser le nombre de paquets de contrôle qui circulent au sein de la zone dense.
- Une meilleure consommation de la bande passante.

Comme le nœud leader est censé être le nœud le plus connectif de la zone dense, cela implique que l'ensemble des composantes de son vecteur de connexion $R(i)$ est supérieure au seuil de connectivité α . En conséquence, la transmission des données de la source vers les nœuds Multicast au sein des zones denses aura une meilleure qualité. Ainsi, on définit un moyen de contrôle sur le plus important élément de la qualité de service dans les réseaux ad hoc mobiles soit la qualité de transmission.

10.1.1.2 La réélection du nœud leader

La mobilité est une des caractéristiques des réseaux ad hoc mobiles, elle constitue l'obstacle majeur au déploiement de ce type de réseaux à grande échelle. C'est pourquoi l'emploi des zones denses doit répondre de façon efficace à ce problème par la mise en place d'un mécanisme

rigoureux et souple qui vérifie périodiquement, à travers le nœud leader de chaque zone, l'état de chaque nœud dans la zone par l'envoi d'un paquet de contrôle *HELLO*. Ce procédé permet de détecter rapidement les nœuds déconnectés ou éloignés de la zone.

Le nœud leader obéit aux mêmes règles vu sa mobilité, d'où la recherche d'un nouveau nœud leader en cas de déconnexion ou de déplacement du premier s'avère d'une grande importance. Ce processus se déclenche une fois que l'un des membres Multicast de la zone dense ne reçoit plus de message *HELLO* alors qu'il maintient toujours le même identifiant de la zone dense. Ce dernier envoie un message *Leader Election Request (LER)* indiquant la nécessité de réélire un nouveau leader pour cette zone. Ce message va atteindre rapidement tous les nœuds ayant le même numéro de zone dense y compris les nœuds intermédiaires ayant contribué à l'identification de la zone dense. Cela remet en cause la validité de la zone dense elle-même, d'où le déclenchement d'un nouveau processus d'identification de zone dense qui devient éminent (Figure 23).

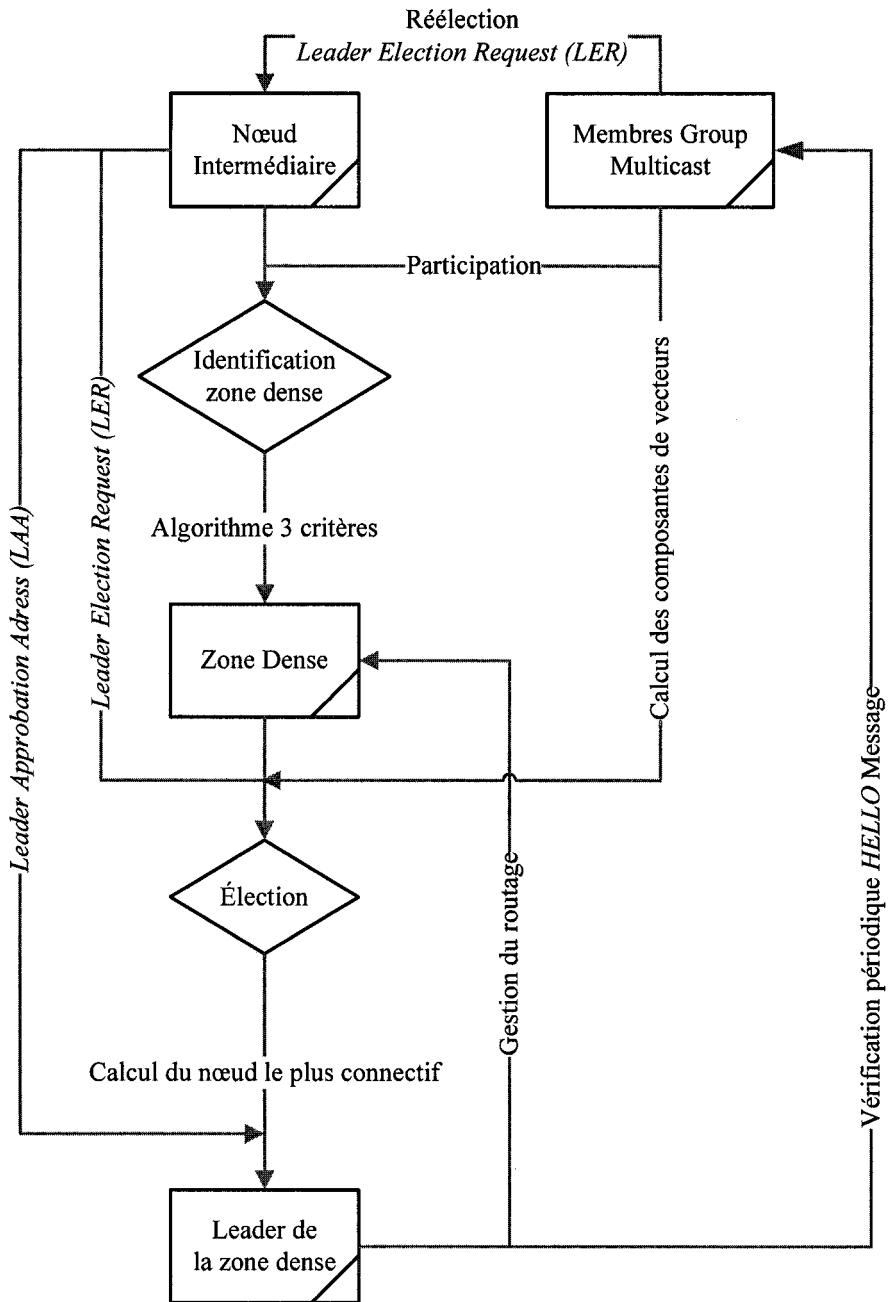


Figure 23: L'organigramme d'élection d'un nœud leader au sein d'une zone dense.

10.1.1.3 L'adhésion au groupe Multicast

Un nœud désirant appartenir à un groupe Multicast, envoie sa demande au nœud Multicast le plus proche de lui. Si ce dernier se trouve être un nœud d'une zone dense, il doit acheminer cette

requête vers son leader qui va se chargé de cette adhésion par l'envoi d'un message *RREP* au nœud demandeur en gardant le tracé de son chemin pour lui communiquer les paquets de données, sans oublier d'aviser le nœud source de cette adhésion par le simple envoi de sa table de routage qui contient le nouveau chemin avec l'adresse du nouveau membre. Ce dispositif permet d'alléger la surcharge d'adhésion des nouveaux membres, tâche qui était attribuée au nœud source dans MAODV.

10.1.1.4 Le retrait d'un membre du groupe Multicast

Le retrait d'un nœud Multicast se trouvant à l'intérieur d'une zone dense, se fait par l'approbation du nœud leader de cette zone. Ce processus génère des mises à jour au sein des tables du nœud leader et du nœud source.

10.1.2 La gestion inter zone dense

Une fois ces zones denses créées (chaque nœud du réseau sait s'il est membre abonné ou retransmetteur d'une zone dense), le but est de relier ces différentes zones entre elles via une structure de diffusion pour mettre en œuvre un protocole de Multicast dont le principe est très simple : un message est inondé dans les zones denses et il est transmis entre les zones denses par la structure d'interconnexion inter zones denses. Chaque zone dense est considérée comme un nœud intermédiaire à part entière. Elle explore les chemins vers les autres zones denses et les nœuds Multicast indépendants afin d'exercer sa mission principale qui est l'acheminement des paquets de données de la source vers les structures voisines.

Partie IV : SIMULATIONS ET RÉSULTATS

11 DESCRIPTION DES SIMULATIONS

Définition :

La simulation est l'un des moyens qui permettent de maîtriser la complexité des systèmes, et les motivations qui poussent à y recourir peuvent être multiples :

- On peut simuler pour *comprendre* le fonctionnement d'un système afin d'en formuler et d'en mettre au point les lois d'évolutions; c'est toute la problématique de la simulation des phénomènes physiques, le simulateur dans ce cas à pour rôle de permettre la mise au point d'un modèle.
- On peut simuler pour *évaluer* de manière prédictive le comportement d'un système, ou l'impact sur ce comportement d'une modification d'une partie d'un système existant. Le simulateur devient dans ce cas un outil de conception et de validation du système lui-même.

L'approche simulation trouve toute sa justification dans l'ingénierie des systèmes complexes pour lesquels il est difficile d'avoir une vision globale, même si l'on est capable d'appréhender chacun des composants pris individuellement.

Deux catégories de contraintes sont à prendre en compte pour que la simulation soit une approche effective face à la complexité des systèmes :

- Les contraintes d'interopérabilité: chaque élément de système complexe possède en général son, voire ses, propre(s) simulateur(s). Il est nécessaire de pouvoir marier à moindre frais ces simulateurs élémentaires.
- Les contraintes de mise en œuvre: il faut être en mesure de fournir à chaque simulateur élémentaire les ressources dont il a besoin. Il faut également être capable de tenir compte

de la localisation des simulateurs qui ne sont pas forcément déplaçables. La distribution est un moyen de satisfaire ces contraintes.

11.1 ARCHITECTURE DE SIMULATION

Le schéma de simulation consiste en une surface de taille 1500*300 mètres-carré sur laquelle sera élaboré un processus de mobilité des nœuds. Cette surface est représentée sur un plan euclidien de deux dimensions (O, X, Y) comme schématisé à la figure 24. Ce choix vient appuyer l'idée d'avoir plus de contrôle sur les coordonnées et les distances de chaque nœud par rapport au nœud source ainsi que les limites de la surface de simulation.

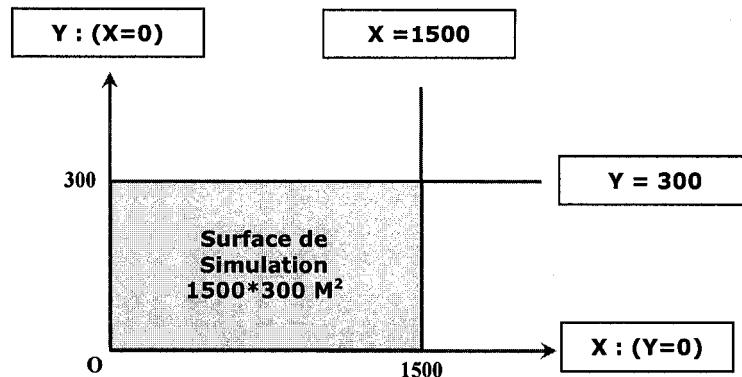


Figure 24: Schéma de la surface de simulation

11.2 PROCÉDURE DE CALCUL DES DISTANCES ET DES COORDONNÉES

Au cours de la simulation, il est important que chaque nœud dispose d'un outil de calcul qui lui permet de connaître la distance exacte qui le sépare de chaque autre nœud qui se trouve à sa portée, ainsi que les frontières qu'il ne doit pas dépasser et qui sont les limites de la surface de

simulation. Pour se faire, on va introduire les notions géométriques de base dans les calculs des distances entre deux points dans un espace euclidien à deux dimensions via l'équation suivante :

$$Distance(A,B) = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2} \quad (1)$$

Sachant que chaque nœud A et/ou B dispose d'un couple de coordonnées (x,y) qui définit sa position sur le plan euclidien (O,X,Y) . Ce couple de coordonnées sera mis à jour au fur et à mesure que le nœud se déplace sur la surface avec une vitesse qui est supposée fixe tout au long la simulation.

En plus, chaque nœud doit avoir un dispositif mathématique pour le calcul périodique de ses frontières de simulation qu'il ne doit pas dépasser. Cela peut être facilement interprété par un simple vecteur de direction qui oriente le nœud vers la limite de la surface selon sa vitesse. Ce vecteur de mouvement fera l'objet d'un paramètre primordial pour la détection du premier point d'intersection entre la trajectoire du nœud et le premier axe de la surface. La première étape consiste à dessiner la droite (D) à la position de ce nœud comme point $P_I(x_I,y_I)$ et le vecteur de vitesse comme vecteur de direction $\vec{V}(a,b)$. Ensuite, et selon le vecteur de direction, il faut trouver le premier point (plus proche) d'intersection entre la droite (D) et un des axes désignant les frontières de la simulation ($y = 0$, $x = 0$, $x = 1500$, $y = 300$) (Figure 25). On résout le système d'équations à deux inconnus (x_I,y_I) qui sont les coordonnées du point d'intersection P_i .

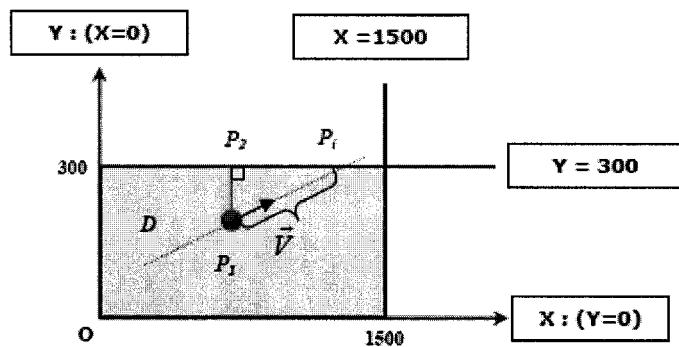


Figure 25: Schéma de calcul des distances par rapport aux axes de la surface.

11.3 STRUCTURE DES NŒUDS, DES ZONES ET DES PAQUETS

11.3.1 Structure des nœuds

L'ensemble des nœuds sont semblables, leur structure est la même pendant toute la période de simulation. Chaque nœud du réseau ad hoc mobile stocke à son niveau une structure d'objets contenant les caractéristiques suivantes (Figure 26) :

- **Vitesse** : C'est la vitesse de déplacement de tous les nœuds tout au long la simulation. Elle est constante, mais on peut la changer à chaque simulation afin d'évaluer son effet sur la performance des nos algorithmes.
- **Catégorie** : Chaque nœud doit être en mesure de s'identifier comme un nœud Multicast ou nœud intermédiaire ou nœud neutre.
- **Table de routage** : L'ensemble des nœuds actifs dans la communication de groupe (nœud Multicast, nœud source, nœud intermédiaire) doit posséder des tables de routage contenant les tracés de chemins vers les nœuds adjacents ainsi que l'information sur la séquence qui doit être à jour. Cette même table de routage va servir comme table de routage pour les nœuds Multicast qui seront élus comme leader de groupe.
- **Cordonnées** : Périodiquement, un nœud doit être en mesure de savoir ses coordonnées sur le plan de simulation, ainsi il peut calculer ces prochaines coordonnées par rapport à son vecteur de direction et sa vitesse.
- **Direction** : Le nœud, depuis sa position à l'initialisation de ces coordonnées, dispose d'un vecteur de direction qui désigne sa trajectoire.

- **Identifiant zone** : Les nœuds appartenant à une zone dense sont marquées par l'identifiant de cette même zone dans un champ ZONE_ID qui se trouve dans leurs table de routage, dans le but d'identifier les mêmes nœuds Multicast de la même zone.

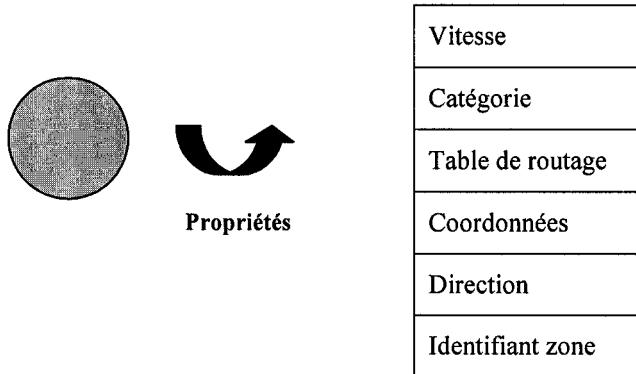


Figure 26: Schéma des propriétés d'un nœud mobile.

11.3.2 Structure des zones

Les zones sont un découpage adopté pour en faciliter leur identification de chacune d'une façon autonome et indépendante sans pour autant impliquer la source ou un autre nœud pour gérer l'identification de ces zones. La surface de simulation sera découpée en plusieurs zones de tailles identiques, et chaque zone constitue une cellule semblable à celle dans un tableau à deux dimensions (Figure 27). En conséquence, chaque zone sera identifiée par sa position par rapport aux deux axes (horizontal et vertical), ce qui mène à dire que chaque zone est identifiée par $Z_{i,j}$.

Une zone doit avoir des mécanismes propres à elle pour identifier ses paramètres qui sont :

- **Nombre de nœuds** : un champ contenant le nombre de nœuds dans la zone.
- **Nombre de nœuds Multicast** : un simple compteur indiquant le nombre de nœuds Multicast que possède la zone.
- **Type de zone** : ce paramètre indique si la zone est dense ou pas.
- **Identifiant de la zone** : la position (i,j) de la zone.

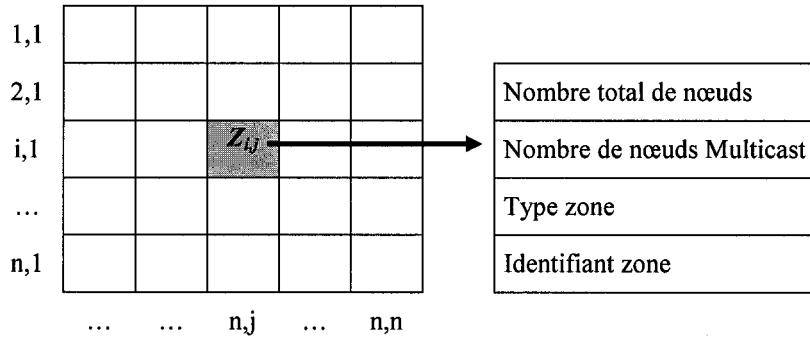


Figure 27: Découpage de la surface de simulation en zones avec ses propriétés.

11.3.3 Structure des paquets

Comme nos simulations seront portées à donner une comparaison entre notre approche «DZ-MAODV» qui utilise MAODV comme technique de routage et MAODV lui même, nous avons adopté les mêmes structures de paquets de données et de contrôle selon le *draft* du protocole de routage *Multicast Ad hoc On-Demand Distance Vector* (MAODV) [29].

La liste des paquets utilisés dans notre schéma de simulation est la suivante :

- *Route Request (RREQ)*.
- *Route Reply (RREP)*.
- *Multicast Activation (MACT)*.
- *Group Hello (GRPH)*.

Cependant, on a ajouté deux paquets pour la gestion des communications au niveau de chaque zone dense entre le leader et l'ensemble des nœuds voisinant cette zone. Ces paquets ont le même rôle que les paquets (*RREQ*, *RREP*) transmis au sein du réseau à l'exception de deux champs indiquant l'adresse du nœud leader et l'identifiant de la zone dense.

11.3.3.1 Format de paquet *RREQ* entre (leader, les nœuds hors de sa zone)

Il est utile de rajouter un type de paquet *RREQ* spécifique à chaque nœud leader d'une zone dense qui désire communiquer avec les nœuds qui existent à l'extérieur de sa zone ou même les autres leaders de zones denses. Ce nouveau format de paquet est identique au paquet *RREQ* standard à l'exception de deux champs identifiant la zone à laquelle appartient le leader ainsi que l'adresse de ce dernier (Figure 28).

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1						
Type	J	R	G	Champ réservé										Nombre de sauts													
Champs spécifiés comme AODV ...																											
Adresse Zone Dense										Leader IP Adresse																	

Figure 28: Structure du paquet *RREQ* entre (leader, nœuds hors de sa zone).

Le tableau suivant explique le rôle de chaque champ dans le paquet (Tableau 6).

Type	1 = <i>RREQ</i> , c'est un message de requête pour la découverte du chemin.
J	<i>Join flag</i> : mis à jour quand le nœud veut joindre un groupe Multicast.
R	<i>Repair flag</i> : mis à jour quand le nœud veut lancer une réparation pour relier deux parties précédemment débranchées de l'arbre Multicast.
G	<i>Gratuitous RREP flag</i> : Indique si un <i>RREP</i> gratuit devrait être envoyé d'une façon Unicast au nœud.
Champ réservé	Envoyé en tant que 0; ignoré à la réception.
Nombre de sauts	Le nombre de sauts depuis la création de la requête, incrémenté à chaque passage d'un nœud intermédiaire.
Champs réservés...	Les champs standards d'une requête <i>RREQ</i> comme : <ul style="list-style-type: none"> - <i>RREQ ID</i>. - L'adresse IP du destinataire. - La séquence ID du destinataire. - L'adresse IP d'émetteur. - La séquence ID du l'émetteur.
Adresse Zone Dense	L'identifiant de la zone dense.
Leader IP Adresse	L'adresse IP du nœud leader de la zone dense.

Tableau 7: Tableau des champs du paquet *RREQ* entre (leader, nœuds hors de sa zone).

11.3.3.2 Format de paquet RREP entre (leader, les nœuds hors de sa zone)

De la même manière, on définit le format d'un paquet de réponse *RREP* d'un nœud quelconque vers le nœud leader ayant envoyé une requête de découverte de route *RREQ*. Si le nœud répondant se trouve être un leader d'une autre zone dense alors il doit à son tour compléter les champs relatifs à son identification comme l'identifiant de la zone et l'adresse du nœud leader de cette zone (Figure 29).

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1								
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1								
Type	R	Champ réservé											Nombre de sauts																
Champs spécifiés comme AODV ...																													
Adresse Zone Dense											Leader IP Adresse																		

Figure 29: Structure du paquet RREP entre (leader, nœuds hors de sa zone).

L'ensemble des champs constituant le paquet *RREP* reste le même à l'exception de quelques changements spécifiques à la nature de ce dernier (Tableau 7).

Type	2 = <i>RREP</i> , c'est un message de réponse à une requête pour la découverte du chemin.
R	<i>Repair flag</i> : mis à jour si la réponse est une action pour réparer un lien déjà interrompu pendant la communication Multicast.
Champ réservé	Envoyé en tant que 0; ignoré à la réception.
Nombre de sauts	Le nombre de sauts jusqu'à l'arrivée du paquet au récepteur (demandeur), généralement c'est le même nombre de sauts que celui indiqué dans un paquet <i>RREQ</i> .
Champs réservés...	Les champs standard d'une réponse <i>RREP</i> comme : <ul style="list-style-type: none"> - L'adresse IP du destinataire. - La séquence ID du destinataire. - L'adresse IP d'émetteur. - La durée (<i>LifeTime</i>) indique le temps d'expiration ou de suppression de l'itinéraire.
Adresse Zone Dense	L'identifiant de la zone dense.
Leader IP Adresse	L'adresse IP du nœud leader de la zone dense.

Tableau 8: Tableau des champs du paquet RREP entre (leader, nœuds hors de sa zone).

11.4 PROCÉDURE DE GESTION DE LA MOBILITÉ

La mobilité des nœuds est un processus très complexe, ce qui fait accroître le niveau de complexité dans la gestion globale des réseaux ad hoc mobiles. Ceux-ci expérimentent des changements dans la qualité de service offerte par le réseau.

L'ensemble des nœuds mobiles possède une vitesse de mouvement qui est constante tout au long de chaque simulation, et une direction de déplacement qui est variable et qui diffère d'un nœud à un autre.

Durant nos programmes de simulation, certains paramètres variables comme la direction de déplacement et la répartition des nœuds sur la surface sont gérés par le biais des distributions statistiques comme la loi Normale. Afin d'introduire la notion de variation aléatoire sur ces phénomènes, et pour projeter une image semblable le plus possible à celle qui existe dans la réalité.

11.4.1 Fonction de répartition des nœuds

Au début de chaque simulation, la répartition des nœuds sur la surface est gérée par une fonction génératrice de couples aléatoires de coordonnées `Noeud_position` (coordonnées X, coordonnées Y) comme suit :

On suppose que la position de chaque nœud est une vecteur aléatoire (x,y) uniformément distribué sur l'intervalle $[0,1500]*[0,300]$ ou les composantes x et y sont indépendantes.

Le choix de la distribution uniforme sur les axes est justifié par le fait que la probabilité qu'un nœud se trouve dans une position définie est la même: $\forall i \in \{Noeuds\} : P(i) = P$

Cette fonction aura comme rôle d'initialiser les coordonnées de chaque nœud. Le résultat de cette dernière sera un tableau à deux dimensions contenant les coordonnées de chaque nœud $N_i(x_i, y_i)$ compris dans l'espace de simulation, satisfaisant ainsi la contrainte suivante pour chaque nœud (point) N:

$$\begin{cases} \forall x_i, \text{Abscisse de la position du noeud } N \text{ selon l'axe (OX)} : 0 \leq x_i \leq 1500 \\ \forall y_i, \text{Ordonnée de la position du noeud } N \text{ selon l'axe (OY)} : 0 \leq y_i \leq 300 \end{cases}$$

Ces deux contraintes doivent être satisfaites même pendant le déplacement des nœuds durant la simulation. Cela peut être vérifier périodiquement par le calcul des distances entre le nœud et le premier axe d'intersection parmi les axes suivants : $x=0, y=0, y=300, x=1500$.

Une fois que le nœud mobile a atteint un axe parmi ceux-ci, on doit lui attribuer d'une façon aléatoire un nouveau vecteur de direction avec la même vitesse de circulation. Si cette trajectoire, fait l'objet d'une collision avec un ou plusieurs autre nœuds, la perte des paquets de contrôle et de données est imminente. Ainsi, chaque nœud faisant partie de cette collision se fera régénéré une nouvelle direction avec la même vitesse.

11.4.2 Fonction de répartition des directions

Les trajectoires des nœuds (directions) sont réparties d'une façon aléatoire selon une distribution uniforme. Chaque nœud N se fait attribué un vecteur de direction $\vec{D}(a, b)$ dont les composantes sont indépendantes et générées selon une distribution uniforme sur l'intervalle $[0, 1500] * [0, 300]$ afin de spécifier l'orientation de la trajectoire durant la simulation.

Comme la vitesse des nœuds appliquée pendant les simulations peut être représentée par le vecteur \vec{V} (norme constante), alors on peut rendre le vecteur de direction comme vecteur unitaire pour normaliser la vitesse de déplacement \vec{V} en procédant au calcul suivant :

Soit \vec{U} le vecteur normé du vecteur de direction \vec{D} à partir de la position du nœud N donnée par les composantes (x,y) :

On aura :

$$\vec{U} = \frac{(a-x, b-y)}{\sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2}} \quad (2)$$

D'où le vecteur de vitesse s'écrit de la façon suivante :

$$\vec{V} = V * \vec{U} \quad (3)$$

11.5 GESTION DU PROCESSUS DE SIMULATION

Comme la gestion du processus de simulation est une tâche difficile où il faut tenir compte de plusieurs paramètres simultanément. La caractéristique parallèle des événements fait en sorte que la simulation soit gérée d'une façon distribuée indépendamment des spécificités matérielles ou logicielles qui l'entourent. Cela peut être traduit par la simple utilisation d'un langage de programmation qui permet l'exécution parallèle de plusieurs processus durant la simulation.

Le Visual C++.Net, est un langage de programmation complètement parallèle. Ces points forts sont la possibilité de réalisation d'un ensemble de procédures complexes utilisant parfois des fonctionnalités basic en C faisant appel à des fonctions systèmes et réseaux.

Notre programme de simulation WinDZ-MAODV, est une séquence de procédures corrélées qui exécutent en même temps deux simulations distinctes complètement indépendantes et parallèles, une destinée pour notre protocole de référence MAODV (*Multicast Adhoc On Demand Vector*) et l'autre pour notre protocole proposé DZ-MAODV (*Dense Zone Multicast Adhoc On Demand Vector*) que l'on va tester et évaluer les performances par rapport au protocole de référence MAODV.

Les processus élémentaires de simulation sont gérés dans une capsule de timing de 900 secondes, durant laquelle une communication de groupe sera initiée entre un nœud source et un ensemble de nœuds désirant adhérer à cette session Multicast. Pendant cette session, des zones denses seront constituées selon l'approche à trois phases et à chaque fois, un nœud Multicast sera élu comme leader pour chaque zone selon l'algorithme d'élection du leader [31].

Le nœud source aura comme rôle de maintenir une table de routage à jour. Cette table contient les tracés de chemins vers les nœuds leaders au sein des zones denses ainsi que les nœuds Multicast indépendants. Ceci va être géré de la même façon qu'une communication Multicast via le protocole MAODV. D'où la nécessité de l'utilisation des mêmes formats de paquets adoptés pour ce dernier.

Une gestion particulière sera mise en place pour les transferts de données à l'intérieur des zones denses ou chaque leader de groupe doit maintenir au sein de sa propre table de routage *Multicast Route Table* les chemins vers l'ensemble des nœuds Multicast de sa zone, en plus des routes vers le nœud source et les nœuds leaders des zones adjacentes du fait qu'il se trouve parfois qu'une zone soit intermédiaire entre deux autres ou entre le nœud source et une autre zone dense.

11.6 PARAMÈTRES DE SIMULATION

L'architecture de simulation adoptée dans ce projet est en pleine conformité avec l'ensemble des simulations utilisées pour l'évaluation des protocoles de routage Multicast au sein des réseaux ad hoc mobiles. Une plate-forme est entièrement développée en Visual C++.Net pour simuler nos algorithmes. Ce choix a été fait dans le but d'avoir plus de contrôle sur le processus de simulation entre toutes ses tâches élémentaires, telles que la recherche des routes, le transfert des paquets et les mises à jour au niveau des tables de routage.

Le modèle de simulation est basé sur un réseau de 50 nœuds positionnés d'une façon aléatoire sur une surface de 1500m * 300m [14].

Les nœuds se déplacent dans un espace à deux dimensions selon un modèle de distribution aléatoire sans aucun temps d'arrêt (*Time Pause*). Chaque nœud se déplace d'une position aléatoire à une destination aléatoire avec une vitesse constante tout au long de la simulation, cette vitesse sera variée entre 0 et 20m/s à chaque nouvelle simulation dans le but de mesurer l'impact de la mobilité sur les performances de notre algorithme.

Le modèle radio est basé sur le produit WaveLAN 802.11 de Lucent technologies [27], qui fournit un taux de transmission de 2 Mbps et une portée de transmission équivalente à 250m pour chaque nœud. Chaque nœud se déplace avec une direction et une vitesse et doit maintenir ses deux paramètres jusqu'à ce qu'il atteigne un obstacle qui est soit une des frontières de la surface de simulation représentée par un des quatre droites suivantes : ($x = 0, y = 0, x = 1500, y = 300$), ou simplement une collision avec un autre nœud mobile. Pour laquelle, il va se faire attribuer une nouvelle direction tout en préservant la même vitesse. Notre modèle ne tient pas compte de la collision des paquets; si un tel cas se produit, une perte totale des paquets sera observée.

Chaque simulation dure 900 secondes. Des simulations multiples ont été conduites avec différentes valeurs de vitesse (0, 5, 10, 15, 20) m/s pour chaque scénario. Les membres du groupe Multicast sont choisis arbitrairement parmi les nœuds du réseau, le nœud source produit un trafic continu (*Constant Bit Rate*) CBR à un débit de 10 paquets/seconde, et chaque paquet à une taille de 64 octets afin d'éviter la congestion de réseau [11]. Notre processus compare les résultats de simulations du protocole de référence MAODV avec celles obtenues via le nouveau protocole DZ-MAODV.

Dans l'objectif de faciliter l'identification des zones denses, la surface de simulation est divisée en plusieurs zones de tailles égales (10m * 10m). Chaque zone est identifiée comme une cellule d'un

tableau à deux dimensions $Z[N_ligne, N_Colonne]$. Ainsi, l'algorithme d'identification des zones dense utilisant les trois critères cités auparavant sera examiné avec chaque zone $[i,j]$.

12 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS DES SIMULATIONS

Les simulations sont réalisées avec une multitude de scénarios qui prennent en compte la variation de la vitesse des noeuds et la variation de la répartition de ces derniers sur la surface de simulation afin de diversifier les résultats obtenus, pour pouvoir juger la pertinence de l'approche théorique et de donner une évaluation plus juste et plus générale de ce protocole de routage conçu de façon complètement distribuée.

12.1 MÉTRIQUES ET RATIOS

Comme toutes les simulations sont identiques pour le protocole de routage MAODV qui représente le protocole de routage de référence et le nouveau protocole DZ-MAODV qui garde les mêmes spécificités du protocole initial MAODV en ajoutant l'aspect de concentration en zones denses, alors on doit mesurer les performances à travers les critères d'évaluation suivants :

- Délai moyen de transfert des paquets de données.
- Nombre de paquets de contrôle générés durant la simulation.

Cependant, d'autres métriques standards représentées sous forme de ratios qui sont suggérées par le groupe de travail MANet (IETF), sont calculées pour apporter un jugement complet sur les performances du nouveau protocole. Ces ratios sont définis comme suit :

- **Rapport de livraison de paquets** : Le rapport du nombre de paquets réellement livrés aux destinations sur le nombre de paquets de données censés être reçus. Ce nombre représente l'efficacité d'un protocole dans l'envoi des données aux récepteurs prévus à travers le réseau.

- **Nombre de paquets de données transmis par paquet de données reçu:** Le nombre de "paquets de données transmis" est le compteur de chaque transmission individuelle des données pour chaque nœud dans le réseau. Ce compteur le nombre de paquets retransmis par des nœuds intermédiaires.
- **Nombre de paquets de contrôle transmis par paquet reçu:** Cette mesure montre les frais générés en terme de nombre de paquets de contrôle émis pour garantir la livraison d'un paquet de données à un récepteur prévu.
- **Nombre de paquets de contrôle et de paquets de données transmis par paquet de données reçu :** Cette mesure exprime la consommation en matière de bande passante (canal de communication) pour chaque paquet de données reçu.

12.2 GRAPHES ET ANALYSES

Les résultats obtenus sont schématisés par des graphes incluant chacun deux courbes destinées respectivement pour les protocoles de routage MAODV et DZ-MAODV. Chaque graphe représente un ratio d'évaluation selon une vitesse de nœuds spécifique.

12.2.1 Le ratio de livraison de paquets

Ce ratio mesure l'efficacité du protocole de routage dans l'envoi des paquets de données d'une source vers un nœud du groupe Multicast par le calcul du rapport ($R = \text{Nombre de paquets de données reçus} / \text{Nombre de paquets de données censés être reçus}$). Ce ratio est inclus dans l'intervalle $[0,1]$. Plus R converge vers 1, plus le protocole est efficace. La réciproque $(1-R)$ exprime le taux de perte de paquets de données durant la transmission.

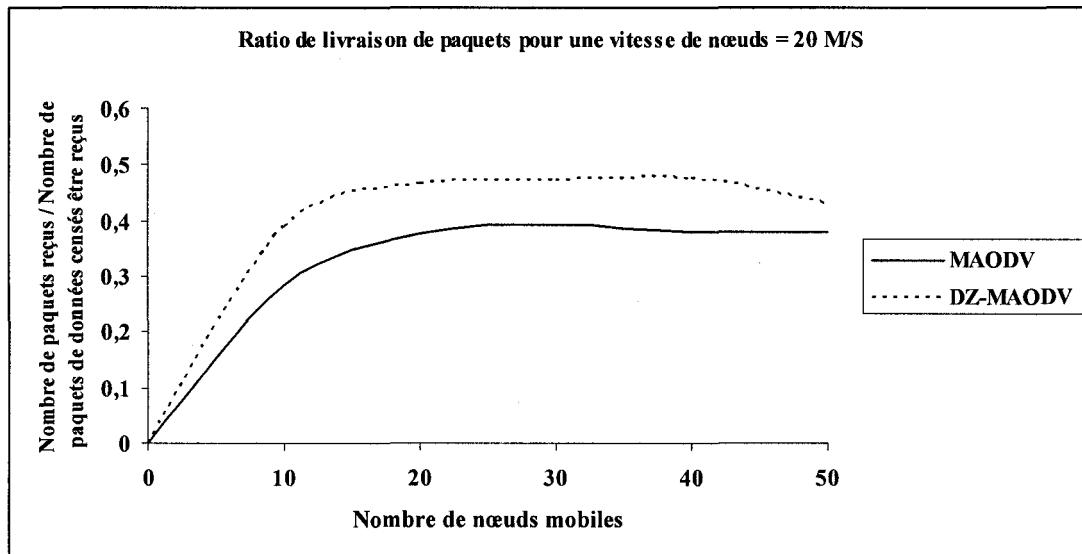


Figure 30: Ratio de livraison de paquets de données pour une vitesse de nœuds de 20 M/S.

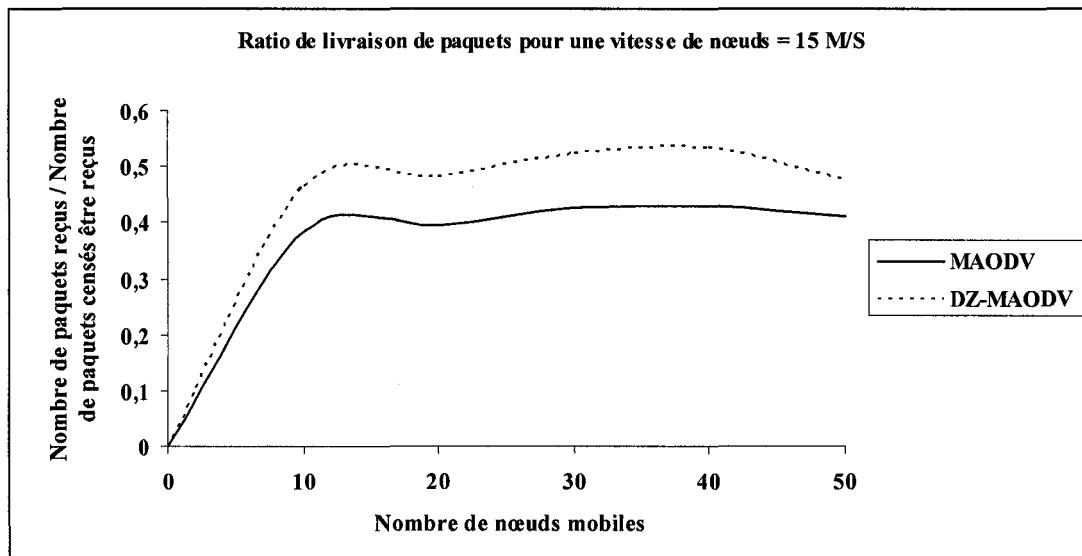


Figure 31: Ratio de livraison de paquets de données pour une vitesse de nœuds de 15 M/S.

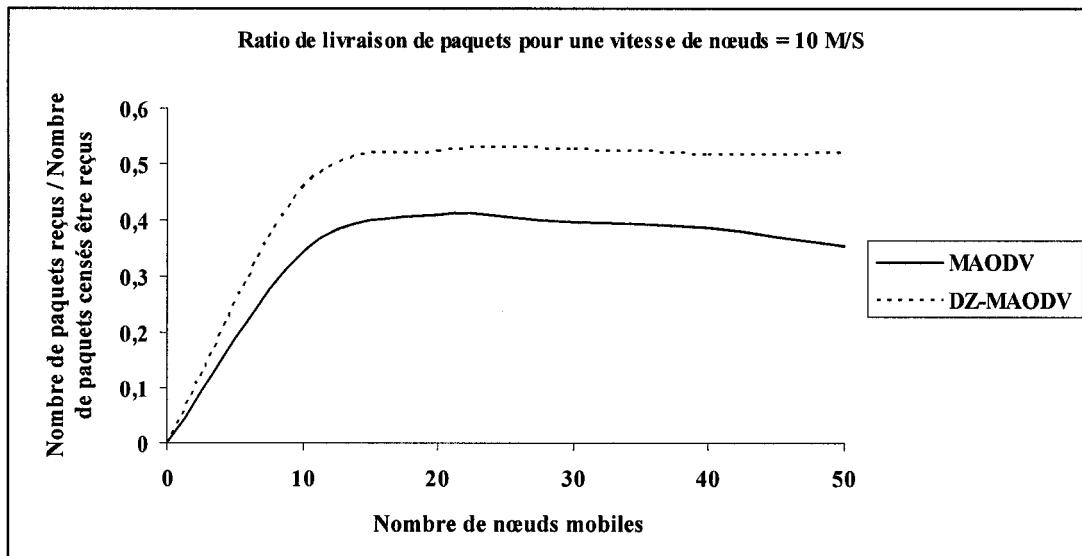


Figure 32: Ratio de livraison de paquets de données pour une vitesse de nœuds de 10 M/S.

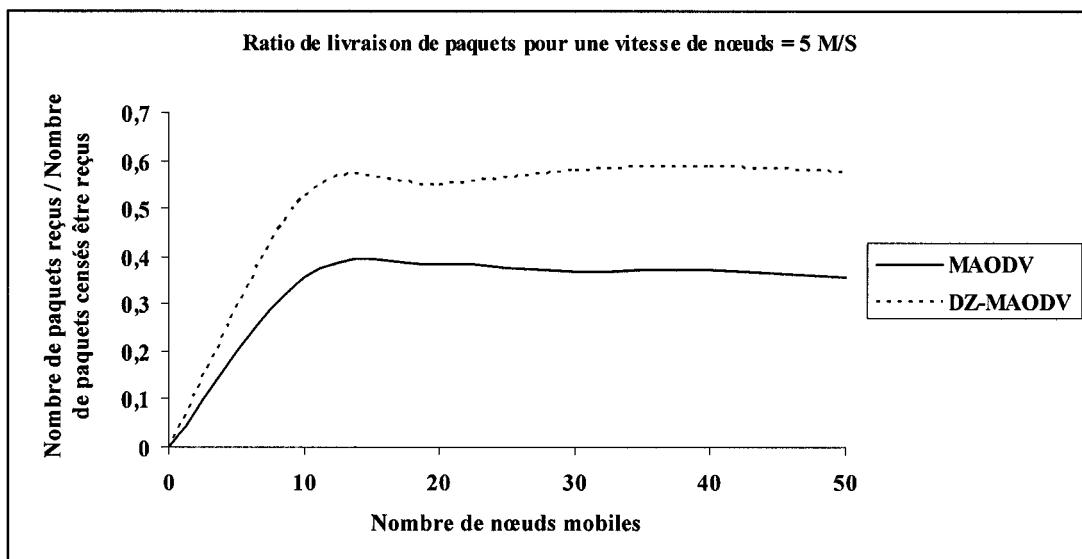


Figure 33: Ratio de livraison de paquets de données pour une vitesse de nœuds de 5 M/S.

Analyse:

À la première vue des graphes indiquant le ratio de livraison de paquets pour des différentes vitesses de nœuds Figures 30, 31, 32 et 33, on remarque que le rapport (Nombre de paquets de données reçus/ Nombre de paquets de données censés être reçus) pour DZ-MAODV diminue à chaque fois que la mobilité (vitesse) augmente. Cependant, les valeurs du ratio sont presque identiques pour MAODV (voisinant 40%) malgré les variations de vitesses. Contrairement à DZ-MAODV, qui marque une meilleure efficacité de livraison de paquets de données en voisinant les 60% (Figure 33). Ceci est expliqué par le fait que la nature dynamique du réseau dépend aussi de la localisation des nœuds à l'intérieur. C'est pourquoi, DZ-MAODV donne de meilleurs résultats que MAODV pour sa stabilité avec un routage décentralisé qui assure une plus longue vie pour son arbre avec moins de perte de paquets de données. Si le nombre de nœuds est petit, alors le réseau est peu peuplé et par conséquent, la connectivité des nœuds est basse.

12.2.2 Le ratio du nombre de paquets de données transmis par paquet de données reçu

Ce ratio démontre le surflux de paquets de données générés par la source émettrice pour une seule transmission individuelle destinée à un seul nœud. Ce facteur illustre la capacité de surcharge du réseau traduit par la circulation de paquets redondants. Les valeurs que peuvent prendre ce ratio sont incluses dans l'intervalle $[1, \infty[$. Si la valeur du ratio tend vers 1, le protocole est optimal.

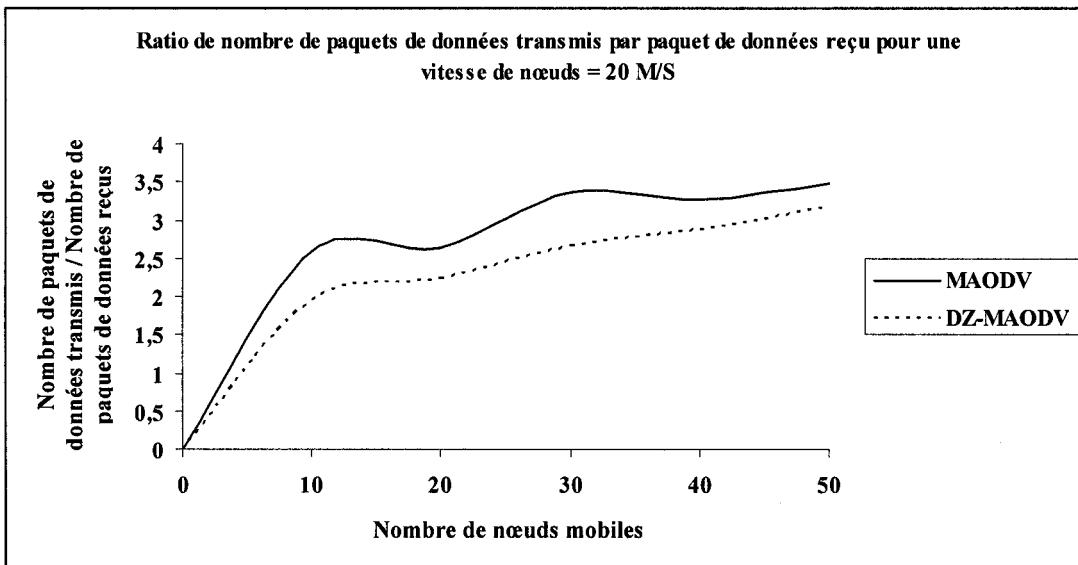


Figure 34: Le nombre de paquets de données transmis par paquet de données reçu avec une vitesse de nœuds de 20 M/S.

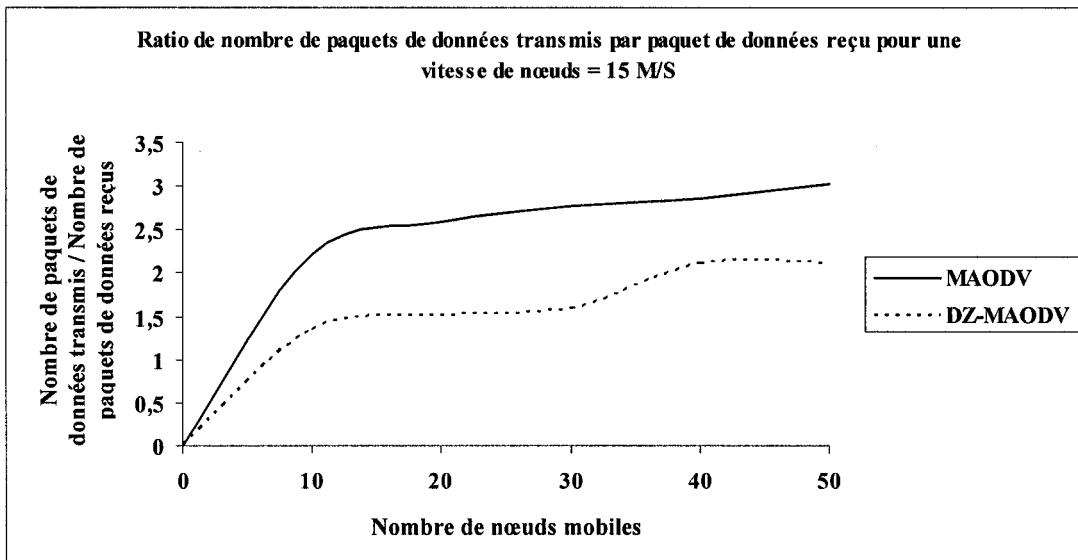


Figure 35: Le nombre de paquets de données transmis par paquet de données reçu avec une vitesse de nœuds de 15 M/S.

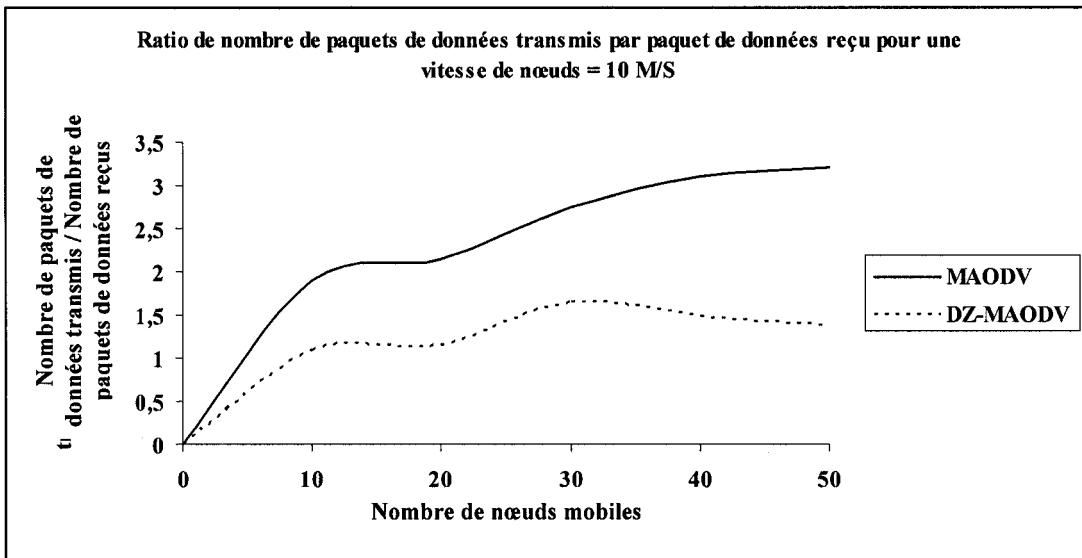


Figure 36: Le nombre de paquets de données transmis par paquet de données reçu avec une vitesse de nœuds de 10 M/S.

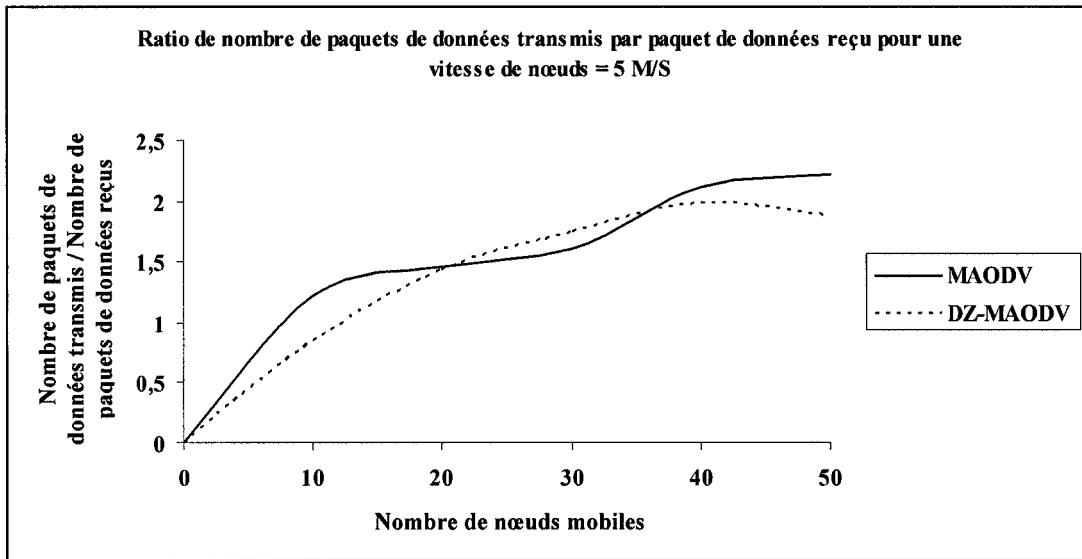


Figure 37: Le nombre de paquets de données transmis par paquet de données reçu avec une vitesse de nœuds de 5 M/S.

Analyse :

D'après les graphes obtenus, l'efficacité de livraison est plus observée chez DZ-MAODV que chez MAODV. Dans les $\frac{3}{4}$ des cas, on observe moins de deux paquets de données transmis pour un paquet reçu avec DZ-MAODV, ce qui s'explique par les diffusions (*Broadcast*) directes au sein des zones denses au lieu des transmissions en Unicast (MAODV) qui font appel à des retransmissions via des nœuds intermédiaires parfois inutiles, ce qui engendrent souvent la perte de ces paquets et la nécessité de leur retransmission figures 34, 35 et 36. À ce niveau, la mobilité joue le rôle d'un obstacle majeur face à la stabilité des arbres de routage. Par conséquent, la recherche de nouveaux chemins s'avère une obligation pour acheminer les données vers les nœuds récepteurs.

12.2.3 Le ratio du nombre de paquets de contrôle transmis par paquet de données reçu

Le présent ratio mesure les dépenses en terme de paquets de contrôle pour chaque paquet de données qui doit être acheminé vers un récepteur donné.

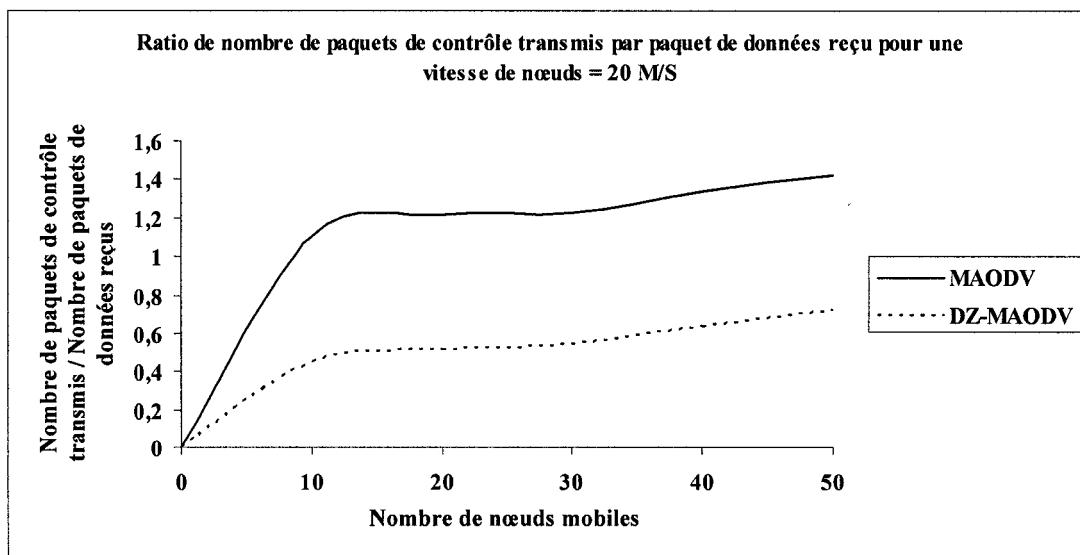


Figure 38: Le nombre de paquets de contrôle transmis par paquet de données reçu avec une vitesse de nœuds de 20 M/S.

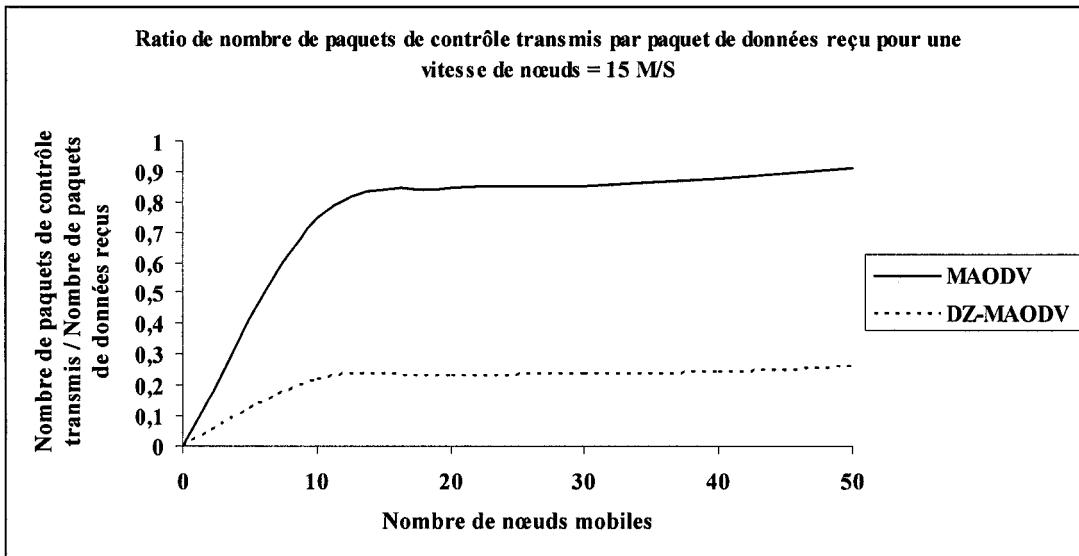


Figure 39: Le nombre de paquets de contrôle transmis par paquet de données reçu avec une vitesse de nœuds de 15 M/S.

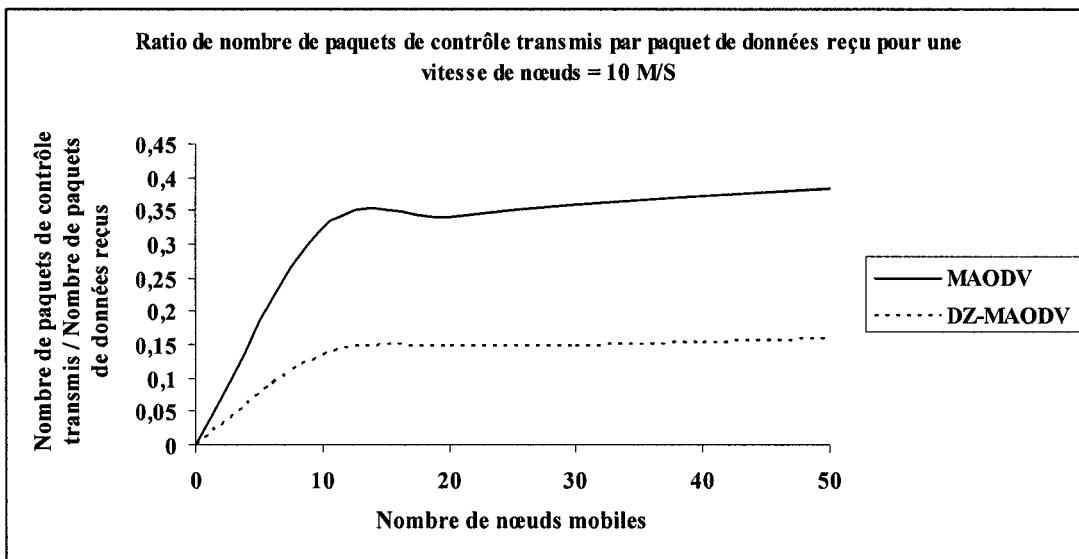


Figure 40: Le nombre de paquets de contrôle transmis par paquet de données reçu avec une vitesse de nœuds de 10 M/S.

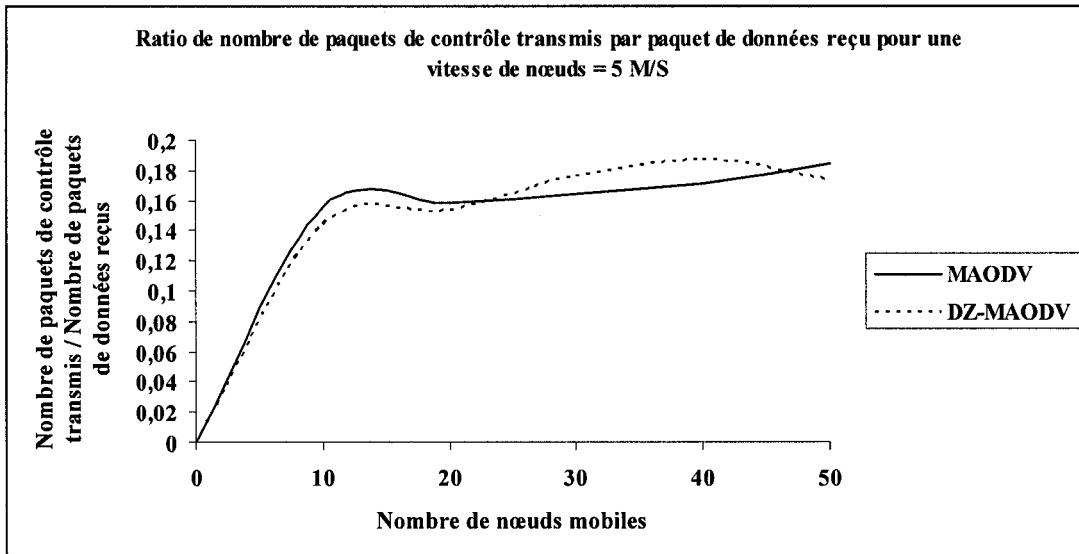


Figure 41: Le nombre de paquets de contrôle transmis par paquet de données reçu avec une vitesse de nœuds de 5 M/S.

Analyse :

Selon la majorité des graphes obtenus pour le calcul de ce ratio, DZ-MAODV réduit le nombre de paquets de contrôle d'une façon remarquable par rapport à MAODV. Pour DZ-MAODV, ce ratio ne dépasse jamais les 20% pour une vitesse de nœuds inférieur à 15 M/S. Contrairement à MAODV qui éprouve une grande faiblesse à gérer les dépenses en terme de paquets de contrôle, ce qui mène souvent à une congestion du réseau une fois le nombre de nœuds à l'intérieur devient important. De ce point de vue, on peut estimer que le protocole de routage DZ-MAODV possède une meilleure capacité de mise à une grande échelle qui lui permet d'inclure un nombre considérable de nœuds mobiles au sein du réseau. Ceci peut être traduit par les communications en *Broadcast* dont il se sert pour envoyer les paquets de données vers les nœuds Multicast se trouvant au sein des zones denses, sans pour autant, avoir recours à des communications Unicast exigeantes en terme de paquets de contrôle.

12.2.4 Le ratio du nombre de paquets de contrôle et de paquets de données transmis par paquet de données reçu

Cette mesure essaie de capturer l'efficacité en terme de consommation globale de la bande passante par le calcul du nombre de paquets de contrôle et de données dépensés pour la livraison d'un paquet de données vers un récepteur Multicast.

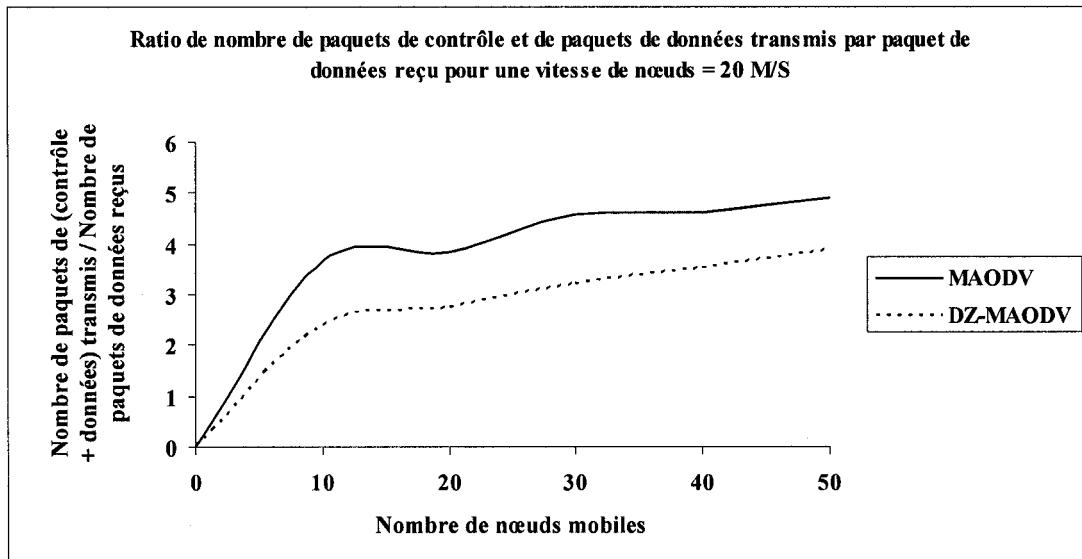


Figure 42: Le nombre de paquets de contrôle et de paquets de données transmis par paquet de données reçu avec une vitesse de nœuds de 20 M/S.

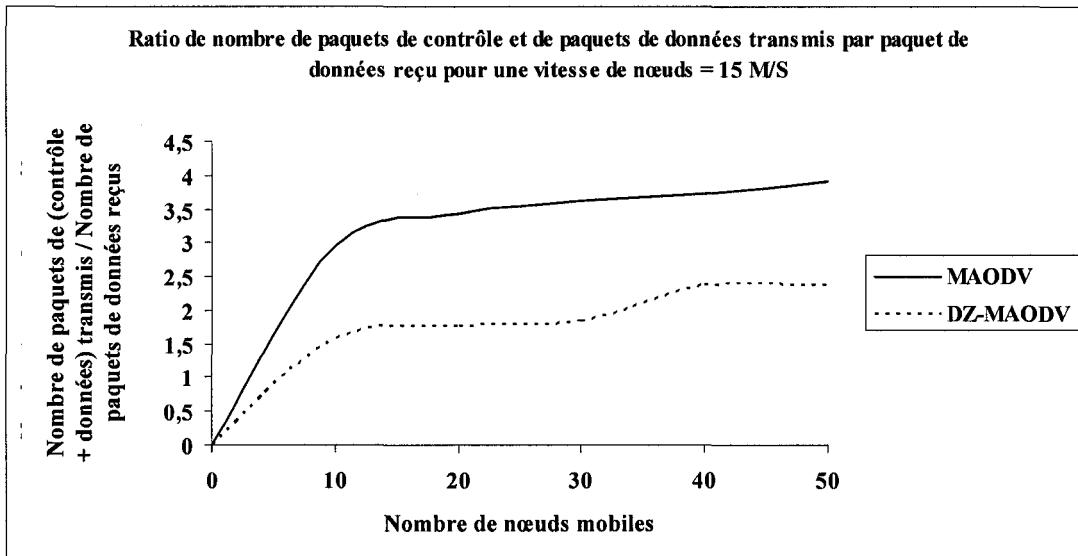


Figure 43: Le nombre de paquets de contrôle et de paquets de données transmis par paquet de données reçu avec une vitesse de nœuds de 15 M/S.

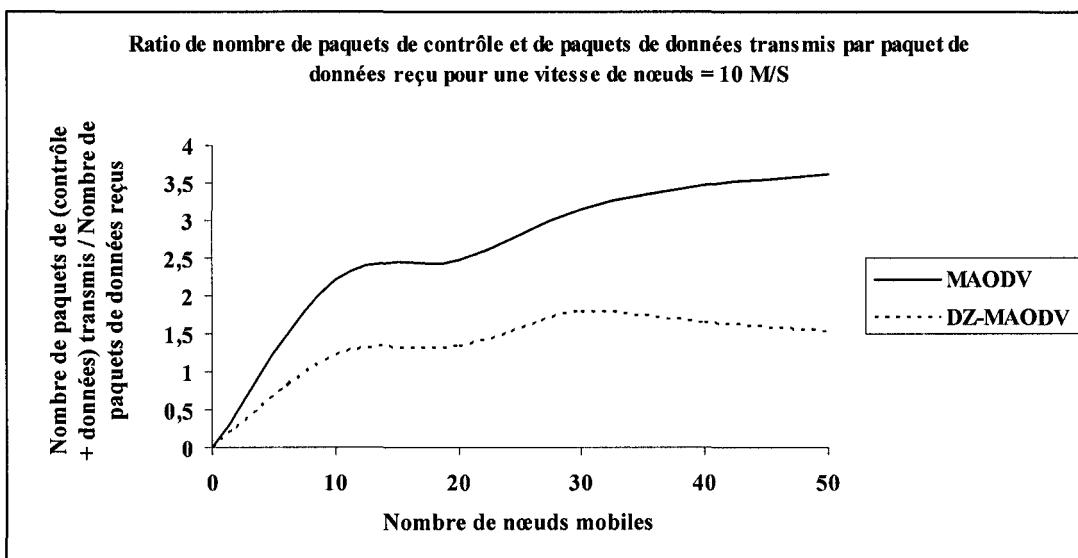


Figure 44: Le nombre de paquets de contrôle et de paquets de données transmis par paquet de données reçu avec une vitesse de nœuds de 10 M/S.

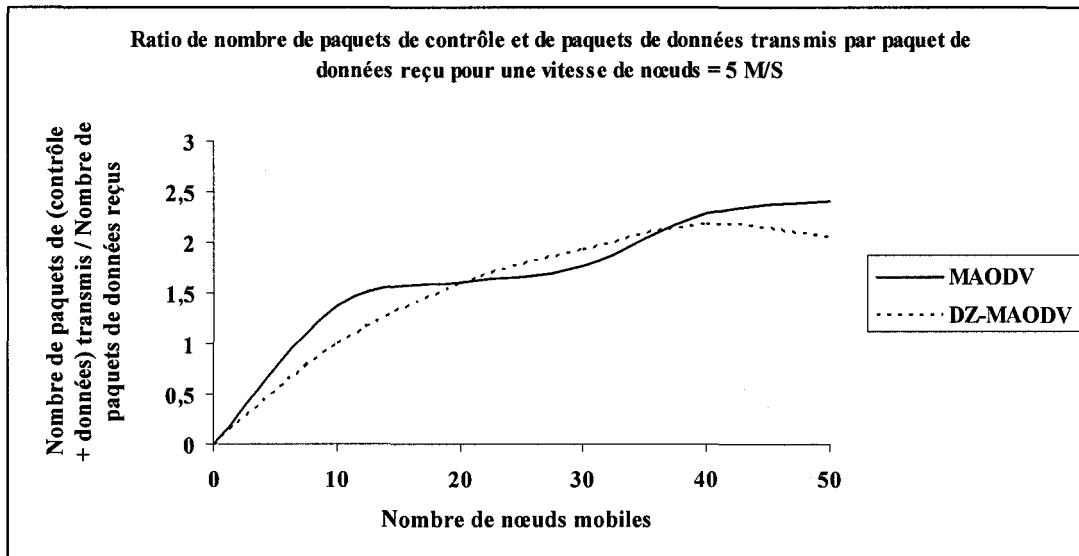


Figure 45: Le nombre de paquets de contrôle et de paquets de données transmis par paquet de données reçu avec une vitesse de nœuds de 5 M/S.

Analyse :

La somme des paquets de contrôle générés avec les paquets de données dupliqués pour l'assurance d'un paquet de données livré, représente la consommation totale en matière de bande passante durant la durée de vie d'une session Multicast au sein du réseau. Plus cette valeur est faible, moins le réseau est congestionné. En effet, plus la vitesse des nœuds mobiles est considérable plus la perte des paquets de données augmente et par conséquence la régénération de ces derniers est imminent ce qui nécessite un nombre plus élevé de paquets de contrôle accompagnant ce processus. Comme le montre les figures 42, 43, 44 et 45, DZ-MAODV prend les devants par rapport à MAODV en matière de consommation de la bande passante (canal) et de congestion du réseau à cause que la majorité des liaisons se font d'une façon directe entre chaque nœud leader et les nœuds Multicast de sa zone dense qui se trouvent à sa portée. Par contre, MAODV, et à travers sa structure centralisée au niveau du nœud source, la perte des

liaisons entre les nœuds Multicast génère une requête d'exploration de chemins qui remonte jusqu'au nœud source, par conséquent, une génération de plusieurs paquets de contrôle qui sont aussi soumis à une probabilité de perte.

12.2.5 Le total de paquets de contrôle dans le réseau

Il est important de compter le nombre de paquets de contrôle générés pendant la durée de vie de la simulation. Cette information permet d'avoir le taux de consommation de la bande passante (canal) en paquets de contrôle.

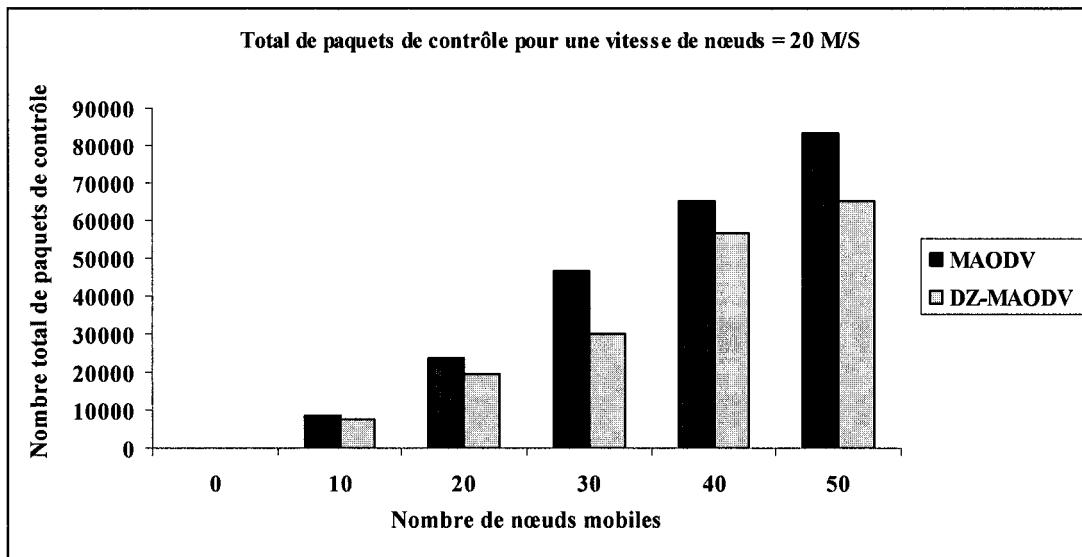


Figure 46: Le nombre total de paquets de contrôle avec une vitesse de nœuds de 20 M/S.

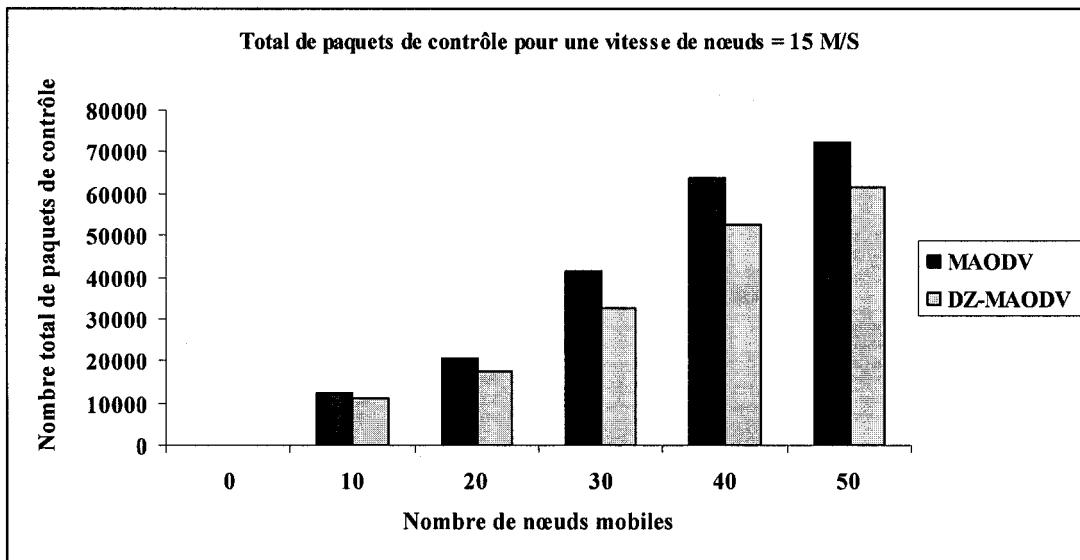


Figure 47: Le nombre total de paquets de contrôle avec une vitesse de nœuds de 15 M/S.

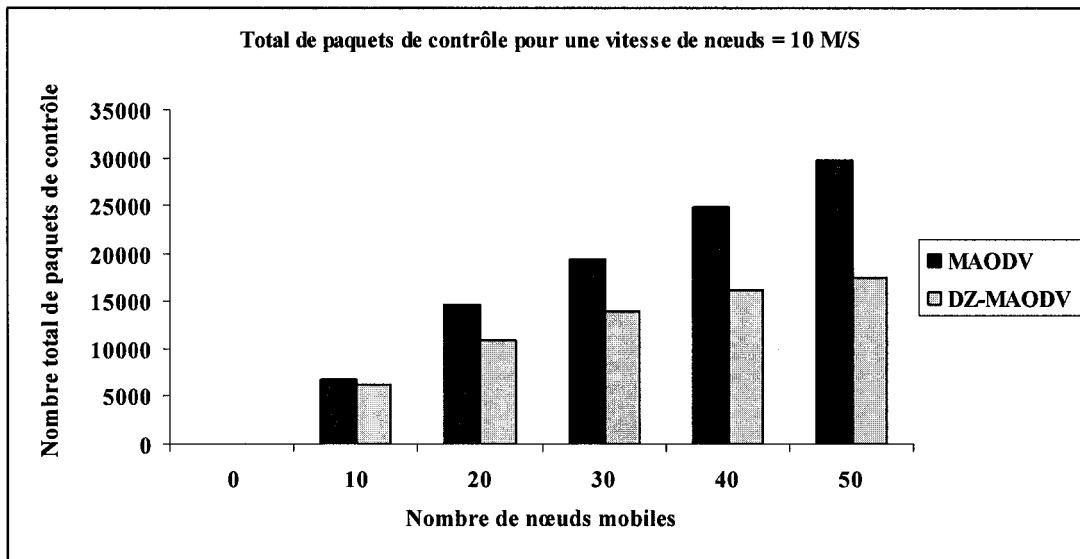


Figure 48: Le nombre total de paquets de contrôle avec une vitesse de nœuds de 10 M/S.

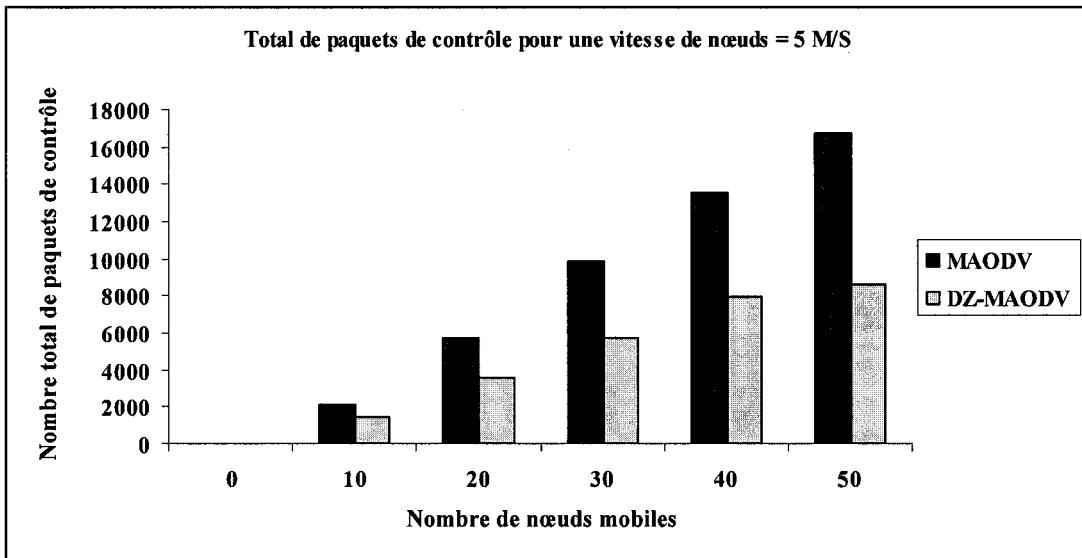


Figure 49: Le nombre total de paquets de contrôle avec une vitesse de nœuds de 5 M/S.

Analyse :

Plus la mobilité est importante, plus le nombre de paquets de contrôle augmente. Car l'augmentation des vitesses de nœuds engendre des coupures fréquentes des liens entre ces derniers, ce qui nécessite la construction de nouveaux chemins pour assurer la continuation du processus de communication au sein du réseau. Cependant, le nombre de paquets de contrôle générés selon MAODV reste plus important que celui remarqué dans DZ-MAODV suite aux arguments cités aux paragraphes 12.2.3 et 12.2.4.

12.2.6 Le temps moyen de transfert de données

Pour chaque vitesse de nœuds, on peut calculer le temps moyen de transfert d'un paquet de données d'une source vers un récepteur. Ce résultat exprime le délai d'attente que doit observer un nœud Multicast pour recevoir le paquet de données. Si le temps d'attente dépasse un *TTL*

(*Time To Live*), le nœud récepteur reformule une nouvelle requête pour le renvoi du paquet en question.

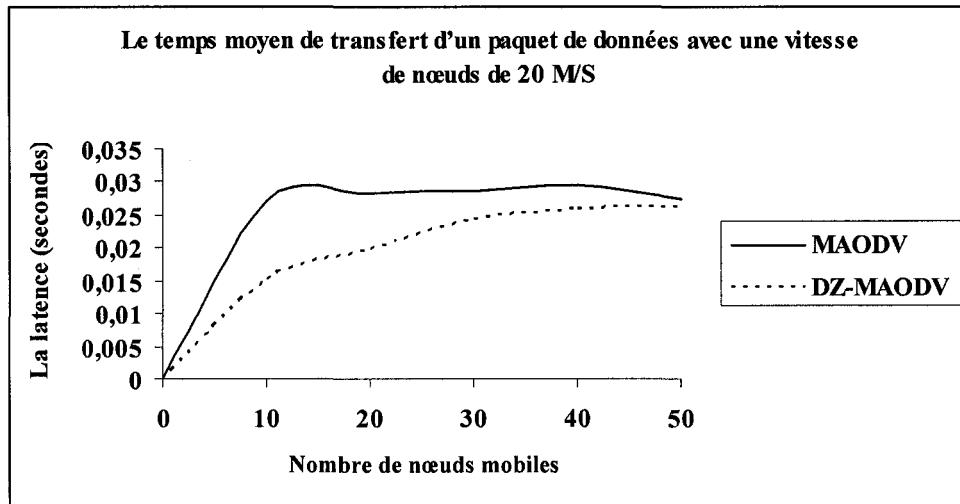


Figure 50: Le temps moyen de transfert d'un paquet de données avec une vitesse de nœuds de 20 M/S.

Analysis :

Il est utile de mesurer la latence en matière de transfert de paquet de données d'un nœud vers un autre à travers le réseau. Cette mesure aurait plus de signification dans des conditions extrêmes, où chaque nœud se déplace à une vitesse voisinant les 20 m/s (Figure 50). Dans une architecture pareille, les coupures de liens et les collisions de nœuds sont très fréquentes. On remarque (Figure 50) que DZ-MAODV prend moins de temps pour le transfert d'un paquet de données vers une destination en employant les routes existantes via les zones denses. En effet, ces routes sont généralement plus stables et presque optimales (minimum de nœuds intermédiaires dans les zones denses), en conséquence, les délais moyens pour le transfert d'un paquet sont plus réduits que ceux dans MAODV, qui sont plus élevés vu la restructuration fréquente des chemins de l'arbre de routage en Unicast avec MAODV, qui est un processus lourd et couteux en terme de délais.

Partie V : CONCLUSION

13 CONCLUSION

Assurer la connexion de tous les nœuds d'un réseau ad hoc mobile, malgré l'absence d'infrastructure et la mobilité de ses stations, est un problème très complexe vu la dynamicité et l'évolution rapide de la topologie. En effet, les unités mobiles sont dynamiquement et arbitrairement éparpillées d'une manière où l'interconnexion peut changer à tout moment. D'où l'exploration d'un chemin (route) menant d'un nœud source vers un nœud destination, demeure un processus itératif qui nécessite une grande souplesse incluant le défi d'atteindre l'optimalité.

De par ce principe, les protocoles de routage pro-actifs ou réactifs essaient de s'adapter aux contraintes imposées par le réseau ad hoc, et cela en proposant une méthode qui soit de moindre coût en capacités et ressources, et qui garantit la survabilité du routage en cas de n'importe quelle coupure de lien ou panne de nœud. Les protocoles de routage proposés jusqu'à présent offrent différents avantages qui sont en réalité complémentaires et préférables pour différents types d'applications. Mais cela reste insuffisant soit par rapport à la complexité des algorithmes employés où parce que certaines techniques favorisent la résolution d'un problème plus que les autres.

C'est pourquoi la stratégie de conception d'un nouveau protocole de routage doit tenir compte de tous les facteurs et limitations physiques imposés par l'environnement afin que la fonctionnalité «routage» ne dégrade pas les performances du système.

Le Multicast constitue une application parmi le spectre d'applications que peut supporter un réseau ad hoc mobile. Son intérêt général réside dans le fait de réduire le nombre d'informations transmises sur les réseaux pour rejoindre plusieurs abonnés à la fois.

La plupart des protocoles de routage Multicast dans les réseaux ad hoc mobiles se basent sur la construction d'arbres ou de mailles, ce qui se révèle très peu adapté à la mobilité. La conception d'un nouveau protocole de routage, qui fait l'objet de ce présent travail, a été guidée non seulement par une nécessité de robustesse, mais aussi par la volonté d'économiser le nombre de messages échangés afin de garantir une meilleure utilisation de la bande passante conjuguée avec une meilleure qualité de transmission.

Notre nouveau protocole de routage DZ-MAODV (*Dense Zone Multicast Adhoc On-demand Distance Vector*) se base sur l'hypothèse que les membres d'un groupe Multicast ont tendance à se regrouper dans des zones géographiques. Ces zones denses sont organisées de manière arborescente et leurs détections se fait via un algorithme distribué. Au sein de chaque zone dense, un procédé est mis en place pour détecter le leader qui se charge de la gestion interne. À l'intérieur d'une zone dense, la communication Multicast est réalisée par une simple diffusion (*Broadcast*). Le travail théorique est basé sur un modèle à deux dimensions. Comme la géométrie joue ici un rôle prépondérant, il serait intéressant de transposer la situation dans un modèle à trois dimensions.

L'ensemble des heuristiques proposées a été simulé sur une plateforme conçue pour l'évaluation des performances du protocole DZ-MAODV par la simple comparaison des résultats obtenus avec celles déjà réalisés en MAODV sous les mêmes conditions de simulation.

La quasi-totalité des graphes obtenus démontrent la robustesse du protocole DZ-MAODV qui se conjugue par sa diminution du nombre de paquets de contrôle ainsi que la réduction des délais de réponses en assurant une bonne qualité de transmission (*QoS*). En plus, DZ-MAODV procure une meilleure stabilité du réseau pendant les sessions de communication Multicast en déléguant les opérations Multicast en grande majorité (adhésion/retrait des membres), aux nœuds leaders au sein des zones denses.

La difficulté majeure rencontrée dans ce projet a été le développement intégral de toutes les composantes du protocole de routage MAODV dans un réseau ad hoc mobile. Cette tâche importante a causé le dépassement de l'échéancier prévu pour la finalisation du projet. Néanmoins, ce désavantage m'a permis de mieux acquérir les notions de la programmation réseau et de bien assimiler les aspects abstraits d'un protocole de routage en général.

Ce modeste travail est loin d'être parfait, mais il peut être considéré comme une petite ouverture vers l'implémentation réelle d'un protocole de routage Multicast au sein d'un réseau ad hoc mobile.

14 PERSPECTIVES

Le présent travail peut être enrichi par l'ajout de la fonctionnalité «sécurité». Ce premier aspect très important représente la méthode employée pour la gestion des clés de cryptage de données entre la source et les nœuds du groupe Multicast. Sa mise en place devrait se faire en parallèle du processus de gestion de routage au sein du réseau. L'idée est donc, d'implémenter un algorithme de calcul de ces clés dans la table de routage Multicast de chaque nœud de façon à attribué pour chacun une clé unique de cryptage de données transmis par la source. Comme notre protocole est conçu dans le but d'alléger la surcharge du nœud source par le biais des nœuds leaders au sein des zones denses, la régénération et la distribution des clés doit être gérée de la même manière pour chaque zone dense.

Un deuxième aspect qui peut être amélioré consiste au développement d'une approche d'identification de zones denses sans faire recours à un découpage au préalable qui délimite l'espace de communication. L'objectif sera de doter chaque zone dense par un mécanisme qui facilite son identification d'une façon dynamique et unique comme le système GPS (*Global Positioning System*) qui fait appel à des techniques de repérage par satellite pour se procurer les coordonnées de chaque objet sur un espace bien défini.

15 BIBLIOGRAPHIE

- [1] C. Adjih, T. Clausen, P. Jacquet, A. Laouiti, P. Minet, P. Muhletaler, A. Qayyum, and L. Viennot, "Optimized link state routing protocol," Internet Engineering Task Force, Internet Draft draft-ietf-manet-olsr-08.txt, Septembre 2003.
- [2] G. Aggelou and R. Tafazolli. "Relative distance micro-discovery ad hoc routing (RDMAR) protocol". IETF, Internet Draft, draft-ietf-manet-rdmr-00.txt, Septembre 1999.
- [3] R. Albrington, J. J. Garcia-Luna-Aceves and J. Boyle. "EIGRP- A fast routing protocol based on distance vectors". Proceeding Networld/Interop 94, Las Vegas, Nevada, Mai 1994.
- [4] K. Al Agha and L. Viennot. "Spatial reuse in wireless LAN networks". Rapport de recherche, réseaux et systèmes, Projet HIPERCOM (INRIA, France), Mai 2000.
- [5] R. Bagrodia, M. Gerla, J. Hsu, W. Su, and S.-J. Lee. "A performance comparison study of ad hoc wireless multicast protocols", Proc. Of the 19th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies, Mars 2000.
- [6] L. Barrière, P. Fraigniaud, L. Narayanan, and J. Opatrny. Robust position-based routing in wireless ad hoc networks with irregular transmission ranges. Wireless Communications And Mobile Computing journal, 2002.
- [7] S. Basagni, I. Chlamtac, V. R. Syrotiuk, and B. A. Woodward. "A distance routing effect algorithm for mobility (DREAM)". In Proceeding of ACM/IEEE MOBICOM'98, Dallas, Texas, Octobre 1998.
- [8] P. Bose, P. Morin, I. Stojmenovic, and J. Urrutia, "Routing with guaranteed delivery in ad hoc wireless networks," ACM/Kluwer Wireless Networks, Novembre 2001.
- [9] G. Chelius and E. Fleury. Routage multicast dans les réseaux ad hoc : l'approche jumbo. In Mobiles-services et réseaux mobiles de 3 ème Génération – Des architectures aux Services – (MS3G), Lyon, France, Décembre 2001.
- [10] G. Chelius and E. Fleury. Performance evaluation of multicast trees in ad hoc networks. RR 4416, INRIA, Mars 2002.
- [11] C. C. Chiang, G. Pei, M. Gerla, and T.-W. Chen. "Scalable routing strategies for ad hoc wireless networks". IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Special Issue on Ad-Hoc Networks, pp.1369-79, Aout 1999.

- [12] E. Cheng, "On-demand multicast routing in mobile ad hoc networks", M.Eng. thèse, Carleton University, Département des systèmes informatiques, 2001.
- [13] S. Corson and J. Macker. "Mobile ad hoc networking (MANET): Routing protocol performance issues and evaluation considerations", RFC 2501, janvier 1999, disponible sur <http://www.ietf.org/rfc/rfc2501.txt>.
- [14] S. R. Das, R. Castaneda, J. Yan, and R. Sengupta. "Comparative performance evaluation of routing protocols for mobile, ad-hoc networks". In 7 th International Conference on Computer Communications and Networks (ICSN), Octobre 1998.
- [15] E. Fleury, Y. Huang, and P. K. McKinley, "On the performance and feasibility of multicast core selection heuristics" Networks, Mars 2000.
- [16] J. Garcia-Luna-Aceves and E. Madruga, "The core assisted mesh protocol," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999.
- [17] M. Gerla, S.-J. Lee, and W. Su. "On-demand multicast routing protocol (ODMRP) for ad hoc networks", Internet Draft, draft-ietf-manet-odmrp-02.txt, 2000.
- [18] Z. Haas, J. Deng, B. Liang, P. Papadimitratos, and S. Sajama, "Wireless ad hoc networks," in Encyclopedia of Telecommunications, J. Proakis, Ed. John Wiley, 2002.
- [19] P. Jacquet, A. Laouiti, P. Minet, and L. Viennot, "Performance of multipoint relaying in ad hoc mobile routing protocols," in Networking 2002, Pise, Italie, 2002.
- [20] P. Johansson, T. Larsson, N. Hedman, and B. Mielczarek, Routing Protocols for Mobile Ad-hoc Networks - A Comparative Performance Analysis, Proceedings of ACM/IEEE MOBICOM'99, Seattle, WA, Aout 1999.
- [21] T. Kunz and E. Cheng, "Multicasting in ad-hoc networks: Comparing MAODV and ODMRP," in Workshop on Ad hoc Communications (European Conference Conference on Computer Supported Cooperative Work), Bonn, Germany, Septembre 2001.
- [22] A. Laouiti, P. Jacquet, P. Minet, L. Viennot, T. Clausen, and C. Adjih, "Multicast optimized link state routing," INRIA, 2003.
- [23] A. Laouiti, A. Qayum, and L. Viennot, "Multipoint relaying: An efficient technique for flooding in mobile wireless networks," in 35th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'2002).
- [24] S. Lee, W. Su, and M. Gerla, "On-demand multicast routing protocol in multihop wireless mobile networks," ACM/Baltzer Mobile Networks and Applications, 2003.
- [25] H. Lim and C. Kim. "Multicast tree construction and flooding in wireless ad hoc networks", Proc. Of the 3rd ACM Int. Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, Aout 2000.

- [26] J. Macker and S. Corson (chairs). "Mobile Ad-hoc Networks (manet)". 2000. Disponible sur <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>.
- [27] E. Madruga and J. Garcia-Luna-Aceves, "Scalable multicasting: The core-assisted mesh protocol," ACM/Baltzer Mobile Networks and Applications, Avril 2001.
- [28] E. Royer, and C. E. Perkins "Multicast operation of the ad-hoc on-demand distance vector routing protocol", Proc. of the 5th ACM/IEEE Annual Conf. on Mobile Computing and Networking, Aout. 1999.
- [29] E. Royer, C. Perkins, Multicast Ad hoc On-Demand Distance Vector (MAODV) Routing. University of California, Santa Barbara Juillet 2000. disponible sur: [draft-ietf-manet-maodv-00.txt](http://www.ietf.org/draft-ietf-manet-maodv-00.txt)
- [30] C. Wu, Y. Tay, and C.-K. Toh, "A multicast protocol for ad hoc wireless networks," in Military communications conference (MILCOM 99). Atlantic City, NJ, USA: IEEE, Novembre 1999.
- [31] A. Zebdi, B. Amar Bensaber, M. Mesfioui. A Lightweight Multicast Routing Approach for Ad hoc Mobile Network Based on Dense Zones. Proceedings of the IASTEAD International Conference. Sept 1-3, 2004, Marbella, Spain.

Annexe de classification des protocoles de routage dans les réseaux Ad hoc mobiles

TYPE	INTITULÉ	
Pro-Active	CGSR Clusterhead Gateway Switch Routing protocol	LCA Linked Cluster Architecture
	DBF Distributed Bellman-Ford routing protocol	MMRP Mobile Mesh Routing Protocol
	DSDV Sequenced Distance Vector routing protocol	OLSR Optimized Link State Routing Protocol
	HSLS Hazy Sighted Link State routing protocol	STAR Source Tree Adaptive routing protocol
	HSR Hierarchical State Routing protocol	TBRPF Topology Broadcast based on Reverse-Path Forwarding routing protocol
		WRP Wireless Routing Protocol
Réactive	ARA Ant-based Routing Algorithm for Mobile Ad-Hoc Networks	DSR Dynamic Source Routing protocol
	ABR Associativity Based Routing protocol	DSRFLOW Flow State in the Dynamic Source Routing protocol
	AODV Ad hoc On Demand Distance Vector routing protocol	FORP Flow Oriented Routing Protocol
	BSR Backup Source Routing protocol	LBR Link life Based routing
	CHAMP CacHing And MultiPath routing protocol	LMR Lightweight Mobile Routing protocol
	LUNAR Lightweight Underlay Network Ad hoc Routing	SSR Signal Stability Routing protocol
	MOR Multipath On-demand Protocol	TORA Temporally-Ordered Routing Algorithm routing protocol
	RDMAR Relative-Distance Micro-discovery Ad hoc Routing protocol	PLBR Preferred link based routing
Hierarchique	CBRP Cluster Based Routing Protocol	HARP Hybrid Ad Hoc Routing Protocol
	CEDAR Core Extraction Distributed Ad hoc Routing	HSR Host Specific Routing protocol
	DDR Distributed Dynamic Routing Algorithm	LANMAR Landmark Routing Protocol for Large Scale Networks
	GSR Global State Routing protocol	ZRP Zone Routing Protocol
	FSR Fisheye State Routing protocol	BRP Bordercast Resolution Protocol
	IARP Intrazone Routing Protocol	IERP Interzone Routing Protocol
Géographique	DREAM Distance Routing Effect Algorithm for Mobility	GLS Geographic Location Service
	LAR Location-Aided Routing protocol	GPSAL GPS Ant-Like Routing Algorithm
	ZHLS Zone-Based Hierarchical Link State Routing	