

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université M'hamed Bougara - Boumerdès



Faculté des Sciences
Département d'Informatique

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Spécialité : Systèmes informatiques et ingénierie du logiciel

Option : Spécifications des logiciels et traitement de l'information

Présenté par : MAHSEUR Mohammed

Thème

Routage dans les réseaux maillés sans fil

Devant le jury de soutenance

M ^r . MEZGHICHE Mohamed	Professeur (UMBB)	Président
M ^{me} . ACHELI Dalila	Maître de Conférences A (UMBB)	Examineur
M ^r . RAHMOUNE Fayçal	Maître de Conférences A (UMBB)	Examineur
M ^r . HABI Idir	Maître de Conférences A (UMBB)	Examineur
M ^r . AIT AOUDIA Samy	Professeur A (ESI)	Rapporteur

Année universitaire 2010/2011

Remerciements

Je remercie mon dieu qui m'a donné la volonté et le courage pour achever ce travail.

Je remercie mon promoteur Monsieur AIT AOUDIA Samy pour l'aide qu'il m'a apporté, ses précieux conseils et ainsi pour sa sympathie durant tout le déroulement de ce travail.

Je remercie également Monsieur MEZGHICHE Mohamed responsable de la post-graduation INFORMATIQUE ET GENIE LOGICIEL pour son aide.

Mes sincères remerciements à Monsieur MERAIHI Rabah pour ses commentaires, remarques et critiques.

Je remercie aussi tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et leur exprime ma profonde gratitude.

Je remercie bien évidemment mes parents, à qui je dédie ce mémoire. Ils m'ont non seulement encouragé et supporté tout au long de mes études mais dans toutes les sphères de ma vie. Un merci particulier à ma femme, qui m'a supportée et encouragée tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Je voudrais aussi remercier mes frères, mes sœurs, mes beaux frères, mes belles sœurs, mes neveux et mes nièces.

Je remercie également mes amis qui me permettent de garder un équilibre de vie en alliant études, travail et loisir pour leur soutien durant la période de rédaction de ce mémoire.

Je remercie tous mes enseignants et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de mon travail.

A tous ceux que j'aime, et à tous ceux qui m'aiment...

Pour tout, merci infiniment.

Résumé

Notre étude s'inscrit sur les travaux de recherche effectués sur le perfectionnement des réseaux maillés sans fil (WMNs).

Un réseau sans fils maillé est un réseau avec infrastructure qui utilise la technologie sans fil dans tous les niveaux (infrastructure et clients), dans le but de l'élimination totale du câblage. Son architecture lui offre une robustesse et une efficacité très importante par rapport aux réseaux ad hoc, ainsi qu'une souplesse d'installation avec un faible coût par rapport aux réseaux filaires classiques.

C'est une gamme de réseaux qui représente l'avenir des réseaux informatiques.

Notre mémoire traite un composant critique pour cette famille des réseaux qui est le routage, pour cela nous avons entamé notre travail par une présentation générale des réseaux sans fil, nous avons ensuite étudié en détail les WMNs en terme de leurs architectures, technologies de transmission et caractéristiques. Par ailleurs nous avons étudié les protocoles de routage en se focalisant sur les deux protocoles AODV et OLSR.

Nous avons réalisé par la suite des simulations et des analyses sur le comportement des deux protocoles sur un WMN, en utilisant le simulateur NS2. Cette expérimentation nous a permis de proposer une solution de routage en précisant le domaine d'application du WMN.

Enfin nous avons conclu notre travail avec des perspectives.

Mots-clés :

Réseau maillé sans fil, Mesh routeur, Mesh client, routage, AODV, OLSR, NS2,

Abstract

Our study is included among the research done to improve and develop wireless mesh network (WMNs). A wireless mesh is a network infrastructure that uses wireless technology in all levels (infrastructure and customers), in order to eliminate totally the wiring. The architecture of this type of wireless offers solidity and effectiveness comparing with normal one. In addition to the flexibility installation with a low cost compared with traditional wired network . This category of wireless represents the future of the computer networks. Our paper deals with an important and critical element in relation to this category which is routing . That's why we started first with giving an overview about wireless networks.

After that, we studied in details the WMNs in terms of their architectures, technology that is used, characteristics and features. In another side, we studied routing protocols focussing on two protocols OLSR and AODV. Later, we dealt with simulation and analysis to know the behavior of these two protocols in wireless mesh network by using network simulator (NS2). This experiment allowed us to propose the best solution by specifying the domain of practicing the mesh. Finally, we concluded our work with prospects and propositions.

Keywords:

Wireless mesh network, mesh routers, mesh clients, routing, AODV, OLSR, NS2,

ملخص

تندرج دراستنا ضمن الأبحاث و الدراسات المنجزة لتحسين و تطوير الشبكات المعلوماتية اللاسلكية العقدية .

الشبكة اللاسلكية العقدية عبارة عن شبكة ببنية تحتية تستخدم تكنولوجيا اللاسلكي في جميع المستويات : بنية تحتية و زبائن, بهدف التخلص التام من الأسلاك.

هندسة هذا النوع من الشبكات توفر صلابة و نجاعة بالغة مقارنة بالشبكات اللاسلكية العادية بالإضافة إلى سهولة التثبيت بأقل تكلفة مقارنة بالشبكات السلكية.

تمثل هذه الفئة من الشبكات مستقبل الشبكات المعلوماتية.

مذكرتنا تعالج عنصراً هاماً و حاسماً بالنسبة لهذه الفئة و الذي يتمثل في التوجيه.

من أجل هذا شرعنا أولاً في تقديم لمحة عامة عن الشبكات اللاسلكية بعدها قمنا بدراسة تفصيلية عن الشبكات محل الدراسة من عدة جوانب: الهندسة , التكنولوجيا المستعملة, الخصائص و المميزات.

من جهة أخرى قمنا بدراسة بروتوكولات التوجيه حيث ركزنا دراستنا على بروتوكول (AODV) و (OLSR) .

بعدها قمنا بعملية المحاكاة و تحليلها من أجل معرفة سلوك هذين البروتوكولين في الشبكة اللاسلكية العقدية وذلك باستعمل محاكي الشبكات (NS2) .

هذا التجارب سمحت لنا بتصور الحل الأمثل و اقتراحه و هذا بعد تحديد مجال تطبيق الشبكة .

وفي الأخير قمنا باختتام هذا العمل بعرض بعض الاقتراحات و التطلعات.

الكلمات المفتاحية: الشبكات العقدية اللاسلكية, بروتوكولات التوجيه, موجه عقدي, زبون عقدي, OLSR, AODV , NS2

Table des matières

Remerciements.....	i
Résumé.....	ii
Abstract.....	iii
ملخص.....	iv
Table des matières.....	v
Liste des figures	xi
Liste des tableaux.....	xiii
Liste des formules	xiv
Liste des abréviations	xv
Introduction générale	1
Chapitre I : LES RESEAUX SANS FIL	2
I.1- Introduction	2
I.2- Définition.....	2
I.3- Historique des réseaux sans fil	2
I.4- Communication sans fil	3
I.4.1- Les ondes radio (Ondes radioélectriques ou ondes hertziennes)	3
I.4.2- Transmissions radio	3
I.4.3-Propagation en vue directe.....	4
I.4.3.1- Affaiblissement	5
I.4.3.2- Le bruit.....	5
I.4.3.3- Absorption atmosphérique	5
I.4.3.4- Propagation multi trajet.....	5
I.4.3.5- Evanouissement	6
I.4.4- Propagation indoor	7
I.5- Caractéristiques des réseaux sans fil	7
I.6- Classification des réseaux sans fil.....	8
I.6.1- Réseau personnel sans fil : (Wireless Personal Area Network : WPAN).....	8
I.6.2- Réseau local sans fil : (Wireless Local Area Network : WLAN).....	9
I.6.3-Réseau métropolitain sans fil :(Wireless Metropolitan Area Network WMAN).....	9
I.6.4- Réseau étendu sans fil : (Wireless Wide Area Network : WWAN)	9
I.7- La mobilité dans les réseaux sans fil	10
I.7.1- Définition de la mobilité dans un réseau	10
I.7.2- Définition d'un réseau mobile	10

1.7.3- Problèmes liés à la mobilité	10
1.7.4- Différentes générations des réseaux mobiles	11
1.7.4.1- Réseaux mobiles à stations de base fixes	11
1.7.4.2- Les réseaux radio maillés.....	12
1.7.4.3- Les réseaux satellitaires	12
1.7.4.4- Les réseaux P2P à simple saut.....	12
1.7.4.5- Les réseaux mobiles ad hoc MANET : (Mobile Ad hoc Network)	13
1.8- Conclusion.....	13
Chapitre II : LES RESEAUX MAILLES SANS FIL WMNs	14
II.1- Introduction.....	14
II.2- Définition	14
II.3- Caractéristiques des réseaux maillés sans fil	15
II.4- Objectifs des réseaux maillés sans fil	16
II.5- La transmission dans les WMNs.....	16
II.5.1- Les technologies de transmission Mesh	16
II.5.1.1-Le standard IEEE 802.11s	16
II.5.1.2-Le standard IEEE 802.15.5.....	17
II.5.1.3-Le standard IEEE 802.16a.....	17
II.5.2- Les techniques de transmission	18
II.5.2.1- La technique OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)	18
II.5.2.2- Les systèmes à antennes multiples MIMO (Multiple Input- Multiple Output)	19
II.5.3- Protocoles d'accès au médium	20
II.5.3.1- CSMA/CA : accès multiple avec écoute de porteuse/évitement de collision ...	20
II.5.3.2- TDMA (Time Division Multiple Access).....	21
II.5.3.3- Protocoles Mac Hybride CSMA/ TDMA	21
II.6- Classifications des réseaux maillés sans fil	22
II.6.1- Selon le type maillage	22
II.6.1.1- Maillage total	22
II.6.1.2- Maillage partiel.....	22
II.6.2- Selon l'architecture	23
II.6.2.1- Maillage utilisateurs	23
II.6.2.2- Maillage routeurs	24
II.6.2.3- Maillage hybride	25
II.7- Applications des réseaux maillés sans fil	25
II.8- Avantages des réseaux maillés sans fil	27

II.9- Les challenges des réseaux maillés sans fil	28
II.10- Conclusion	29
Chapitre III : LE ROUTAGE DANS LES RESEAUX AD HOC	30
III.1- Introduction	30
III.2- Définitions.....	30
III.2.1- Routage	30
III.2.2- Algorithme de routage.....	30
III.2.3- Protocole de routage	30
III.3- Problématique et contraintes de routage dans les MANETs.....	30
III.4- Les objectifs des protocoles de routage dans les MANETs	31
III.5- Classification des protocoles de routage	31
III.5.1- Selon le moment d'établissement des routes.....	31
III.5.1.1- Les protocoles de routage proactifs	31
III.5.1.2- Les protocoles de routage réactifs	32
III.5.1.3- Les protocoles de routage hybrides	32
III.5.2- Selon la participation des nœuds dans le routage	32
III.5.2.1- Les protocoles uniformes	32
III.5.2.2- Les protocoles non uniformes.....	33
III.6- Les méthodes de routage.....	33
III.6.1- Le routage par vecteur de distance	33
III.6.2- Le routage par état des liens	34
III.7- Etude des deux protocoles OLSR et AODV	35
III.7.1- Le protocole Optimized Link State Routing OLSR.....	35
III.7.1.1- Définition	35
III.7.1.2- Notions de base	35
III.7.1.3- Messages échangés	37
III.7.1.3.1- Multiple Interface Déclaration (MID)	37
III.7.1.3.2- Message Hello	38
III.7.1.3.3-Message Topology Control (TC)	38
III.7.1.3.4- Message HNA (Host and Network Association)	39
III.7.1.4- Les bases d'informations	39
III.7.1.4.1- Table d'association des interfaces multiples	39
III.7.1.4.2- L'ensemble des voisins.....	40
III.7.1.4.3- Table de voisinage	40

III.7.1.4.4- Ensemble de voisinage à deux sauts	40
III.7.1.4.5- Ensemble des MPRs	41
III.7.1.4.6- Ensemble des MPR Selectors.....	41
III.7.1.4.7- La table topologique	41
III.7.1.4.8- La table de routage	42
III.7.1.4.9- Ensemble des associations	42
III.7.1.5- Principe de fonctionnement	42
III.7.1.5.1- Fonctionnement de base	43
III.6.1.5.2- Fonctionnement auxiliaire.....	44
III.7.2- Le protocole Ad Hoc On Demand Distance Vector AODV	45
III.7.2.1- Définition	45
III.7.2.2- Les messages échangés	45
III.7.2.2.1- Demande de route (Route REQuest RREQ)	45
III.7.2.2.2- Réponse de route (Route REPlY RREP)	46
III.7.2.2.3- Erreur de route (Route ERRor RERR).....	46
III.7.2.2.4- Accusé de réception de réponse de route (Route REPlY	47
III.7.2.3- Les bases d'informations	47
III.7.2.3.1- La table de routage	47
III.7.2.3.2- La table d'historique	48
III.7.2.4- Principe de fonctionnement	48
III.7.2.4.1- Découverte de routes	48
III.7.2.4.2- Maintenance des routes	50
III.8- Conclusion	51
Chapitre IV : LE ROUTAGE DANS LES WMNs - EXPERIMENTATION ET EVALUATION	52
IV.1- Introduction	52
IV.2- Présentation de NS2	52
IV.3- Modèles de mobilité	53
IV.3.1- Le modèle de mobilité avec points de passage aléatoires WPM	53
IV.3.2- Le modèle de mobilité à marche aléatoire RWM	53
IV.3.3- Le modèle de mobilité avec direction aléatoire RDM	54
IV.4- Modèles de trafic.....	56
IV.5- Modèles d'énergie	57
IV.6- Analyse des résultats dans NS2	57
IV.6.1- Les fichiers de trace	57

IV.6.1.1- Les fichiers trace ".NAM"	57
IV.6.1.2- Les fichiers trace ".tr"	58
IV.6.2- Les critères d'évaluation.....	58
IV.6.2.1- Le taux de paquets délivrés	58
IV.6.2.2- Le taux de perte	58
IV.6.2.3- Le coût de routage	58
IV.6.2.4- Le délai de transmission moyen	58
IV.7- Les scenarios de simulation	59
IV.7.1- Paramètres généraux	59
IV.7.2- Présentation des différents scenarios de simulation.....	59
IV.7.2.1- Scenario 1 : impact de la vitesse de mobilité.....	59
IV.7.2.2- Scenario 2 : impact du niveau d'énergie des nœuds mobiles.....	61
IV.7.2.3- Scenario 3 : impact de la charge du le réseau	63
IV.7.2.4- Scenario 4 : impact de la densité du réseau	65
IV.7.2.5- Scenario 5 : impact de la distance entre émetteur récepteur.....	68
IV.7.3- Observations.....	70
IV.7.4- Analyse des résultats.....	71
IV.8- Conclusion.....	72
V- SOLUTIONS ET PERSPECTIVES	73
V.1- Introduction.....	73
V.2- Domaine d'application	73
V.3- Objectifs de la solution	73
V.4- Approche de routage	74
V.5- Méthode de routage	75
V.6- Métrique de routage	76
V.6.1-Les exigences d'une métrique de routage.....	76
V.6.1.a- Réduire l'interférence intra-flux	76
V.6.1.b- Réduire l'interférence inter-flux	76
V.6.1.c- Réduire l'interférence extérieure.....	77
V.6.1.c.1-Interférence contrôlée.....	77
V.6.1.c.2-Interférence non contrôlée	77
V.6.1.d- Equilibrage de charge.....	77
V.6.1.e- Agilité.....	77
V.6.1.f- Iso tonicité.....	77
V.6.1.g- Stabilité.....	78

V.6.1.h- Débit.....	78
V.6.2- Les composants d'une métrique de routage.....	79
V.6.2.a- Nombre de sauts	79
V.6.2.b- Capacité du lien	79
V.6.2.c- Qualité du lien.....	79
V.6.2.d- Diversité des canaux	79
V.6.3- Présentation des métriques de routage pour les WMNs	80
V.6.3.a- Nombre de sauts	80
V.6.3.b- Nombre de transmissions attendues (ETX)	80
V.6.3.c- Le temps de transmissions prévu (ETT)	81
V.6.3.d- ETT pondérée cumulative (WCETT).....	81
V.6.3.e- Métrique d'ingérence et de canal de commutation (MIC)	82
V.6.3.f- Métrique de l'interférence courant iAware	82
V.6.4- Métrique choisie.....	83
V.7- Conclusion	83
Conclusion générale	84
ANNEXE.....	85
BIBLIOGRAPHIE.....	88

Liste des figures

Figure 1 : Propagation en vue directe	4
Figure 2 : Effets de propagation	6
Figure 3 : Les différentes classes des réseaux sans fil selon le périmètre géographique [5].....	9
Figure 4 : Réseau à stations de bases fixes	11
Figure 5:Exemple de graphe complet	12
Figure 6: Exemple de graphe non complet.....	12
Figure 7 : Réseau maillé sans fil WMN.....	14
Figure 8 : Architecture point à multipoint [17]	17
Figure 9 : Architecture mixte PMP et Mesh [17].....	18
Figure 10 : Les sous réseaux créés par la technique OFDM.....	19
Figure 11 : Système de communication MIMO [7]	20
Figure 12 : Maillage total [18]	22
Figure 13 : Maillage partiel [18]	23
Figure 14 : Maillage utilisateurs.....	23
Figure 15 : Maillage routeurs	24
Figure 16 : Maillage hybride	25
Figure 17: Ensemble des MPRs d'un nœud	36
Figure 18: Format d'un paquet OLSR.....	37
Figure 19: Format d'un message MID	37
Figure 20: Format d'un message Hello	38
Figure 21: Format d'un message TC	39
Figure 22: Format d'un message HNA	39
Figure 23: Format d'un message RREQ	45
Figure 24: Format d'un message RREP.....	46
Figure 25: Format d'un message RRER	46
Figure 26: Exemple de découverte de route avec RREP générée par la destination	49
Figure 27: Exemple de découverte de route avec RREP générée par un nœud intermédiaire	49
Figure 28: Exemple de détection d'une rupture d'un lien actif.....	50
Figure 29: Exemple de réparation locale avec succès	51
Figure 30: Exemple d'annonce d'une erreur de route	51
Figure 31 : La trace de déplacement d'un nœud utilisant le modèle de mobilité avec points de passage aléatoires [26]	53
Figure 32: La trace de déplacement d'un nœud utilisant le modèle mobilité à marche aléatoire [26].....	54
Figure 33: La trace de déplacement d'un nœud utilisant le modèle mobilité avec direction aléatoire [26]	54
Figure 34: Impact de la vitesse de mobilité sur le taux de paquets délivrés	60
Figure 35: Impact de la vitesse de mobilité sur le taux de perte.....	60
Figure 36: Impact de la vitesse de mobilité sur le coût de routage	61
Figure 37: Impact de la vitesse de mobilité sur le de délai de transmission moyen	61
Figure 38: Impact du niveau d'énergie sur le taux de paquets délivrés	62

<i>Figure 39: Impact du niveau d'énergie sur le taux de perte</i>	<i>62</i>
<i>Figure 40: Impact du niveau d'énergie sur le coût de routage</i>	<i>63</i>
<i>Figure 41: Impact du niveau d'énergie sur le délai de transmission moyen</i>	<i>63</i>
<i>Figure 42 : Impact de la charge du réseau sur le taux de paquets délivrés</i>	<i>64</i>
<i>Figure 43: Impact de la charge du réseau sur le taux de perte</i>	<i>64</i>
<i>Figure 44: Impact de la charge du réseau sur le coût de routage</i>	<i>65</i>
<i>Figure 45: Impact de la charge du réseau sur le délai de transmission moyen</i>	<i>65</i>
<i>Figure 46: Impact de la densité du réseau sur le taux de paquets delivrés</i>	<i>66</i>
<i>Figure 47: Impact de la densité du réseau sur le taux de perte</i>	<i>66</i>
<i>Figure 48: Impact de la densité du réseau sur le coût de routage</i>	<i>67</i>
<i>Figure 49: Impact de la densité du réseau sur le délai de transmission moyen</i>	<i>67</i>
<i>Figure 50: Impact de la distance entre émetteur récepteur sur le taux de paquets delivrés</i>	<i>68</i>
<i>Figure 51: Impact de la distance entre émetteur récepteur sur le taux de perte</i>	<i>69</i>
<i>Figure 52: Impact de la distance entre émetteur récepteur sur le coût de routage</i>	<i>69</i>
<i>Figure 53: Impact de la distance entre émetteur récepteur sur le délai de transmission moyen</i>	<i>70</i>
<i>Figure 54: Approche de routage hybride</i>	<i>74</i>
<i>Figure 55: Exemple de diversité des canaux pour éviter l'interférence intra-flux</i>	<i>76</i>
<i>Figure 56: Exemple d'élimination d'un problème d'interférence inter-flux</i>	<i>76</i>
<i>Figure 57: Exemple d'isotonicité</i>	<i>78</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau 1: Table d'association des interfaces multiples</i>	<i>40</i>
<i>Tableau 2: Ensemble des voisins.....</i>	<i>40</i>
<i>Tableau 3: Table de voisinage</i>	<i>40</i>
<i>Tableau 4: Ensemble de voisinage à deux sauts.....</i>	<i>41</i>
<i>Tableau 5: Ensemble des MPRs</i>	<i>41</i>
<i>Tableau 6 : Ensemble des MPR Selectors</i>	<i>41</i>
<i>Tableau 7: La table topologique</i>	<i>41</i>
<i>Tableau 8: La table de routage OLSR.....</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 9: Ensemble des associations.....</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 10: La table de routage AODV</i>	<i>47</i>
<i>Tableau 11: Table d'historique</i>	<i>48</i>
<i>Tableau 12: Paramètres généraux pour la simulation</i>	<i>59</i>
<i>Tableau 13: Paramètres de simulation pour le scenario1: impact de la vitesse de mobilité</i>	<i>59</i>
<i>Tableau 14: Paramètres de simulation pour le scenario2: impact du niveau d'énergie des noeuds mobiles</i>	<i>61</i>
<i>Tableau 15: Paramètres de simulation pour le scenario3 : impact de la charge du réseau.....</i>	<i>63</i>
<i>Tableau 16: Paramètres de simulation pour le scenario4: impact de la densité du réseau</i>	<i>65</i>
<i>Tableau 17: Paramètres de simulation pour le scenario5: impact de la distance entre émetteur récepteur</i>	<i>68</i>
<i>Tableau 18: Composants et caracterestiques des metriques de routage conçues pour les WMNs [30].....</i>	<i>83</i>

Liste des formules

<i>Formule 1: Taux de paquets délivrés [19]</i>	58
<i>Formule 2: Taux de perte [19]</i>	58
<i>Formule 3: Coût de routage [19]</i>	58
<i>Formule 4: Délai de transmission moyen [19]</i>	58
<i>Formule 5: Isotonicité [28]</i>	78
<i>Formule 6: Nombre de transmissions attendues [28]</i>	80
<i>Formule 7: Temps de transmissions prévu (ETT) [28]</i>	81
<i>Formule 8: ETT pondérée cumulative (WCETT) [28]</i>	81
<i>Formule 9: Métrique d'ingérence et de canal de commutation (MIC) [28]</i>	82
<i>Formule 10: Coût du canal de commutation (CSC_i) [28]</i>	82
<i>Formule 11: Métrique de l'interférence courant ($iAware$) [28]</i>	82
<i>Formule 12: L'interference ratio [28]</i>	82
<i>Formule 13: L'interference ratio à un noeud (u) pour un lien (i) [28]</i>	82

Liste des abréviations

ABR	Associativity-Based Routing
Ack	Acknowledgement
AODV	Ad hoc On Demand Distance Vector
ATX	Expected Transmission count
BLR	Boucle Local Radio
BS	Station de Base
BSS	Basic Service Set
CBR	Constant Bit Rate
CBRP	Cluster Based Routing Protocol
CEDAR	Core Extraction Distributed Ad Hoc Routing
CGSR	Clusterhead Gateway Switch Routing
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
CTS	Clear To Send
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DIFS	Distributed Inter-Frame Space
DREAM	Distance Routing Effect Algorithm for Mobility
DSDV	Destination Sequenced Distance Vector
DSR	Dynamic Source Routing
ETT	Expected Transmission Time
FSR	Fish eye State Routing
FTP	File Transfert Protocol
GPRS	General Packet Radio System
GSM	Global System for Mobile communication
GSR	Global State Routing
HNA	Host and Network Association
HSR	Hierarchical State Routing
iAWARE	Interference Aware Routing
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INRIA	Institut National De Recherche En Informatique Et En Automatique
IrDA	Infrared Data Association
LAR	Location-Aided Routing
MAC	Media Access Control
MANET	Mobile Ad hoc Network
MIC	Metric of Interference and Channel switching
MID	Multiple Interface Declaration
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MPR	Multipoint Relays
NAM	Network Animator
NS2	Network Simulator 2
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OLSR	Optimized Link State Routing Protocol

OTcl	Object Tools command language
PDA	Personal Digital Assistant
PRNET	Packet Radio Network
RDM	Random Direction Model
RDMAR	Relative Distance Microdiscovery Ad-Hoc Routing
RERR	Route Error
RFC	Request For Comment
RREP	Route Reply
RREQ	Route Request
RTS	Ready To Send
RWM	Random Walk Mobility Model
SSR	Scalable Source Routing
TBRF	Topology Broadcast Reverse Forwarding
TC	Topology Control
TDMA	Time Division Multiple Access
TORA	Temporally Ordered Routing Algorithm
TTL	Time To Live
UHF	Ultra High Frequency
UMTS	Universal Mobile Telephone System
WCETT	Weighted Cumulative Expected Transmission Time
Wifi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WMC	Wireless Mesh Client
WMN	Wireless Mesh Network
WMR	Wireless Mesh Router
WPAN	Wireless Personal Area Network
WPM	Random Waypoint Model
WRP	Wireless Routing Protocol
WWAN	Wireless Wide Area Network
ZHLS	Zone-Based Hierarchical Link State
ZRP	Zone Routing Protocol

Introduction générale

Ces dernières années, les réseaux sans fils on connu une grande évolution et une large utilisation dans notre vie quotidienne, grâce à leurs simplicité et souplesse d'une part, ainsi que leur coût et leur débit qui sont devenus de plus en plus acceptables par la communauté des chercheurs et les investisseurs après.

Les réseaux maillés sans fil (Wireless Mesh Networks WMNs) représentent une nouvelle génération des réseaux sans fil qui a pour objectif de maintenir la robustesse et la stabilité des réseaux filaires, ainsi de profiter des avantages de la technologie des réseaux sans fil tel que la mobilité, la souplesse et le coût réduit, avec l'élimination des problèmes et des contraintes connues dans ces deux catégories. C'est une solution prometteuse, ses caractéristiques telles que l'architecture, les technologies et les techniques utilisées représentent les facteurs clés de sa réussite. Une partie importante de cette solution est le routage, qui est en cours de développement et de recherche pour trouver le protocole de routage idéal.

Notre sujet consiste à expérimenter et évaluer les performances de deux protocoles différents dédiés pour les réseaux ad hoc, appliqués aux réseaux maillés sans fil, ainsi que tirer des conclusions et des propositions pour la solution idéale. Ces deux protocoles sont conçus initialement pour les réseaux ad hoc, l'un est un protocole proactif OLSR (Optimized Link State Routing), et l'autre est un protocole réactif AODV (Ad Hoc On Demand Distance Vector). Pour cela il faut faire une étude détaillée sur les WMNs, (leurs architecture, caractéristiques, technologies, techniques, utilisations,...etc.), ainsi qu'une bonne compréhension des protocoles de routage (leurs algorithmes, messages échangés, bases d'informations,...etc.), puis faire des simulations sur les deux protocoles dans un environnement de réseau maillé sans fil, en utilisant le simulateur NS2. Puis nous conclurons nos testes par des solutions et des perspectives. Notre travail sera donc organisé comme suit :

- I. Les réseaux sans fil
- II. Les réseaux maillés sans fil
- III. Le routage dans les réseaux ad hoc- cas AODV et OLSR
- IV. Le routage dans les WMNs - expérimentation et évaluation
- V. Solutions et perspectives

Chapitre I : LES RESEAUX SANS FIL

I.1- Introduction

L'évolution exponentielle des technologies de transmission sans fil a influencé d'une façon directe sur les réseaux informatiques. On assiste aujourd'hui la naissance et le déploiement de plusieurs gammes de réseaux informatiques basés sur cette nouvelle technologie, en l'utilisant comme un support de transmission à la place des supports filaires, ce sont les réseaux sans fil (Wireless Network), qui ont connu un grand succès grâce à leur facilité d'installation, leur faible coût par rapport aux réseaux filaires.

I.2- Définition

Un réseau sans fil (en anglais Wireless network) est un réseau dans lequel au moins deux machines peuvent communiquer entre elles sans liaison filaire. Ce type de réseaux utilise généralement des supports de transmission sans guide physique : ondes radioélectriques, infrarouge, etc.[1],[2].

I.3- Historique des réseaux sans fil

C'est vrai que la réussite et le déploiement des réseaux sans fils sont explosés ces dernières années, mais l'idée d'établir une communication sans fil a été apparue depuis longtemps. L'objectif initial a été réussir une communication à distance, quelque soit le support de transmission, lorsque le baron **Paul Schilling Von Canstadt** réalise une tentative de communication à distance entre deux appareils, c'est le premier prototype d'un télégraphe électrique jeté en 1832. Cinq ans après, ce prototype a été amélioré par le peintre américain **Samuel Morse**. Il faudra attendre jusqu'à 1893 lorsque le croate **Nikola Tesla** découvre un système qui permet d'envoyer des informations par le biais des courants à haute fréquence.

Ce système a été amélioré par l'ingénieur russe **Popov** en le dotant d'une antenne en 1894. Deux ans après, l'apparition du premier appareil de télégraphie sans fil proposé par le physicien italien **Guglielmo Marconi**. Depuis cette date, plusieurs expériences de communications sans fil ont été réussies, jusqu'à l'année 1970 lorsque l'équipe hawaïenne de **Norman Abramson** met au point le protocole Aloha, assurant des transmissions de paquets par ondes radio UHF entre les îles de l'archipel.

Trois ans après, la DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) américaine lance le projet PRNet (*Packet Radio Networks*) afin d'étudier les communications radio en mode paquet dans les réseaux autonomes non centralisés: les premiers réseaux ad-hoc.[1],[2]

I.4- Communication sans fil

N'importe quel système de communication, utilise des supports de transmission comme chemin physique traversé par les données allant de l'émetteur vers le récepteur, on distingue deux types de supports :

- Guidé : le long d'un support physique (câble en cuivre, fibre optique,...).
- Non guidé : la transmission se fait à travers un milieu ambiant et nécessite l'utilisation d'antennes.[1]

I.4.1- Les ondes radio (Ondes radioélectriques ou ondes hertziennes)

Ce sont des ondes électromagnétiques dont la fréquence est par convention inférieure à 3 000 GHz, se propageant dans l'espace sans guide artificiel, elles sont comprises entre 9 kHz et 3 000 GHz qui correspondent à des longueurs d'onde de 33 km à 0,1 mm.

Les ondes radio sont omnidirectionnelles, elles sont donc propagées dans toutes les directions et peuvent être captées par de nombreuses antennes. La transmission de tels signaux ne requiert donc pas d'alignement spécifique des antennes. La plage de fréquences 30 MHz - 1 GHz est très efficace pour une diffusion omnidirectionnelle.

En effet, l'atmosphère ne réfléchit pas les ondes de fréquence supérieure à 30 MHz (les communications via satellite sont donc peu perturbées). De plus, ces fréquences ne sont que peu atténuées par la pluie. Les interférences les plus importantes, pour ce type de signaux résultent de la propagation multi trajet, c'est à dire la création de différents chemins de propagation par la réflexion des signaux sur le sol, l'eau et les différents obstacles. A chaque plage de fréquences correspondent un ou plusieurs modes de propagation [3],[4].

I.4.2- Transmissions radio

Le principe est d'émettre des ondes électromagnétiques qui constituent la porteuse du signal à transmettre, le spectre radio est découpé en bandes de fréquences divisées en canaux, les ondes radios se propagent en ligne droite dans plusieurs directions.

La vitesse de propagation des ondes dans le vide est de 3.10^8 m/s, lorsqu'une onde radio rencontre un obstacle, une partie de sa puissance est absorbée et transformée en une autre forme d'énergie (thermique par exemple), une partie continue à se propager de façon atténuée et une dernière peut éventuellement être réfléchi. L'atténuation augmente avec l'augmentation de la fréquence ou de la distance. De plus lors de la collision avec un obstacle, la valeur de l'atténuation dépend fortement du matériel composant l'obstacle. Généralement les obstacles métalliques provoquent une forte réflexion, tandis que l'eau absorbe le signal. Les transmissions radios dans les réseaux sans fil sont soumises à de nombreuses contraintes, liées à la nature de la propagation des ondes radios et aux méthodes de transmissions, rendant ce type de transmission non suffisant. Le signal transmis est sujet à nombreux phénomènes dont la plupart ont un effet de dégradation sur la qualité du signal. Cette dégradation se traduit en pratique par des erreurs dans les messages reçus qui entraînent des pertes d'informations pour l'utilisateur ou le système. [4].

I.4.3-Propagation en vue directe

Dans ce type de transmission, l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice doivent être situées en vue directe l'une de l'autre, comme illustré dans la figure 1.

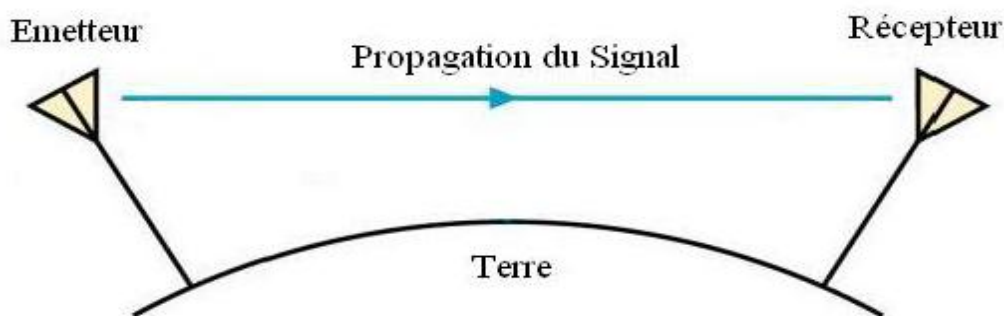


Figure 1 : Propagation en vue directe

La différence (dégradation) entre le signal envoyé et le signal reçu est causée par les contraintes suivantes [3],[4] :

I.4.3.1- Affaiblissement

Pour un média sans guide physique, l'atténuation est en fonction de la distance et des conditions atmosphériques. Cet affaiblissement est plus important aux hautes fréquences, ce qui entraîne des distorsions plus importantes.

I.4.3.2- Le bruit

Pendant le trajet, le signal est altéré par des signaux perturbateurs, provenant par exemple d'autres antennes. Ce sont ces signaux qui sont appelés bruit, ce bruit peut être réparti en plusieurs catégories :

- ☞ **Le bruit thermique:** provoqué par l'agitation des électrons, il est présent dans tous les équipements électroniques.
- ☞ **Le bruit d'intermodulation:** résultant du partage d'un média par des signaux de fréquences différentes.
- ☞ **La diaphonie:** il s'agit d'un couplage perturbateur de trajets de signaux voisins. L'exemple classique est rencontré lorsqu'une communication téléphonique perçoit une autre conversation.
- ☞ **Le bruit impulsif :** bruit changeant, apparaissant sous forme de pics irréguliers et dont les causes sont diverses, il peut provenir de défauts internes à l'antenne ou de perturbations extérieures comme la foudre.

I.4.3.3- Absorption atmosphérique

La vapeur d'eau et l'oxygène sont deux éléments intervenant fortement dans l'affaiblissement d'un signal, en absorbant une partie de celui-ci.

I.4.3.4- Propagation multi trajet

Rappelons les trois effets de propagation qui entrent en ligne de compte lors d'une transmission et dont la représentation peut être trouvée à la figure 2.

- ☞ **La réflexion :** survient lorsqu'une onde rencontre une surface qui est plus grande que sa longueur.
- ☞ **La diffraction :** se produit quand l'onde frappe le coin d'un obstacle plus grand que sa longueur. Des ondes se propagent alors dans différentes directions à partir de ce coin.

☞ **La dispersion** : a lieu quand la taille de l'objet est de l'ordre de la longueur d'onde du signal. Celui-ci est alors dispersé en plusieurs signaux plus faibles.

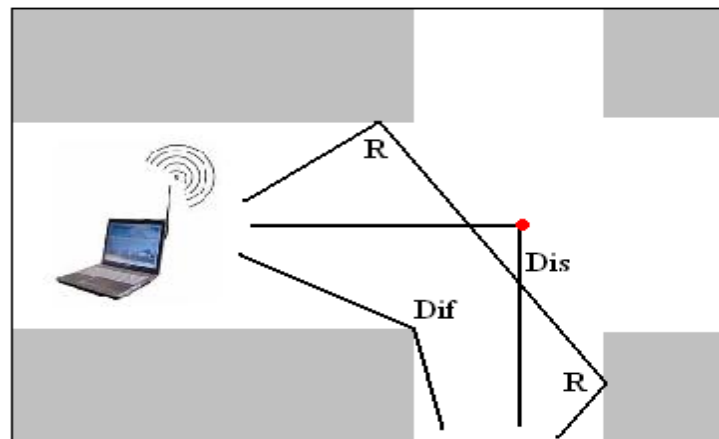


Figure 2 : Effets de propagation

Dans la plupart des cas, on trouve une multitude d'obstacles entre l'émetteur et le récepteur. Le signal peut donc être réfléchi un grand nombre de fois et plusieurs copies du signal original peuvent exister. Le récepteur capte alors un signal qui est la résultante du signal principal et de tous les signaux réfléchis qui sont captés par son antenne. Le signal peut être renforcé ou atténué (voir même annulé) par ces différentes composantes, les effets de la propagation multi trajet ont donc une importance considérable sur les transmissions sans fils. En plus des perturbations dont nous venons de discuter, il y a un autre problème qui surgit dans un environnement mobile, c'est le phénomène d'évanouissement (fading). Ce terme désigne la variation dans le temps de la puissance du signal reçu, due à des changements dans le support ou dans le chemin de transmission emprunté.

I.4.3.5- Evanouissement

Quand une des deux antennes se déplace par rapport à l'autre, l'emplacement relatif des obstacles entre elles est modifié, et l'effet de ces obstacles sur la transmission évolue. Comme nous l'avons vu, ces phénomènes vont participer à la propagation multi trajet et avoir une influence constructive ou destructive sur le signal. Le déplacement du mobile va donc induire une variation dans l'apparition des signaux secondaires et influe donc sur le signal reçu.

I.4.4- Propagation indoor

Dans le cadre d'une communication indoor la situation est empirée : les murs, le plafond et le sol participent à la réflexion et à la dispersion. Les coins des couloirs participent, eux, à la diffraction, sans oublier les meubles qui jouent aussi un rôle. La propagation multi trajet devient plus importante, ce qui rend les transmissions beaucoup plus difficiles en indoor. De plus, le mouvement des personnes à l'intérieur des bâtiments augmente également la propagation multi trajet. La distance de transmission maximale est donc nettement réduite et sans l'utilisation de relais, il est impossible de couvrir un bâtiment tout entier avec un seul émetteur. Dans le cas où la station émettrice se situe en dehors du bâtiment où se trouve le récepteur, il faut prendre en compte la pénétration du signal dans le bâtiment. Celle-ci dépend de plusieurs facteurs :

- ☞ Les matériaux de construction employés.
- ☞ L'orientation du bâtiment.
- ☞ La hauteur du bâtiment : En effet la qualité du signal est meilleure en hauteur car les interférences urbaines sont moindres.
- ☞ Le pourcentage de fenêtres : La perte de signal à travers une vitre est plus faible qu'à travers un mur.
- ☞ La fréquence de transmission: les pertes dues à la pénétration diminuent avec l'augmentation de la fréquence.

Maintenant que nous sommes familiarisés avec les principes de base des communications sans fils, nous pouvons nous intéresser aux réseaux sans fils à proprement parler.

I.5- Caractéristiques des réseaux sans fil

▪ La possibilité d'introduire la mobilité

Le fait d'utiliser des supports de transmission sans fil entre des équipements portables (débranchés des câbles d'alimentation électrique) avec l'utilisation des protocoles bien définis, permet le mouvement libre de ces nœuds sans perdre la connexion, bien sûr dans un périmètre déterminé.

▪ Faible coût

Dans les réseaux filaires, la mise en place des câbles et le déplacement des unités représentent un coût important, contrairement aux réseaux sans fil ce coût a été éliminé par l'utilisation des supports de transmission sans fil.

▪ **Souplesse d'installation**

Le temps nécessaire pour l'installation et la configuration d'un réseau filaire a été diminué considérablement dans les réseaux sans fil, d'où l'utilisation de ce genre de réseaux dans le cas des opérations d'urgence (secours, militaires.etc)

▪ **Instabilité de la qualité du signal**

Contrairement aux réseaux filaires, la puissance du signal dans les réseaux sans fil dépend de plusieurs facteurs qui peut la dégrader comme la distance entre émetteur-récepteur, ou l'altérer comme les obstacles, le bruit dû à d'autres signaux parasites.

▪ **Sécurité**

Le fait d'utiliser des ondes radio électriques comme support de transmission, permet à un utilisateur mal intentionné de se placer dans le périmètre du réseau et d'écouter le réseau avec sa propre machine, ce qui lui permet de collecter de l'information sur le réseau pour établir une attaque, ceci représente un grand problème dans les réseaux sans fil. Aujourd'hui la sécurité dans les réseaux sans fil est un axe de recherche important.

▪ **Débit**

Le débit dans les réseaux sans fil est plus faible que dans les réseaux filaires, où la bande passante est une ressource rare. De plus, une grande partie de cette ressource est utilisée par les communications de contrôle pour l'auto configuration et l'auto gestion du réseau causés par la mobilité des nœuds [4], [2].

I.6- Classification des réseaux sans fil

Selon le périmètre géographique [2], [4], [5], [6],

Le périmètre géographique d'un réseau équivaut à sa zone de couverture, il est mesuré par la distance entre les deux nœuds les plus éloignés du réseau. On distingue ainsi plusieurs catégories de réseaux sans fil illustrées dans la figure 3.

I.6.1- Réseau personnel sans fil : (Wireless Personal Area Network : WPAN)

C'est une catégorie des réseaux de faible portée (quelques dizaines de mètres) destinée généralement pour une utilisation individuelle en reliant des équipements informatiques

sans liaison filaire dans une maison ou un bureau. Les WPANs représentent la structure de base pour la domotique, utilisent des technologies de transmission de faible portée comme la technologie Bluetooth, ZigBee, Home RF, Infrarouges IrDA, etc. (voir annexe).

I.6.2- Réseau local sans fil : (Wireless Local Area Network : WLAN)

C'est une catégorie des réseaux équivalente aux réseaux locaux d'entreprise, les WLANs permet l'interconnexion sans fil des équipements informatiques dans un établissement d'un périmètre géographique restreint (environ de 100 mètres) : entreprise, école, hôpital, etc. Cette catégorie de réseaux utilise généralement le WIFI et le Hiperlan2 comme technologie de transmission, (voir annexe).

I.6.3- Réseau métropolitain sans fil : (Wireless Metropolitan Area Network WMAN)

C'est une catégorie des réseaux qui assure une couverture comparable à un campus ou un quartier d'une ville, son but est d'interconnecter divers réseaux se trouvant sur un même campus. Les WMANs sont basés sur la technologie Boucle Local Radio BLR, la norme IEEE 802.16 est la plus connue sous son nom commercial WiMax, (voir annexe).

I.6.4- Réseau étendu sans fil : (Wireless Wide Area Network : WWAN)

Cette catégorie regroupe les réseaux étendus sur une zone de couverture de plusieurs kilomètres, elle est connue sous le nom de réseau cellulaire mobile, les technologies principales sont : GSM, GPRS, UMTS, (voir annexe).

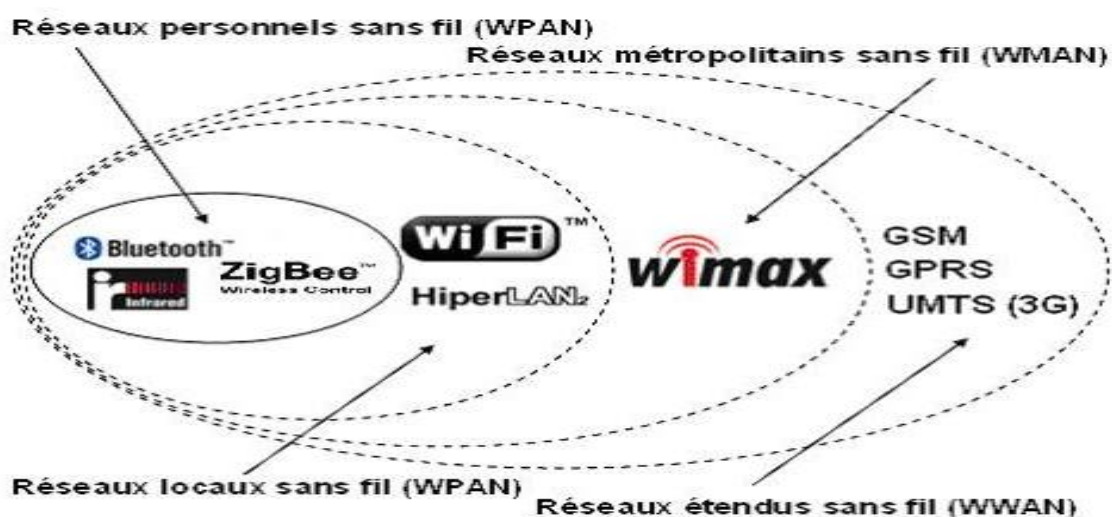


Figure 3 : Les différentes classes des réseaux sans fil selon le périmètre géographique [5]

I.7- La mobilité dans les réseaux sans fil

I.7.1- Définition de la mobilité dans un réseau

C'est le déplacement des nœuds appartenant à un réseau donné d'une cellule à autre, sans perdre leurs connexions, ou perturber le fonctionnement du réseau, Un réseau qui permet la mobilité est dit un réseau mobile. [7]

I.7.2- Définition d'un réseau mobile

Un réseau mobile est un système composé de nœuds reliés les uns aux autres par des liens de communication sans fil, ces nœuds sont libres de se déplacer sans perte de leurs connexions au réseau. Un réseau mobile peut contenir des sites fixes pour permettre l'accès aux autres types de réseaux filaires. [7]

I.7.3- Problèmes liés à la mobilité

Nommage et adressage des nœuds mobiles

Dans les réseaux fixes, l'adresse d'un nœud est souvent confondue avec son nom. Par contre, on ne peut pas nommer un nœud mobile par son adresse car il change de cellules et donc utilise plusieurs points d'accès, d'où le changement fréquent d'adresses.

Routage

Contrairement aux réseaux filaires, la mobilité des nœuds change la topologie du réseau, ce qui implique la disparition des chemins et l'apparition des autres entre deux nœuds quelconques, ce qui nécessite des protocoles de routage pouvant réagir et s'adapter rapidement avec cette situation.

Récupération des adresses :

La déconnexion (accidentelle ou volontaire) d'un nœud mobile nécessite l'adaptation des protocoles de récupération des données (adresses). Il est aussi important de supprimer les données résiduelles stockées pour éviter les problèmes de saturation de l'espace mémoire.

Diffusion de données

Dans le cas d'une émission multidestinataires (diffusion sélective) d'un message, ce dernier peut être reçu par des stations différentes à des moments différents. Donc il est

possible qu'un message diffusé ne soit pas reçu par une unité mobile destinataire, car son entrée en cellule a eu lieu après la diffusion du message ou sa sortie a eu lieu avant la diffusion du message. Une unité mobile peut recevoir plusieurs copies du même message à travers des stations de base différentes.

🔗 Dépendance de la localisation

Dans les réseaux mobiles à stations de base, un nœud mobile peut avoir besoin des services des réseaux filaires (Internet par exemple), il est donc préférable de faire appel à la station de base la plus proche de sa localisation. [8]

I.7.4- Différentes générations des réseaux mobiles

I.7.4.1- Réseaux mobiles à stations de base fixes

Ce sont des réseaux composés d'une infrastructure fixe et des unités mobiles.

L'infrastructure fixe est un ensemble de points d'accès (stations de base) connectés entre eux par des liaisons filaires, appelée aussi système de distribution. Chaque nœud mobile se connecte à un point d'accès via une liaison sans fil. Comme montré dans la figure 4, l'ensemble formé par le point d'accès et les unités mobiles situées dans sa zone de couverture, est appelé ensemble de services de base (en anglais *Basic Service Set BSS*) et constitue une cellule, les réseaux connus dans cette génération sont : GSM, GPRS, UMTS, Wifi.

Caractéristiques :

- Coût de déploiement important.
- Nécessité d'une infrastructure fixe, interconnecté de manière filaire.
- Coût des licences, notamment pour l'UMTS.

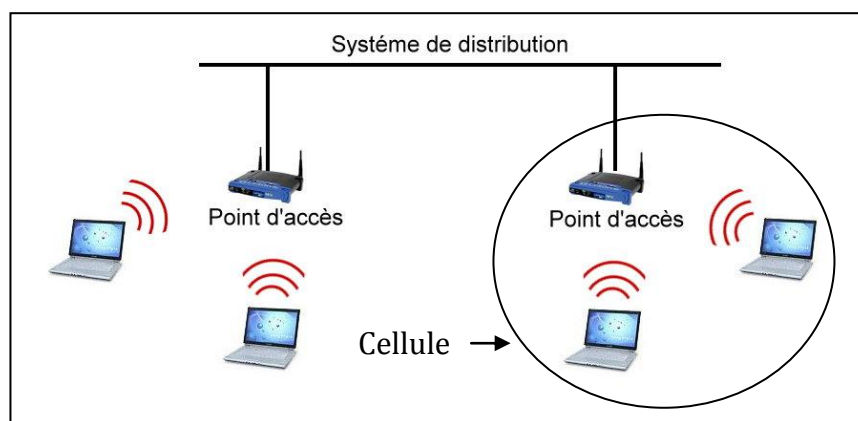


Figure 4 : Réseau à stations de bases fixes

I.7.4.2- Les réseaux radio maillés

C'est une catégorie des réseaux avec infrastructure, la particularité de cette catégorie c'est que les stations de base utilisent une liaison radio pour communiquer entre elles dans le but de supprimer définitivement les connexions filaires.

Tel que deux unités mobiles peuvent communiquer si les stations de base auxquelles elles sont rattachées peuvent communiquer. Idéalement le graphe composé de stations de base doit être connexe pour assurer toujours une route reliant deux stations quelconques.

I.7.4.3- Les réseaux satellitaires

C'est une variante des réseaux maillés, catégorie qui utilise les satellites comme stations de base.

I.7.4.4- Les réseaux P2P à simple saut

C'est une catégorie des réseaux inspirée des réseaux filaires égale à égale (P2P), l'échange d'information entre deux unités mobiles à portée de communication se fait directement sans station de base dans le but de supprimer également les stations de base. Si le graphe de connexion est complet (figure 5), tous peuvent communiquer avec tous.

Par contre si le graphe n'est pas complet, deux nœuds non reliés ne peuvent pas communiquer, comme A et D dans la figure 6.

Ce mode de réseaux est appelé mode ad hoc simple saut [6], [9].

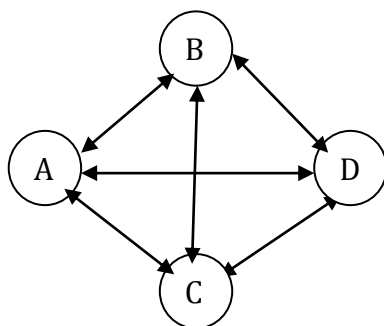


Figure 6: Exemple de graphe complet

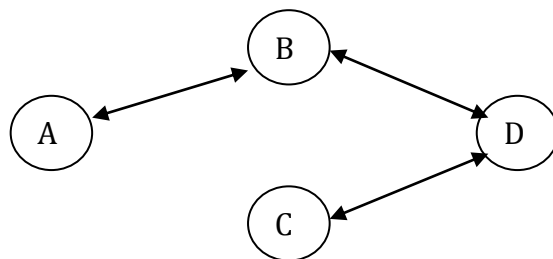


Figure 5: Exemple de graphe non complet

I.7.4.5- Les réseaux mobiles ad hoc MANET : (Mobile Ad hoc Network)

C'est une catégorie des réseaux dérivée des réseaux mobiles P2P, tel qu'un nœud peut communiquer directement avec ses voisins (les nœuds à portée de communication de sa propre interface) , comme il peut communiquer avec les nœuds qui ne sont pas dans sa portée saut par saut, donc un nœud peut jouer le rôle traditionnel d'un émetteur ou récepteur, en plus le rôle d'un routeur. Dans l'exemple précédent de graphe non complet, le nœud **A** peut communiquer avec **D** par l'intermédiaire **B**, (le nœud **B** relaye les messages du mobile **A** vers le mobile **D** et vice versa). Le réseau MANET est très utile lorsqu'aucune connexion filaire est disponible, et pour le déploiement rapide d'un réseau.

Le réseau ad hoc en tant que un réseau sans fil mobile hérite les problèmes liés a sa classe (sécurité, débit, gestion des adresses IP, routage,...), en plus il souffre de quelques problèmes propres à sa génération comme :

- 💡 Trop de messages émis par un nœud (ses messages propres + les messages routés) : plus gourmand en énergie.
- 💡 Portées de communication largement réduites en ad hoc, les distances peuvent être divisées par 10 par rapport au mode infrastructure.
- 💡 Consommation énergétique varie au moins proportionnellement au carré de la distance de communication.

I.8- Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les caractéristiques et les différentes classes et générations des réseaux sans fils. La combinaison de ces différentes générations peut donner de nouvelles générations hybrides.

Les réseaux mobiles peuvent être classés en deux classes: les réseaux avec infrastructure et les réseaux sans infrastructure, la première classe représente les réseaux avec infrastructure filaires et les réseaux avec infrastructure sans fil (radio maillés). La deuxième classe représente les réseaux ad hoc (simple saut et multi sauts).

Il est clair maintenant qu'un réseau maillé sans fil est différent d'un réseau ad hoc ou un réseau avec infrastructure fixe, il combine les caractéristiques de ces deux catégories, tel que la mobilité, l'auto configuration, le multi sauts, en plus il est basé sur l'infrastructure pour assurer le bon fonctionnement. Le chapitre suivant va apporter plus de détails sur les réseaux maillés sans fil.

Chapitre II : LES RESEAUX MAILLES SANS FIL WMNs

II.1- Introduction

Les réseaux maillés sans fil représentent une nouvelle génération des réseaux, ils sont constitués de routeurs de maillage et des clients. Les routeurs ont une mobilité minimale formant l'épine dorsale du réseau, elle assure l'accès au WMN (Wireless mesh network WMN) pour les clients, mais aussi l'accès aux autres types de réseaux (internet).

II.2- Définition

Un réseau maillé sans fil est un ensemble des équipements informatiques sans fil (possèdent un ou plusieurs interfaces sans fil) interconnectés de proche en proche sans hiérarchie centrale, formant une structure de filet. Les nœuds du réseau maillé sans fil sont capables de se configurer et s'organiser dynamiquement avec la possibilité de l'établissement et le maintien automatique des connexions et la déconnexion de relais. Comme il est montré dans la figure 7, la communication entre les nœuds est basée sur le principe de multi-sauts, d'où plusieurs nœuds intermédiaires participent intelligemment dans la retransmission des informations jusqu'à destination.

C'est un réseau qui s'étend en fonction du nombre de participants [2], [12], [13], [14], [15], [16]

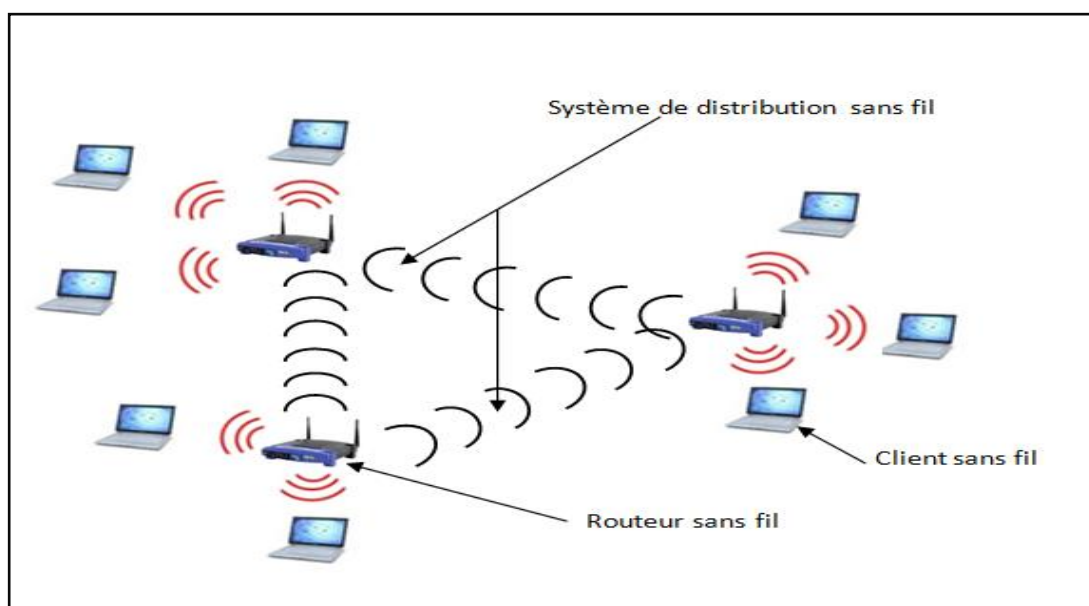


Figure 7 : Réseau maillé sans fil WMN

II.3- Caractéristiques des réseaux maillés sans fil

Les architectures sans fils Mesh constituent une approche différente des réseaux sans fils déjà existants. Elles portent de nombreuses caractéristiques:

1. La mobilité : La mobilité dans les réseaux mesh varie selon le type de nœud :

Les nœuds routeurs (WMRs : Wireless mesh router) ont une mobilité réduite.

Les nœuds clients peuvent être stationnaires ou mobiles (PC portable, PDA, Pockets PC, téléphone mobile,...).

2. Un réseau en multi sauts : Deux nœuds qui ne sont pas liés directement peuvent communiquer par l'intermédiaire des nœuds qui assurent le routage saut par saut. Cette caractéristique permet à un nœud d'atteindre la totalité des nœuds du réseau.
3. Propriété et responsabilité partagées: L'appartenance du réseau Mesh est partagée au sein des adhérents du réseau, donc la gestion du réseau est assurée par la totalité des nœuds.
4. Divers types d'accès : Les réseaux mesh offrent évidemment la connexion entre les nœuds du réseau, en plus ils donnent la possibilité de faire des connexions aux autres réseaux, ce qui permet aux adhérents du réseau de bénéficier des nouveaux services.
5. Compatibilité et interopérabilité : Les réseaux mesh basés sur les technologies IEEE802.11 donnent la possibilité de supporter les clients conventionnels Wifi ainsi que supporter la technique de maillage. Ainsi qu'ils doivent inter-opérer avec d'autres technologies sans fil comme le Wimax, le Zigbee.
6. La contrainte d'énergie dépend du type de nœud : Le problème d'énergie n'est pas posé pour les mesh routeurs par ce qu'ils sont branchés aux ressources énergétiques, par contre les clients mobiles souffrent toujours de ce problème.
7. Plusieurs interfaces de transmission radio: Les mesh routeurs sont dotés de deux types d'interfaces de transmission : un pour les transmissions inter-mesh routeurs et l'autre pour les transmissions mesh routeur- clients, par contre les clients sont dotés d'une seule interface de transmission utilisée pour les transmissions inter client ou client-routeur. Voir figure 7.
8. Plusieurs fonctionnalités des routeurs : En plus de la tâche principale d'un routeur qui est le routage, certains routeurs sont chargés de fonctions supplémentaires (le rôle d'une passerelle, pont). [10], [11].

II.4- Objectifs des réseaux maillés sans fil

En plus des objectifs classiques d'un réseau informatique sans fil, les réseaux maillés sans fil sont prévus pour résoudre les problèmes liés aux réseaux ad hoc classiques, ainsi que pour améliorer leurs performances, avec le maintien de leurs avantages, tels que:

- La consommation énergétique.
- La qualité de service.
- La robustesse et la stabilité.
- La diminution de l'interférence.
- Interopérabilité et compatibilité : la possibilité d'établir des connexions aux différents réseaux (notamment internet).
- Capacité : augmenter la quantité du trafic écoulee par le réseau dans une période donnée.
- Connexion des endroits inaccessibles où le câblage est difficile à réaliser.
- Elimination du câblage: la couverture d'une zone géographique étendue sans recours à l'utilisation de câbles [10], [11].

II.5- La transmission dans les WMNs

II.5.1- Les technologies de transmission Mesh

Les réseaux Mesh permettent d'intégrer plusieurs technologies sans fil, offrant ainsi un accès vers Internet ou vers différents types de réseaux [11], [4].

II.5.1.1-Le standard IEEE 802.11s

Les produits de réseau maillé sans fil précédemment diffusés sous des normes propriétaires ont commencé à converger sous la bannière de la Wi-Mesh Alliance et de la norme 802.11s proposée. IEEE 802.11s a été créé en Janvier 2004 pour offrir les fonctionnalités du maillage aux architectures et protocoles de la famille IEEE 802.11. Plus spécifiquement, pour définir les amendements nécessaires au niveau des couches MAC et physique pour la création d'un système de distribution sans fil à base de la technologie IEEE 802.11. Cette norme permet à la fois les réseaux ad hoc maillés sans fil et les réseaux avec infrastructure maillés sans fil, et définit les protocoles de routage nécessaires au bon fonctionnement du système. La sécurité pour la norme proposée comprend la définition de la 802.11i à laquelle il est ajouté des améliorations pour remédier aux problèmes de remise à la clé et d'authentification [6].

II.5.1.2-Le standard IEEE 802.15.5

C'est un standard qui a pour objectif l'introduction de la technologie mesh au niveau des réseaux sans fil personnels WPAN, ce protocole vise à définir et à développer les mécanismes qui doivent être présents au niveau des couches physiques et MAC pour pouvoir mettre en œuvre la technologie Mesh dans les WPANs. Le standard IEEE 802.15.5 donnera naissance à des réseaux sans fil personnels qui offrent des débits plus importants et garantissent des transmissions à des distances plus longues. En outre, les WPANs basés sur la technologie Mesh vont économiser la consommation des batteries des équipements par rapport aux WPANs traditionnels en minimisant les retransmissions [6].

II.5.1.3-Le standard IEEE 802.16a

Le standard IEEE 802.16 visait à résoudre le problème de l'accès sans fil à large bande dans les réseaux sans fil métropolitains. Il opère dans la bande de fréquence de 10 à 60 GHz et utilise une architecture point à multipoint (voir la figure 8), dans cette dernière, une station de base (BS) sert plusieurs clients. Dans la bande de fréquence de 10 à 60 GHz, les communications entre la station de base et les clients doivent se faire à vue directe, donc l'existence d'un obstacle entre la station de base et le client conduit automatiquement à la perte d'information. Par conséquent, ce mode de communication est difficile à mettre en œuvre dans les zones urbaines [6].

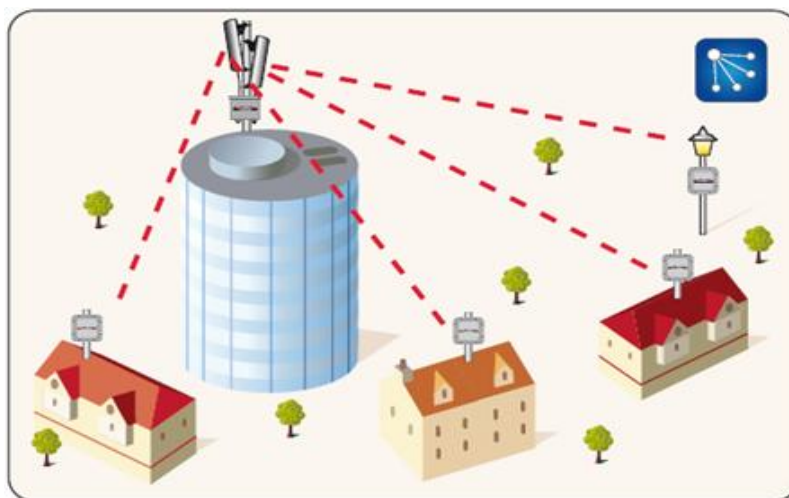


Figure 8 : Architecture point à multipoint [17]

Le standard IEEE 802.16a a été introduit pour résoudre ce problème. Il opère dans des fréquences plus basses (2 à 11 GHz). Cette plage de fréquences n'exige pas l'acquisition d'une licence pour l'exploiter et peut fonctionner même avec la présence d'obstacles.

L'IEEE 802.16a permet aussi la communication inter-clients sans passer obligatoirement par la station de base. (Voir la figure 9).

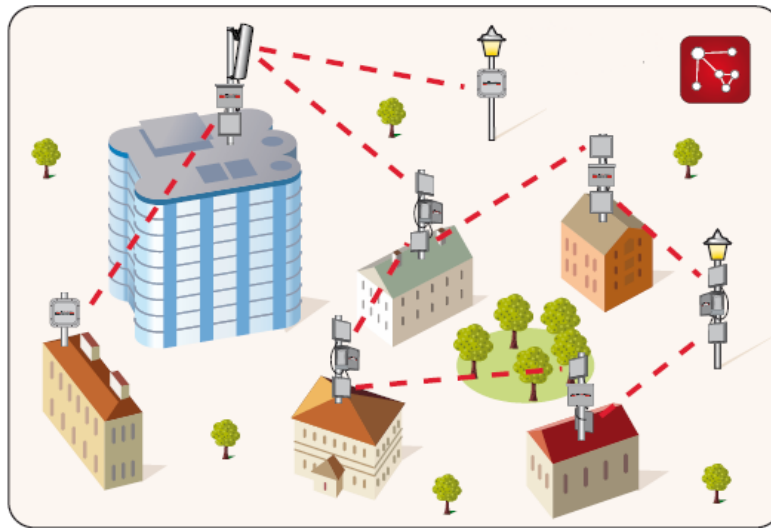


Figure 9 : Architecture mixte PMP et Mesh [17]

II.5.2- Les techniques de transmission

II.5.2.1- La technique OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

La technique OFDM est une modulation multi porteuses, son principe est de diviser la bande passante en tranches appelées sous-canaux, tel que chaque sous canal est utilisé comme un support de communication entre deux nœuds.

Cette technique est implémentée au niveau de points de maillage (mesh point) du réseau mesh. Donc un Mesh point équipé de plusieurs sous-canaux de transmission possède plusieurs interfaces logiques, ce qui diminue l'interférence et augmente la capacité d'un mesh point, et par conséquent il augmente la capacité du réseau. En plus, l'utilisation de la technique OFDM permet de créer des sous réseaux virtuels dont les nœuds utilisent le même sous canal (voir la figure 10), ce qui introduit la flexibilité au niveau de l'architecture du réseau [6].

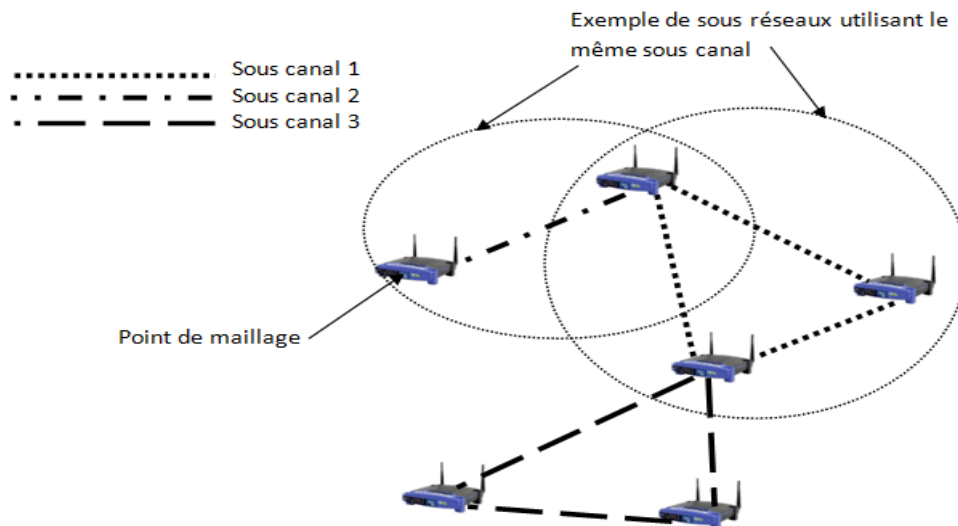


Figure 10 : Les sous réseaux créés par la technique OFDM

II.5.2.2- Les systèmes à antennes multiples MIMO (Multiple Input- Multiple Output)

Vu le déploiement et le succès des réseaux sans fil en général, l'appétit de consommation de ses ressources est augmentée. Les systèmes MIMO sont apparus pour pouvoir fournir des capacités dans le côté transmissions, ils permettent d'offrir des débits importants par rapport au mode de transmission classique, et proportionnel au nombre d'antennes utilisées. Le principe des systèmes MIMO est de doter les nœuds du réseau par plusieurs antennes, ces antennes sont utilisées lors de l'émission et la réception de données.

Comme il est montré dans la figure 11, l'émetteur transmet simultanément plusieurs flux de données par le biais de ses antennes (un flux par antenne). Le récepteur capte par ses antennes des versions transformées et indépendantes du même signal émis, puis il combine ces signaux pour que le signal résultant a une variabilité d'amplitude plus faible que le signal capté par une antenne. Les WMNs ont exploité cette nouvelle technologie afin de satisfaire les besoins de ses clients dans les meilleures conditions (débit et délai de transmission). Puisque le Backbone sans fil du WMN est utilisé comme dorsale sans fil, chargé d'assurer la communication entre les clients, et aussi la connexion des clients à l'Internet, les systèmes MIMO sont implémentés au niveau de la couche physique de ces Nœuds (WMRs) [6], [11].

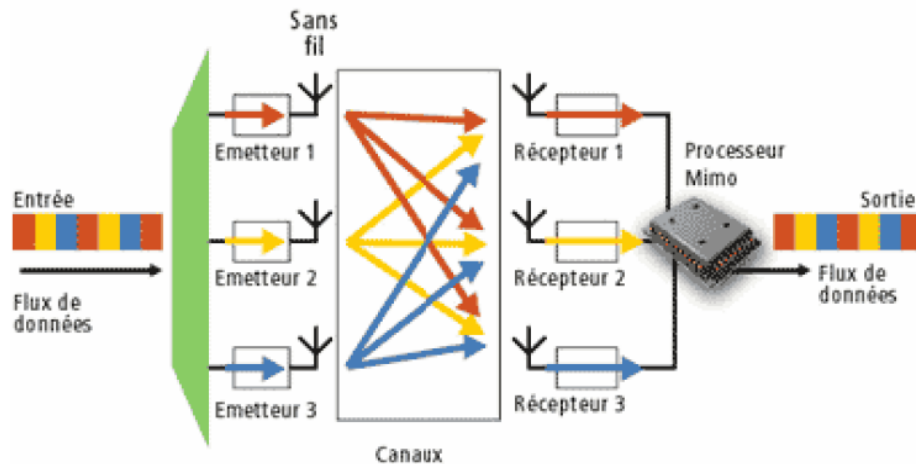


Figure 11 : Système de communication MIMO [7]

II.5.3- Protocoles d'accès au medium

Il est évident que les performances du réseau maillé deviennent plus médiocres lorsque la taille du réseau devient de plus en plus importante, ainsi que le trafic autour des passerelles devient encombrant, ce qui limite la capacité du réseau. Donc l'utilisation des protocoles d'accès au médium est nécessaire [4], [6], [11].

II.5.3.1- CSMA/CA : accès multiple avec écoute de porteuse/évitement de collision

Chaque nœud du réseau possède une zone d'émission et une zone d'interférence, lorsqu'un nœud établit une connexion avec l'un de ses voisins, les autres nœuds situés dans sa zone d'interférence doivent cesser toute activité de transmission sous peine de brouiller la communication. Si un nœud A veut envoyer des paquets à un nœud B alors :

B doit se trouver dans la zone de couverture de A. Tous les nœuds situés dans la zone d'interférence de A doivent se taire, ce principe peut se concrétiser par les étapes suivantes :

- Si un nœud A souhaite émettre des paquets, il écoute d'abord le réseau.
- Si dans sa zone de couverture une transmission est en cours, la transmission est différée.
- Sinon (le médium est libre) le nœud A tire un temps d'attente aléatoire DIFS (Distributed Inter Frame Space) et attend que celui-ci s'écoule. Les nœuds situés dans la zone de couverture de A et qui souhaitent aussi émettre des paquets feront la même tâche. Le premier nœud ayant fini d'attendre a le droit d'émettre, les autres suspendent l'écoulement de leurs temps respectifs.

- Le nœud sélectionné envoie alors un message RTS (Ready To Send) vers sa destination, ce message contient des informations sur le volume de données du paquet et sa vitesse de transmission.
- Si la destination est libre (non brouillée par d'autres transmissions), elle répond par un message CTS (Clear to Send) signifiant qu'elle est prête pour recevoir, donc l'émetteur commence le transfert des données.
- A la fin de communication, la station réceptrice envoie un accusé de réception sous la forme d'un message 'ACK' (Acknowledgement) signifiant que les données ont toutes bien transmises. Et l'opération peut se commencer au début. Durant tout ce temps (du RTS à l'ACK) les autres nœuds qui entendent successivement ces messages doivent cesser toute communication.

II.5.3.2- TDMA (Time Division Multiple Access)

TDMA est une technique d'accès au médium permettant de transmettre plusieurs signaux sur un seul canal sans interférence, cette technique consiste à diviser le temps disponible entre les différents utilisateurs en petits intervalles, appelés slots. Ainsi, chaque utilisateur émet sur des intervalles de temps différents. Il faut noter que dans cette technique on ne trouve pas la notion d'écoute du canal, un nœud émet directement si son slot est arrivé. Pour éviter les collisions, une forte synchronisation entre les utilisateurs est obligatoire.

II.5.3.3- Protocoles Mac Hybride CSMA/ TDMA

Ce protocole consiste à combiner les deux techniques CSMA et TDMA afin de profiter de leurs avantages : la simplicité de CSMA et son efficacité dans le cas d'un faible trafic et l'utilisation optimale de la bande passante de TDMA dans le cas d'un trafic important.

Dans les réseaux maillés les nœuds sont divisés en deux catégories :

- 1- Nœuds situés au voisinage de degré déterminé (k) de la passerelle (où le trafic est important) : utilisent le protocole TDMA.
- 2- Le reste de nœuds (où le trafic est faible) : utilisent le protocole CSMA/CA [15].

II.6- Classifications des réseaux maillés sans fil

II.6.1- Selon le type maillage

II.6.1.1- Maillage total

Dans ce type de réseau, tous les nœuds sont dans la portée de tous, où chaque nœud du réseau est connecté avec tous les autres nœuds (voir la figure 12), donc si le réseau contient N nœuds, alors chaque nœud possède $N-1$ connexions directes (voisins à un saut).

Avantage : Problème de routage n'est pas posé : la communication entre les nœuds se fait directement, ce qui optimise la qualité de service, le débit, le temps de latence et la bande passante.

Inconvénients : La zone de couverture du réseau ne peut pas dépasser la zone de couverture d'un nœud, en plus le problème d'interférence, et de nœud exposé [11], [18].

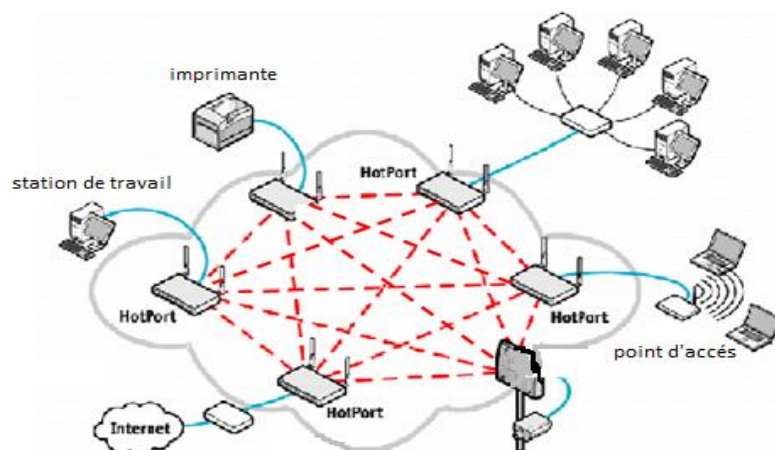


Figure 12 : Maillage total [18]

II.6.1.2- Maillage partiel

Les nœuds sont connectés entre eux formant un graphe connexe (voir la figure 13), tel que chaque nœud peut communiquer avec les autres comme suit :

- Directement s'il s'agit d'une communication avec les voisins de type un saut,
- Indirectement (saut par saut) s'il s'agit d'une communication avec le reste des nœuds,

Avantages :

- La possibilité d'extension de la zone de couverture.
- La diminution du problème d'interférence et du nœud exposé.

Inconvénient :

- Problème de routage : la nécessité d'utiliser un protocole de routage [11], [18].

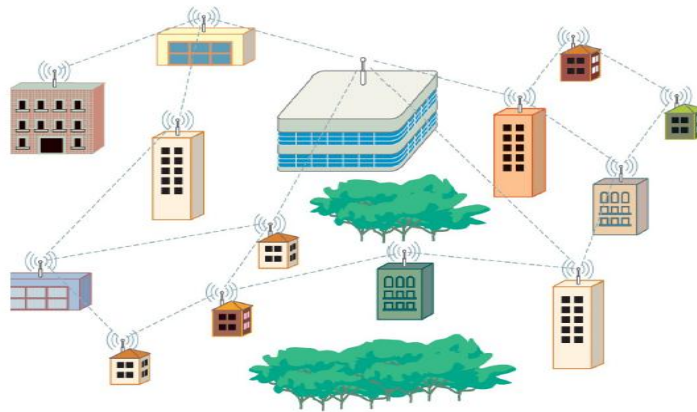


Figure 13 : Maillage partiel [18]

II.6.2- Selon l'architecture

Il existe trois architectures de réseaux Mesh présentés ci-après:

II.6.2.1- Maillage utilisateurs

Les terminaux des utilisateurs servent de routeurs répéteurs à leurs voisins, qui à leur tour rempliront le même rôle, et ainsi de suite. Le déploiement de réseaux maillés au niveau des utilisateurs nécessite une masse critique des usagers et des antennes de base pour assurer le bon fonctionnement [10], [11]. Ce type de maillage constitue un réseau égale à égale multi-sauts, utilise généralement un seul type d'interface radio, (voir la figure 14).

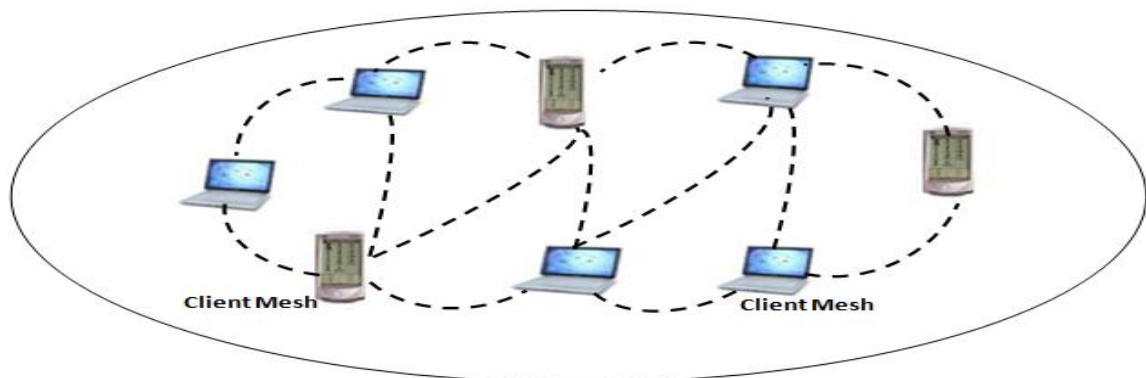


Figure 14 : Maillage utilisateurs

II.6.2.2- Maillage routeurs

Dans ce type, les nœuds sont des nœuds d'accès ou des nœuds clients. En effet, le maillage se fait au niveau des routeurs **Wifi**, Les nœuds routeurs (WMR : *Wireless Mesh Router*) forment le *backbone*, ils sont fixes ou d'une mobilité très réduite, ils n'ont pas de contraintes d'énergie, et permettent de maintenir la connectivité entre différents clients. Un routeur maillé équipé d'une *Gateway* et d'un pont, peut intégrer des fonctionnalités d'accès à plusieurs réseaux assurant ainsi l'interconnexion entre eux. Les nœuds clients (WMC : *Wireless Mesh Client*) forment le réseau maillé client. N'importe quel équipement conventionnel peut être un client maillé (tel que les PC, *Notebooks*, ...). Ils peuvent être mobiles ou stationnaires, connectés de façon directe aux routeurs [10], [11].

La particularité du réseau maillé au niveau de l'infrastructure résulte dans la connectivité de réseaux sans fils dans de vastes espaces, où le collecte des points d'accès avec des réseaux filaires serait techniquement / économiquement impossible, comme par exemple dans une partie d'une ville, des ports de plaisance, des terrains de golf....etc.

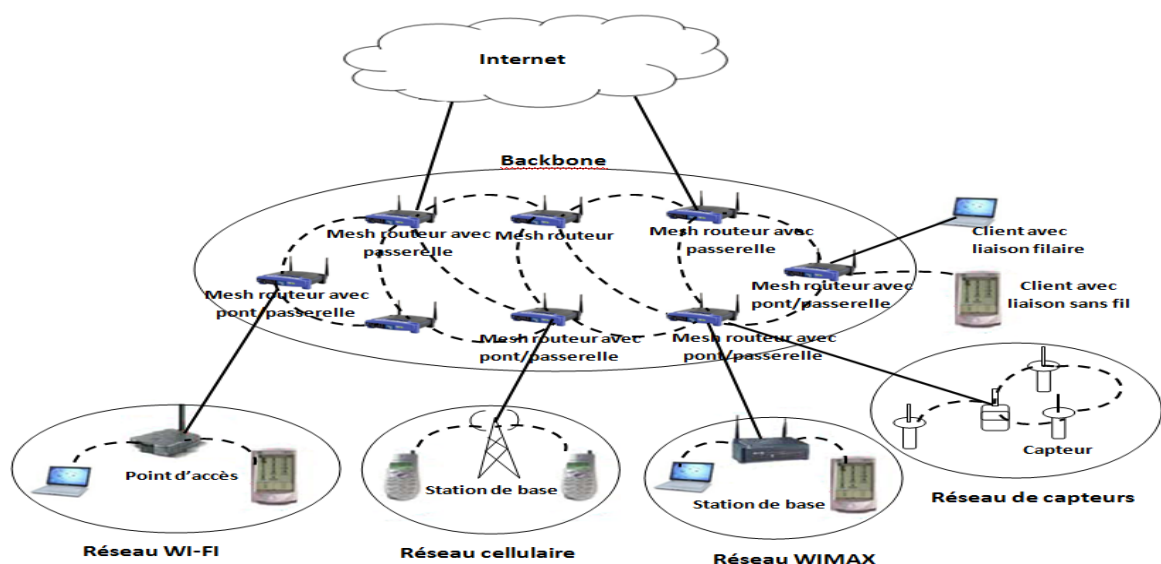


Figure 15 : Maillage routeurs

II.6.2.3- Maillage hybride

Ce type de maillage qui est montré dans la figure 16, combine les deux types de maillage cités précédemment. Tel que le maillage des routeurs assure la communication entre des clients généralement éloignés, ainsi que l'accès aux autres types de réseaux.

Le maillage des clients assure la communication entre des clients situés dans un périmètre restreint sans déranger le backbone formé des routeurs.

Cette combinaison donne plus de solutions dans le calcul des routes, ce qui augmente les performances du réseau [10], [11], [14], [15].

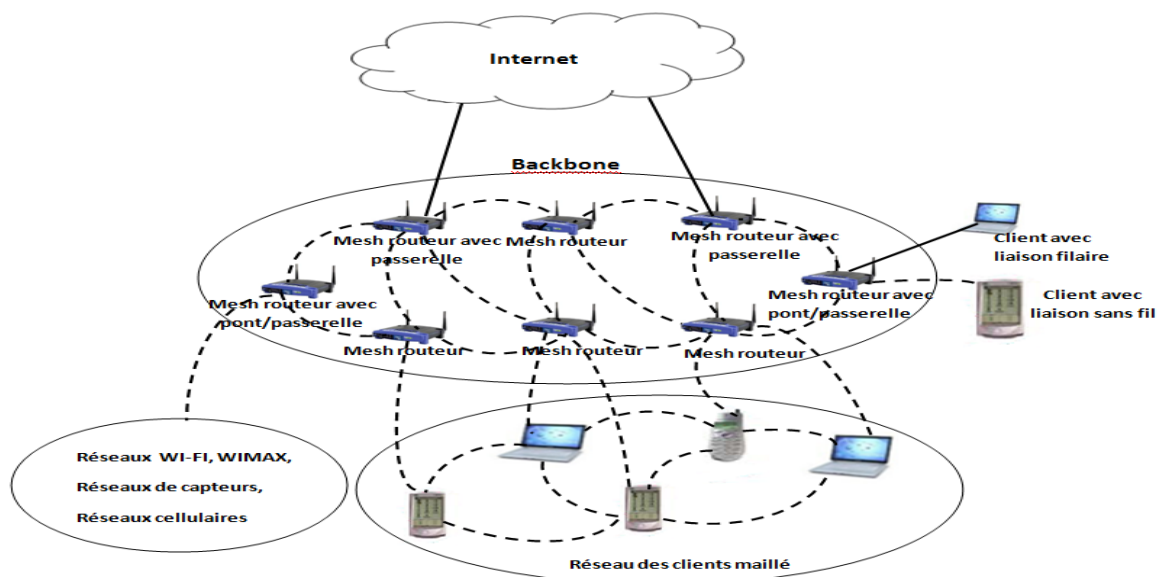


Figure 16 : Maillage hybride

II.7- Applications des réseaux maillés sans fil

A l'origine, la technologie des réseaux maillés mobiles, ou Mesh, a été mise au point par les militaires pour déployer rapidement des réseaux de radiocommunication sur les champs de bataille. En dix ans, grâce aux recherches de l'agence de recherche militaire américaine et de l'INRIA (Institut de recherche en informatique et automatique) en France, ces réseaux sont devenus des réseaux de haut débit et ont fait leurs preuves, notamment en Irak.

Depuis peu, les applications civiles se multiplient tels que la domotique, les systèmes embarqués, les systèmes de surveillance, les systèmes de santé, le multimédia, etc. [10], [15].

1. Réseau Domestique (Broadband Home Networking): Les réseaux domestiques classiques (qui utilise la technologie IEEE 802.11) souffre d'un problème de coût de déplacement des points d'accès filaires, d'où il faut faire une étude préalable de localisation des points d'accès pour assurer une couverture idéale dans tous coins de la maison, et éviter par conséquence le déplacement des points d'accès. Cette étude ne résout pas le problème définitivement, lorsque il y a des changements dans la structure de la maison (travaux de construction), ceci peut engendrer des points morts (non couverts), dans ce cas le déplacement des points d'accès est inévitable. La solution Mesh est capable de résoudre ce problème par l'utilisation des points d'accès sans fil à moindre coût avec une facilité de déplacement et ajustement.

2. Réseau de Communauté et de Voisinage (Community and Neighborhood Networking): Actuellement, la communication entre maisons se fait par l'intermédiaire du réseau internet. Un avantage de cette architecture est la couverture étendue du réseau.

Par contre elle possède des inconvénients :

- 🔗 N'importe quelle communication entre deux utilisateurs passe obligatoirement par internet.

- 🔗 La nécessité d'une passerelle pour chaque maison.

La solution Mesh peut faire face à ces problèmes par l'installation des mesh routeurs pour chaque maison, ainsi que doter quelques maisons par des passerelles pour permettre l'accès aux autres réseaux.

Dans ce cas les communications sont assurées par le backbone, ainsi que l'accès aux autres réseaux se fait seulement lorsqu'il y a besoin par n'importe quel utilisateur, et pas forcément possédant une passerelle.

3. Réseau de Véhicules (Transportation System): La solution classique pour doter un train par un réseau informatique est d'installer une station de base dans chaque véhicule du train. La liaison filaire entre les stations de base pose un problème lors de la connexion / déconnexion des véhicules. La solution mesh permet de résoudre ce problème, tel que l'utilisation des mesh routeurs à la place des stations de base filaires offre une souplesse et une flexibilité dans la connexion / déconnexion des véhicules.

4. Infrastructure de connexion internet: Les fournisseurs Internet peuvent utiliser l'architecture Mesh comme infrastructure pour distribuer la connexion internet dans un périmètre étendu.

II.8- Avantages des réseaux maillés sans fil

- Elimination totale du câblage.
- Les réseaux maillés sont auto-régénérant : Le réseau reste fonctionnel dans le cas où un nœud tombe en panne, ou si une connexion devient inutilisable.
- Réseau à haut débit, par rapport aux autres réseaux mobiles.
- Auto Formation : Après avoir été configuré et activé, les routeurs décident seuls du chemin à prendre.
- Tolérance aux défauts : Si une route sur le réseau devient défaillante, le flux d'information n'est pas interrompu, le réseau va dynamiquement changer de route.
- Auto Curatif : Après une restauration ou un redémarrage, le routeur se reconnecte tout seul.
- Faible coût de l'infrastructure : Le matériel qui permet de créer un nœud maillé ne coûte vraiment pas cher, et est très facile à trouver.
- Le coût au fil du temps : Il n'y a pas de gros investissements pour faire démarrer un projet de réseau maillé, le coût est très faible au départ, il augmente à chaque nouvelle adhésion.
- Facilité de déploiement : Il est très simple de créer, configurer et déployer un nœud.
- La consommation énergétique : Contrairement aux réseaux ad hoc où le problème d'énergie représente un obstacle majeur pour le bon fonctionnement du réseau à cause des ressources énergétiques limitées de la majorité des nœuds ainsi que les tâches supplémentaires accomplies par ces derniers (routage, auto configuration). Dans les WMNs cet obstacle est diminué sensiblement par ce que les tâches de routage, auto-configuration sont assurées par les routeurs qui sont branchés aux ressources énergétiques, ce qui libère les nœuds clients.
- Qualité de service, Robustesse, connectivité et interférence : La pratique montre que la qualité de service des réseaux ad hoc est dégradée dans les chemins formés de longs sauts, ainsi que le réglage de la portée des nœuds est un problème difficile :
 - Une portée réduite minimise le problème d'interférence, par contre cela menace la connectivité et la robustesse du réseau (mobilité aléatoire des nœuds).
 - Une portée étendue assure la connectivité et la robustesse du réseau mais le problème d'interférence est posé.

Contrairement dans les WMNs où les routeurs sans fil sont placés avec des distances réduites, avec des portées réduites, donc les routes proposées sont formées de sauts de

courte distance, ce qui assure une qualité de service idéale, et économise l'énergie, ainsi que le problème d'interférence est réglé, en plus la connectivité du réseau n'est pas menacée par ce que les routeurs sans fil ont une mobilité réduite.

- **Capacité** : Les nœuds dans les réseaux ad hoc classiques utilisent une seule interface de communication ce qui limite la capacité du réseau, par contre les WMNs utilisent généralement deux interfaces : une pour les communications inter routeurs et l'autre pour les communications de type client-routeur ou client-client, ce qui augmente sensiblement la capacité du réseau.
- **Interopérabilité et compatibilité** : Dans les WMNs quelques routeurs accomplissent des tâches supplémentaires (passerelle, pont) ce qui permet l'accès aux autres types de réseaux.
- **La couverture étendue** [11], [15].

II.9- Les challenges des réseaux maillés sans fil

Grace à leurs caractéristiques, les WMNs représentent une solution idéale et prometteuse. Elle offre des avantages intéressants par rapport aux autres réseaux mobiles.

D'autre part, les exigences et les besoins des utilisateurs augmentent et évoluent.

Ce qui oblige les WMNs à améliorer leurs performances pour convoyer ce déploiement.

Le débit, le temps de latence, la sécurité sont des vrais challenges [13], [15].

Le débit : la transmission des données saut par saut dégrade le débit (surtout lorsque le nombre de sauts est élevé).

Le temps de latence : le délai de transit augmente avec l'augmentation du nombre de sauts, les effets du temps de latence dépendent de l'application.

La sécurité : les réseaux mesh comme toutes les autres catégories des réseaux sans fil souffrent des problèmes de sécurité, ces problèmes sont hérités des propriétés du medium de transmission lui-même et des réseaux sans infrastructure fixe.

Parmi les problèmes liés au medium on peut citer les écoutes clandestines, les usurpations d'identité, les vols de session en cours, les faux points d'accès.

L'absence d'infrastructure fixe rend le routage particulièrement vulnérable, ainsi que l'absence d'une structure de confiance complique la gestion des clés publiques et privées et la gestion des certificats.

Distribution des adresses IP : la distribution des adresses IP est essentielle dans les réseaux mesh, le DHCP dans les éventails IP privés fonctionne, mais le problème qui se pose c'est lorsque un réseau mesh 1 rencontrera un autre réseau mesh 2.

Connectivité en milieu non urbain : assurer en plus de l'interconnexion entre les nœuds, la connexion au autres réseau (internet) dans des zones où la connexion filaire n'existe pas (zone rural, désert, océan,...)

Expérimentation : il y a plusieurs choses qui non pas encore expérimentées (échelle, stabilité,...) et qui ne peuvent être analysées en laboratoire.

II.10- Conclusion

Les WMNs est une solution prometteuse pour un déploiement à faible coût, efficace et une couverture étendue, elle permet à un utilisateur d'éteindre rapidement la couverture géographique de son réseau, ainsi d'offrir l'accès aux différentes services situés sur autres réseaux (internet). Les entreprises et les établissements sont motivés le jour après l'autre d'utiliser cette technologie.

L'un des facteurs clé qui à contribuer de façon directe sur le déploiement des WMNs est qu'ils utilisent des composant logiciels (protocoles) et matériels disponibles déjà sous forme de réseaux ad hoc. Mais il faut faire attention : un réseau Mesh n'est pas un réseau ad hoc, d'où plusieurs efforts et recherches sont encours pour réinventer ou adapter ses composants avec les réseaux Mesh. L'un de ses composants est le routage, qui représente une pierre angulaire pour les WMNs. Donc l'adaptation et la rénovation des protocoles de routage est indispensable. Les propriétés des WMNs seront prises en considération dans le routage, qui est notre prochain chapitre.

Chapitre III : LE ROUTAGE DANS LES RESEAUX AD HOC

III.1- Introduction

Le routage consiste à acheminer les paquets d'une source vers une destination suivant un itinéraire optimal. Le problème de routage est apparu avec l'apparition des réseaux filaires étendus, où plusieurs protocoles sont définis. Le contexte sans fil des réseaux ad hoc, a exigé la rénovation de ces protocoles qui doivent prendre en compte les contraintes de cette génération des réseaux.

III.2- Définitions

III.2.1- Routage

C'est l'ensemble des mécanismes mises en œuvre pour établir des routes qui vont acheminer les paquets d'un émetteur à un récepteur d'une manière optimale.

III.2.2- Algorithme de routage

C'est la partie logicielle de la couche réseau qui a la responsabilité de trouver les chemins optimaux selon des règles et des critères bien déterminés.

III.2.3- Protocole de routage

C'est l'ensemble des règles appliquées au format et à la signification des trames, paquets ou messages échangés entre les nœuds [2], [19], [20].

III.3- Problématique et contraintes de routage dans les MANETs

Contrairement aux réseaux filaires classiques où les nœuds sont fixes ce qui donne une stabilité des routes, la mobilité fréquente des nœuds dans les MANET et la nature des liens sans fil impliquent la modification, la disparition des routes, et l'apparition de nouvelles routes. Ainsi que l'absence d'une infrastructure chargée de routage augmente sa complexité. Ce qui change complètement l'approche de routage par rapport aux approches classiques, tel que la participation des nœuds dans le routage et les algorithmes utilisés. D'où la nécessité de trouver des protocoles de routage plus performants pour s'adapter à cet environnement. Ces protocoles exigent des ressources importantes : mémoires, processeurs, bande passante et énergie, mais ces ressources sont rares dans les MANETs vu ses caractéristiques, ce qui

complique la conception de ces protocoles, ainsi que la participation des nœuds dans le calcul des routes nécessite l'utilisation des algorithmes de routage distribués [19].

III.4- Les objectifs des protocoles de routage dans les MANETs

Chemins optimaux : L'objectif principal d'un protocole de routage est de trouver et maintenir le chemin optimal multi sauts pour une communication quelconque, le sens du mot optimal dépend de la nature du réseau, la nature de l'application, la nature des informations échangées et la nature des utilisateurs, on distingue plusieurs points de vue :

- ☞ Chemin optimal qui consomme le minimum de ressources (bande passante, mémoire, processeur, énergie).
- ☞ Chemin optimal qui utilise le minimum de sauts.
- ☞ Chemin optimal qui est le plus court chemin (distance).
- ☞ Chemin optimal qui est le plus sûr.
- ☞ Chemin optimal qui assure la meilleure qualité de service ...etc.

Cet objectif peut être atteint par les points suivants :

- Eviter les boucles de routage.
- Réduire le nombre et la taille des messages de contrôle.
- Maintenir la topologie d'une manière dynamique.
- Réduire et simplifier les traitements [19].

III.5- Classification des protocoles de routage

Il existe plusieurs critères pour classer les protocoles de routage [19], [20]

III.5.1- Selon le moment d'établissement des routes

III.5.1.1- Les protocoles de routage proactifs

Le principe de cette classe est que les routes sont préparées à l'avance. Les protocoles de routage proactifs utilisent une ou plusieurs tables de routage dans chaque nœud. Ils essaient de maintenir les meilleurs chemins existants vers toutes les destinations possibles au niveau de chaque nœud du réseau, pour le faire ils utilisent l'échange régulier des messages de contrôle pour mettre à jour les tables de routage vers toute destination atteignable depuis celui-ci. Cette approche permet de disposer d'une route vers chaque

destination immédiatement au moment où un paquet doit être envoyé. Les tables de routage sont modifiées à chaque changement de la topologie du réseau. Cette approche offre un gain de temps lorsqu'une route est demandée, mais elle peut être coûteuse en terme bande passante à cause de l'émission régulière des messages de contrôle surtout dans les réseaux de grand nombre de nœuds. Les célèbres protocoles basés sur ce principe sont: DSDV, WRP, TBRPF, GSR, FSR, HSR, ZHLS, CGSR, DREAM, LSR et OLSR.

III.5.1.2- Les protocoles de routage réactifs

Le principe de cette classe est que les routes sont établies à la demande. Ces protocoles se basent sur la découverte et le maintien des routes. Suite à un besoin, une procédure de découverte globale de route est lancée, ce processus s'arrête une fois la route trouvée ou toutes les possibilités sont examinées. Dès que la communication est établie, cette route est maintenue jusqu'à ce que la destination devienne inaccessible ou jusqu'à ce que la route ne soit plus désirée. Ce type de routage minimise l'échange des messages de contrôle ce qui libère la bande passante, cependant il est lent à cause de la recherche des chemins, ce qui peut dégrader les performances des applications interactives. Parmi les protocoles basés sur ce principe on cite : DSR, CEDAR, TORA, ABR, SSR, LAR, RDMAR, EARP et AODV.

III.5.1.3- Les protocoles de routage hybrides

Cette classe combine les deux concepts proactif et réactif, afin de profiter de leurs avantages, et limiter leurs inconvénients. Le principe est que chaque nœud utilise un protocole de routage proactif localement (3sauts en général), et un protocole de routage réactif en extérieur. Plusieurs protocoles hybrides existent dont le CBRP (Cluster Based Routing Protocol) et le ZRP (Zone Routing Protocol).

III.5.2- Selon la participation des nœuds dans le routage

III.5.2.1- Les protocoles uniformes

Dans cette classe de protocoles, les nœuds ont le même niveau et les mêmes fonctionnalités en point de vue de la responsabilité de participer dans le routage. La décision qu'un nœud peut router des paquets dépend de sa position. Ainsi que chaque nœud envoie et reçoit des messages de contrôle de routage. Donc la charge est répartie de façon uniforme dans le réseau. Ce type de routage est simple et efficace dans les réseaux de petites tailles, par contre dans le cas des réseaux denses ou de grande dimension, le volume d'information de routage devenant important.

III.5.2.2- Les protocoles non uniformes

Le but de ce type de protocole est de limiter la complexité du routage en réduisant le nombre de nœuds qui contribuent à la détermination des routes. Donc les nœuds n'ont pas la même responsabilité dans le routage. Cette classe de protocoles est composée de deux familles :

- Protocoles à sélection des voisins : Chaque nœud sélectionne un sous-ensemble de ses voisins qui prend un rôle distinct dans l'opération de routage. Chaque nœud fait sa sélection tout seul (indépendamment des autres).
- Protocoles à partitionnement (hiérarchique): Les nœuds négocient un partitionnement sur la topologie, cette opération est effectuée de manière distribuée car il n'y a pas de nœud qui fait office de gestionnaire de topologie. Généralement, les nœuds sont partitionnés en groupes (clusters) dont l'appartenance d'un nœud varie suivant les changements de connectivité. Quelques nœuds sont élus pour prendre un certain rôle dans le routage (leader du groupe [Cluster Head], ou bien passerelle entre deux groupes [Gateway]).

Cette classe de protocoles donne de bons résultats dans les réseaux denses ou de grande taille.

III.6- Les méthodes de routage

La méthode de routage représente l'approche suivie pour déterminer le chemin optimal pour une transmission donnée, il existe plusieurs méthodes : routage par vecteur de distance, routage par état des liens, routage par apprentissage, routage à la source, routage géographique...etc. [19].

III.6.1- Le routage par vecteur de distance

Dans cette méthode chaque nœud dispose d'une table de routage indiquant pour chaque destination l'interface locale permettant de l'atteindre et la meilleure distance qui lui est associée. Cette distance est un coût estimé par chaque nœud à partir des messages envoyés par les nœuds voisins. Elle impose de fixer une métrique commune à chaque nœud, basée par exemple sur :

- Le nombre de sauts, c'est à dire le nombre de nœuds intermédiaires que le paquet devra traverser avant d'atteindre sa destination finale. Dans ce cas, la distance entre deux nœuds voisins est une constante fixée à 1.
- Le nombre de paquets dans la file d'attente de l'interface choisie, ce qui permet d'avoir une idée de l'état de congestion d'un lien particulier.
- Le temps mis pour atteindre le prochain nœud.
- Le coût financier du lien.

Le coût total d'un chemin est alors calculé en sommant les coûts des sauts qui le composent, et ces coûts estimés sont régulièrement envoyés aux nœuds voisins afin qu'à leurs tours ils mettent à jour leurs tables. A l'initialisation, un nœud n'a qu'une connaissance très limitée du réseau, sa table de routage contient que les nœuds auxquels il est directement connecté.

Il va ensuite envoyer le contenu de sa table de routage aux voisins, qui pourront mettre à jour leurs propres tables en se basant sur les coûts indiqués par l'émetteur. Pour pouvoir calculer leur propre estimation du coût, il leur suffit de sommer le coût estimé par le nœud émetteur avec le coût pour atteindre ce dernier, et la mise à jour sera effectuée, ensuite ils émettent à leurs tours leurs tables aux destinations de leurs autres voisins. Au fur et à mesure de la progression dans le réseau, chaque nœud finit par connaître l'existence des nœuds auxquels il n'est pas connecté directement, mais que ses voisins sont capables de les atteindre, en se basant eux mêmes sur d'autres nœuds intermédiaires.

III.6.2- Le routage par état des liens

Contrairement au routage par vecteur de distance, la distance pour atteindre une destination n'est pas calculée au fur et à mesure. Dans cette méthode, chaque nœud tient à jour une base de données décrivant la topologie entière du réseau, c'est à dire l'ensemble des nœuds, et leurs interconnexions, pour calculer la distance qui le sépare d'une destination, chaque nœud construit un arbre dont il est la racine, et suit au fur et à mesure toutes les ramifications du réseau tant qu'il n'a pas atteint la destination finale. Le calcul de cet arbre permet de connaître le chemin complet (c'est à dire tous les nœuds intermédiaires que le paquet devra traverser), cependant seule l'adresse du prochain saut est conservée par le nœud puisque de son point de vue, c'est la seule information utile. Lorsqu'un lien change d'état, le nœud qui le détecte transmet cette information à tous ses voisins par un mécanisme d'inondation. Chaque nœud recevant cette information met à jour

sa base de données, et s'il s'agit d'une information nouvelle (en d'autres termes, s'il n'a pas déjà reçu cette information), il réémet le message d'information à tous ses voisins.

Ce mécanisme permet à tous les nœuds d'être informés rapidement de toute modification, tout en assurant que le message soit détruit dès que tous l'ont reçu. Le principal problème de cet algorithme est le coût, en termes de capacité de calcul et de mémoire demandée par l'élaboration de l'arbre. En effet, à chaque changement de topologie, chaque nœud doit à nouveau dérouler le même algorithme, et calculer le plus court chemin pour atteindre chaque destination présente dans sa base de données. De plus, tout ce calcul paraît fastidieux quand on sait que seule l'adresse du prochain saut est conservée.

III.7- Etude des deux protocoles OLSR et AODV

III.7.1- Le protocole Optimized Link State Routing OLSR

III.7.1.1- Définition

C'est un protocole de routage proactif non uniforme dédié aux réseaux ad hoc inspiré de l'algorithme état des liens classique, développé dans le cadre du projet Hipercom de l'institut national de la recherche en informatique et algorithmique (INRIA) et proposé en tant que RFC (Request For Comment). Il a comme objectif de fournir des routes de plus court chemin en termes de nombre de sauts. OLSR utilise les multipoints relais (MPR) pour retransmettre les messages diffusés au cours d'une inondation dans le but de réduire le nombre de messages envoyés, ce qui réduit par conséquent les frais. Tel que : lorsqu'un nœud MPR reçoit un message de diffusion, il traite et rediffuse le message. Par contre un nœud non MPR traite seulement le message. Par ailleurs, OLSR utilise le concept d'interface, tel qu'un nœud peut posséder plusieurs instances d'écoute, ce qui lui donne le comportement de plusieurs nœuds virtuels. C'est un protocole qui fonctionne mieux dans les réseaux denses et larges.

III.7.1.2- Notions de base

❖ **Nœud voisin à n-sauts** : (w) est un voisin à n sauts de (u) si u peut communiquer avec (w) par l'intermédiaire de (n-1) nœuds.

Exemple : (u)------(v) : (v) est le voisin de (u) à un 1 saut.

(u)------(v)------(w) : (w) est le voisin de (u) à 2 sauts

(u)------(v)------(w)------(x) : (x) est le voisin de (u) à 3 sauts.

❖ Format d'un paquet OLSR

Dans OLSR un paquet est structuré comme suit :

Longueur du paquet		N° de séquence du paquet	} Entête du paquet
Type de message	Temps de validité	Taille du message	
Adresse de l'expéditeur			} Entête du message
TTL : nbre maximal de sauts	Nombre de sauts atteints	Numéro de séquence du message	
Message			
Type de message	Temps de validité	Taille du message	
Adresse de l'expéditeur			
TTL : nombre maximal de sauts	Nombre de sauts atteints	Numéro de séquence du message	
Message			
.			
.			

Figure 18: Format d'un paquet OLSR

III.7.1.3- Messages échangés

Les bases d'informations sont obtenues et calculées sur la base de l'échange de quatre types de messages.

III.7.1.3.1- Multiple Interface Déclaration (MID)

Chaque nœud équipé de multiples interfaces, doit informer l'ensemble des nœuds du réseau de sa configuration par l'envoi périodique du message 'MID' qui contient l'ensemble de ses adresses interfaces (voir la figure 19). Cette diffusion sert à l'établissement de la table d'association des interfaces multiples.

Longueur du paquet		Numéro de séquence du paquet
MID-MESSAGE	MID_HOLD_TIME	Taille du message
Adresse de l'expéditeur		
TTL=255	Nombre de sauts atteints	Numéro de séquence du message
Adresse interface		
Adresse interface		
...		

Figure 19: Format d'un message MID

III.7.1.3.2- Message Hello

Chaque nœud informe ses voisins à un saut, l'état de son voisinage par l'envoi périodique du message 'Hello' qui contient la liste de ses liens sauf le lien du nœud destination (voir la figure 20). L'échange périodique du message 'Hello' et les informations de la table d'association des adresses multiples servent à mettre à jour les tables : Ensemble des voisins, Table de voisinage et l'ensemble de voisinage à deux sauts, qui servent à leur tour de calculer l'ensemble des MPRs et l'ensemble des MPRs Selectors.

Longueur du paquet		Numéro de séquence du paquet	
HELLO_MESSAGE	NEIGHB_HOLD_TIME	Taille du message	
Adresse de l'expéditeur			
TTL =1	Nombre de sauts atteints	Numéro de séquence du message	
Réservé		Intervalle d'émission	Volonté
Code lien	Réservé	Taille du message lien	
Adresse de l'interface du nœud voisin			
Adresse de l'interface du nœud voisin			
.....			
Code lien	Réservé	Taille du message lien	
Adresse de l'interface du nœud voisin			
Adresse de l'interface du nœud voisin			
....			
.....			

Figure 20: Format d'un message Hello

III.7.1.3.3-Message Topology Control (TC)

Les messages 'TC' sont diffusés dans la totalité du réseau par l'inondation optimisée par les MPRs. Ils servent à calculer les routes vers n'importe quelle destination. Un message de contrôle contient dans sa partie données un numéro de séquence incrémenté à chaque chargement de topologie, il indique la fraîcheur des informations diffusées, ainsi que la liste des voisins du nœud émetteur identifiés par leur adresse principale, cette ensemble inclus son ensemble des MPR selectors (voir la figure 21).

Longueur du paquet		Numéro de séquence du paquet
TC_MESSAGE	TOP_HOLD_TIME	Taille du message
Adresse de l'expéditeur		
TTL=255	Nombre de sauts atteints	Numéro de séquence du message
ANSN		Réservé
Adresse principale voisin 1		
Adresse principale voisin 2		
Adresse principale voisin 3		
.....		

Figure 21: Format d'un message TC

III.7.1.3.4- Message HNA (Host and Network Association)

Chaque nœud passant une interface d'un autre réseau n'implémentant pas le protocole OLSR (joue le rôle d'une passerelle) génère un message 'HNA' qui sera diffusé dans tout le réseau, pour annoncer sa configuration.

Longueur du paquet		Numéro de séquence du paquet
HNA_MESSAGE	HNA_HOLD_TIME	Taille du message
Adresse de l'expéditeur		
TTL=255	Nombre de sauts atteints	Numéro de séquence du message
Adresse réseau		
Masque réseau		
Adresse réseau		
Masque réseau		
....		

Figure 22: Format d'un message HNA

III.7.1.4- Les bases d'informations

OLSR maintient dans chaque nœud une image locale et globale de la topologie du réseau, ceci nécessite le stockage et la mise à jour plusieurs bases d'informations dans la mémoire de chaque nœud.

III.7.1.4.1- Table d'association des interfaces multiples

Un nœud peut être équipé de plusieurs interfaces, chaque interface est référenciée par une adresse, donc un nœud peut posséder plusieurs adresses. Mais il est identifié par une seule

adresse appelée **adresse principale**. La table d'association des interfaces multiples fait l'association entre les interfaces et l'adresse principale pour chaque destination.

Adresse de l'interface d'un nœud	L'adresse principale de ce nœud	Heure d'expiration

Tableau 1: Table d'association des interfaces multiples

III.7.1.4.2- L'ensemble des voisins

Cette table contient pour chaque interface du nœud, la liste des interfaces voisines avec une information sur l'état du lien. A l'expiration de l'enregistrement, il doit être supprimé.

Adresse de l'interface du nœud local	Adresse de l'interface du nœud voisin	Temps où le lien est considéré symétrique	Temps où le lien est considéré asymétrique	Temps d'expiration de l'enregistrement

Tableau 2: Ensemble des voisins

III.7.1.4.3- Table de voisinage

Cette table contient la liste des voisins du nœud local identifiés par leur adresse principale avec une information sur l'état du lien et leur volonté de participation dans le routage, celle-ci est mesurée par un entier compris entre 0 et 7.

Adresse principale d'un voisin	Etat de lien	volonté

Tableau 3: Table de voisinage

III.7.1.4.4- Ensemble de voisinage à deux sauts

Cette table contient la liste des voisins symétriques du nœud local à deux sauts. Ainsi que le voisin intermédiaire (tous identifiés par leur adresse principale). Le temps d'expiration précise la date et l'heure à laquelle expire l'enregistrement et doit être enlevé.

Adresse principale du voisin à 1 saut	Adresse principale du voisin à 2 sauts	Temps d'expiration

Tableau 4: Ensemble de voisinage à deux sauts

III.7.1.4.5- Ensemble des MPRs

Chaque nœud maintient l'ensemble de ses MPRs identifiés par leur adresse principale.

MPR

Tableau 5: Ensemble des MPRs

III.7.1.4.6- Ensemble des MPR Selectors

Chaque nœud enregistre une série d'enregistrements MPR selectors décrivant les voisins qui l'ont choisi comme MPR.

Adresse principale du nœud MPR selector	Temps d'expiration

Tableau 6 : Ensemble des MPR Selectors

III.7.1.4.7- La table topologique

Cette table donne une vision globale du réseau, elle contient pour chaque destination au moins un enregistrement contenant l'adresse principale de la destination, un MPR qui permet l'accès à cette destination, plus un numéro de séquence et un temps d'expiration.

Adresse principale d'une destination	Dernier MPR de la destination	Numéro de séquence	Temps d'expiration

Tableau 7: La table topologique

III.7.1.4.8- La table de routage

Chaque nœud maintient une table de routage qui permet de router les paquets pour une communication entre deux nœuds du réseau. La table est recalculée pour mettre à jour son contenu par rapport aux changements produits dans le réseau.

Destination	Suivant	Distance	Interface

Tableau 8: La table de routage OLSR

Un enregistrement de cette table est interprété comme suit : Un nœud "**Destination**" est atteint par un itinéraire composé d'un nombre de sauts mesuré à "**Distance**", tel que le nœud du saut suivant dans l'itinéraire est "**Suivant**", qui est un voisin symétrique du nœud local accessible par l'interface "**Interface**".

III.7.1.4.9- Ensemble des associations

Chaque nœud enregistre une table contient des informations sur les passerelles du réseau. Un enregistrement de cette table est composé de : l'adresse de la passerelle, l'adresse du réseau, le masque du réseau et le temps d'expiration. Cette table est établie sur la base de l'échange périodique du message 'HNA'.

Adresse de la passerelle	Adresse du réseau	Masque du réseau	Temps d'expiration

Tableau 9: Ensemble des associations

III.7.1.5- Principe de fonctionnement

OLSR est un protocole Proactif qui utilise la méthode état des liens, basé sur l'inondation effectuée par le mécanisme de diffusion optimisé par les MPRs. OLSR est composé d'un noyau qui assure le fonctionnement de base (fournir des routes de plus court chemin), ainsi d'un ensemble de fonctions auxiliaires.

III.7.1.5.1- Fonctionnement de base

Le module fonctionnement de base consiste à assurer le routage dans les réseaux ad hoc. Le routage passe par les étapes suivantes :

a- Annonce des interfaces multiples

Chaque nœud doté des multiples interfaces annonce périodiquement des informations concernant sa configuration par l'inondation du message 'MID', cette inondation est optimisée par le mécanisme des MPR. Les informations diffusées sont enregistrées dans la table d'association des interfaces multiples de chaque nœud du réseau.

b- Découverte de voisinage

Chaque nœud envoie régulièrement un message 'Hello' vers ses voisins à un saut (TTL=1) sur les interfaces par lesquelles la connexion est activée, contenant la liste de ses voisins qu'il entend, et aussi la liste des nœuds entendus par ceux-ci, également ce nœud reçoit les messages 'Hello' de ses voisins à un saut. Cela permet de savoir l'état des liens de ses voisins à un saut (symétrique ou asymétrique), ainsi d'avoir une vision à deux sauts.

En plus, les informations concernant l'ensemble des voisins à un saut identifiés par adresse interface sont enregistrées dans la table ensemble des voisins. Les informations concernant le voisinage à un saut identifiées par l'adresse principale sont enregistrées dans la table de voisinage. Les messages 'Hello' échangés permettent de savoir l'état des liens des voisins à deux sauts, ces informations sont stockées dans la table Ensemble de voisinage à deux sauts.

c- Sélection des MPR :

Sur la base de la table Ensemble de voisinage à deux sauts, chaque nœud calcule et élit la liste de ses MPRs, en utilisant l'algorithme de calcul des MPRs cité dans l'annexe. La liste des MPRs est enregistrée dans la table Ensemble des MPRs. Cette liste est annoncée aux voisins grâce à des messages 'Hello'. Donc chaque nœud peut savoir les nœuds qui l'ont choisi comme MPR, et enregistre cet ensemble dans la table Ensemble des MPR selectors.

d- Découverte de la topologie

Chaque nœud MPR diffuse régulièrement des messages 'TC' (topologie control) dans tout le réseau, en utilisant l'inondation par multipoint relais. Le message 'TC' contient pour un

nœud MPR donné la liste des MPR selectors. Sur la base des messages 'Hello' et des messages 'TC', chaque peut maintenir sa table topologique.

e- Calcul de la table de routage

Chaque nœud possède une table de routage contient pour chaque destination du réseau le tuple suivant : (destination, suivant, distance, interface) indiquant pour chaque destination le prochain saut à effectuer et la distance entre le nœud local et la destination mesurée en nombre de sauts.

La table de routage est établie sur la base des informations contenants dans la table de voisinage et la table topologique, en exécutant l'algorithme suivant :

- 1- Détruire toutes les entrées ultérieures de la table de routage
 - 2- Insertion dans la table de routage tous les voisins symétriques à un saut (la distance=1)
 - 3- Boucle pour h initialisé à 1 et incrémenté de 1 à chaque étape, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de nouvelles entrées dans la table de routage. A chaque étape, on insère les destinations à $(h+1)$ sauts.
 - Pour chaque tuple (destination, dernier, n° de séquence, temps d'expiration) dans la table topologique, si 'destination' n'est pas une entrée dans la table de routage, et si 'dernier' correspond à une entrée de la table de routage (dernier, suivant, h) alors on insère une nouvelle entrée dans la table de routage (destination, suivant, $h+1$, interface).
- Fin.

III.6.1.5.2- Fonctionnement auxiliaire

Le module fonctionnement auxiliaire est composé d'un ensemble de fonctions assurant des fonctionnalités supplémentaires qui peuvent être applicables dans des scénarios précis, exemple :

- La connectivité avec des domaines de routage non OLSR.
- La détection avancée des liens.
- La propagation de données topologiques redondantes.
- L'inondation redondante,... [9], [19], [21], [22], [31].

III.7.2- Le protocole Ad Hoc On Demand Distance Vector AODV

III.7.2.1- Définition

AODV est un protocole de routage réactif multi sauts basé sur l'algorithme de **Bellman-ford**, destiné à être utilisé par des nœuds mobiles dans un réseau ad hoc. Proposé par les membres du groupe de travail MANET, spécifié dans le RFC 3561, inspiré du protocole DSDV par l'amélioration de son algorithme de routage.

C'est un protocole qui découvre les routes demandées par la technique des numéros de séquence pour éviter les boucles de routage et le comptage à l'infini, ainsi que pour maintenir la consistance des informations et de garder les routes les plus fraîches, en conservant les chemins d'une façon distribuée dans une table de routage stockée dans chaque nœud.

III.7.2.2- Les messages échangés

L'ensemble des flux échangés dans AODV sont de type UDP, envoyés sur le port 654, un flux peut être l'un des messages suivants :

III.7.2.2.1- Demande de route (Route REQuest RREQ)

C'est un message diffusé en mode broadcast lors de la recherche d'une nouvelle route, ou de la maintenance d'une route cassée.

Type=1	J	R	G	D	U	Réservé	Nombre de sauts
ID RREQ							
Adresse IP destination							
Numéro de séquence destination							
Adresse IP source							
Numéro de séquence source							

Figure 23: Format d'un message RREQ

Tel que :

J : joignez le pavillon, réservé pour le multicast.

R : réparation du pavillon, réservé pour le multicast.

G : indique si une Réponse de route 'RREP' générée par un nœud intermédiaire devrait être envoyée vers la destination spécifiée dans 'RREQ'.

D : indique que seule la destination peut répondre au message 'RREQ'.

Nombre de sauts : le nombre de sauts entre le nœud source et le nœud qui traite le message 'RREQ'.

ID RREQ : identifiant de la demande, il est obtenu par la combinaison de l'adresse IP de la source et d'un numéro de séquence.

Numéro de séquence destination : le dernier numéro de séquence reçu dans le passé du nœud source pour toute route vers la destination.

Numéro de séquence source : le numéro de séquence en cours pour être utilisé sur la route désirée.

III.7.2.2.2- Réponse de route (Route REPLY RREP)

C'est un message envoyé vers la source pour l'informer qu'il existe un chemin vers la destination en question.

Type=2	R	A	Réservé	Taille préfixe	Nombre de sauts
Adresse IP destination					
Numéro de séquence destination					
Adresse IP source					
Durée de vie					

Figure 24: Format d'un message RREP

Tel que :

R : réparation du pavillon, utilisé pour le multicast.

A : une reconnaissance nécessaire par un accusé de réception.

III.7.2.2.3- Erreur de route (Route ERROR RERR)

C'est un message envoyé vers la source par le nœud qui détecte un lien brisé dans une route active.

Type =3	N	Réservé	Nombre de dest
Adresse IP de destination inaccessible			
Numéro de séquence de destination inaccessible			
Adresse IP de destination inaccessible additionnelle			
Numéro de séquence de destination inaccessible additionnel			

Figure 25: Format d'un message RERR

Tel que

N : indique que la route à été réparée localement.

Nombre de dest : c'est le nombre de destinations concernées par le lien brisé.

III.7.2.2.4- Accusé de réception de réponse de route (Route REply ACKnowledgment RREP-ACK)

C'est un message envoyé comme accusé de réception du message 'RREP' avec la présence du bit A. Cela se fait habituellement lorsqu'il y a danger de liens unidirectionnels.

Type =4	Réservé
---------	---------

III.7.2.3- Les bases d'informations

Malgré que la recherche des routes soit réactive dans AODV, chaque nœud doit stocker et maintenir des informations pour le fonctionnement du protocole AODV.

III.7.2.3.1- La table de routage

C'est la table de base, une entrée de cette table contient essentiellement :

@IP dest : l'adresse IP de la destination.

N°seq dest : le numéro de séquence destination qui permet d'éviter les boucles de routage.

Nbre de sauts : c'est la distance entre le nœud local et la destination mesurée en nombre de sauts.

Suivant : l'adresse du nœud qui représente le premier pas dans l'itinéraire.

Liste des précurseurs actifs : liste des nœuds originaires des transmissions vers la destination qui passent par le nœud local.

Temps d'expiration : temps au bout duquel l'entrée est expirée et doit être supprimée.

Tampon de requête : utilisé pour assurer qu'une seule réponse 'RREP' est envoyée par requête 'RREQ'.

@ IP dest	N° seq dest	Nbre de sauts	Suivant	Liste précurseurs actifs	Temps d'expiration	Tampon de requête

Tableau 10: La table de routage AODV

III.7.2.3.2- La table d'historique

C'est une table qui enregistre le traitement des 'RREQ'. Une entrée de cette table identifie d'une manière unique le paquet 'RREQ' pour savoir si cette requête a déjà été vue et traitée ou non.

@ source	ID requête

Tableau 11: Table d'historique

III.7.2.4- Principe de fonctionnement

AODV utilise le principe des numéros de séquence afin d'éviter les boucles infinies et de maintenir la consistance des informations de routage. Le fonctionnement du protocole AODV est basé sur deux mécanismes : Découverte de routes et Maintenance de routes.

III.7.2.4.1- Découverte de routes

Lorsqu'un nœud (S) a besoin de connaître la route qui mène vers une destination donnée (D), il consulte sa table de routage :

- Si le chemin est connu (existence d'une route fraîche) : il commence l'envoi des paquets directement.
- Sinon : destination inconnue ou chemin expiré : dans ce cas le nœud source (S) diffuse un message demande route 'RREQ', ensuite il attend la réponse. Le nœud source utilise une technique d'expansion d'anneau afin d'éviter les déplacements inutiles des paquets 'RREQ' dans la totalité du réseau. Cette technique consiste à commencer la recherche avec un nombre de sauts initial et un délai correspond. Si la recherche est infructueuse, l'opération sera relancée avec augmentation du nombre de sauts (respectivement le délai d'attente). Cette opération est répétée jusqu'à obtention d'une réponse de route 'RREP' ou dépassement du nombre de sauts maximum, c'est le diamètre du réseau, dans ce cas : la destination est déclarée injoignable. Lorsqu'un nœud intermédiaire (i) reçoit un message 'RREQ', il vérifie dans sa table historique si la requête existe (déjà traitée), dans ce cas la requête sera ignorée. Sinon il inscrit l'identifiant de la requête dans sa table historique, ensuite il met à jour sa table de routage par l'enregistrement des paramètres de routage de la route qui mène vers la source (S), cette route est utilisée comme chemin inverse pour la réponse de route 'RREP', puis il passe au traitement de la requête 'RREQ', on distingue deux cas :

Cas1 : le nœud (i) est lui-même la destination désirée, dans ce cas il compare son propre numéro de séquence avec celui du 'RREQ' : s'ils sont égaux alors il incrémente son numéro de séquence, sinon il ne le change pas. Ensuite il envoie la réponse de route 'RREP'.
Remarque : ce cas ne doit se produire que très rarement puisque le voisin de la destination appartenant à la route connaît le chemin vers la destination, donc c'est lui qui génère la 'RREP'.

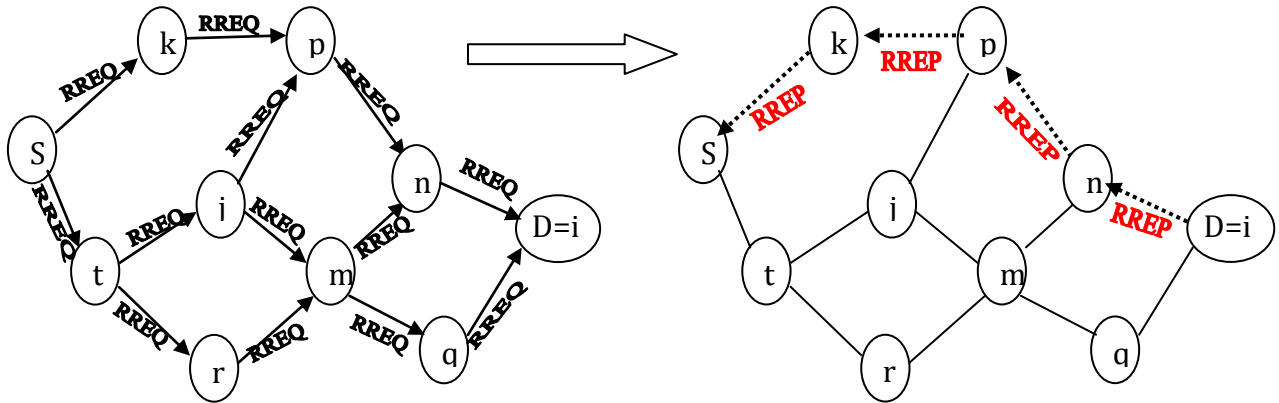


Figure 26: Exemple de découverte de route avec RREP générée par la destination

Cas2 : le nœud (i) vérifie dans sa table de routage, l'existence d'un chemin fraîche vers la destination. Si oui alors il génère une réponse de route 'RREP', puis il copie un numéro de séquence connu de la destination dans le champ "numéro de séquence destination" de la 'RREP' avant de l'envoyer vers la source. De plus, le nœud intermédiaire (i) informe le nœud destinataire qu'il est sollicité par un nœud (S), à l'aide d'une 'RREP' car celui-ci ne connaît pas la route pour aller vers le nœud source(S), (en réalité ceci est réalisé uniquement si le bit 'G' pour gratuitous est présent dans la 'RREQ').

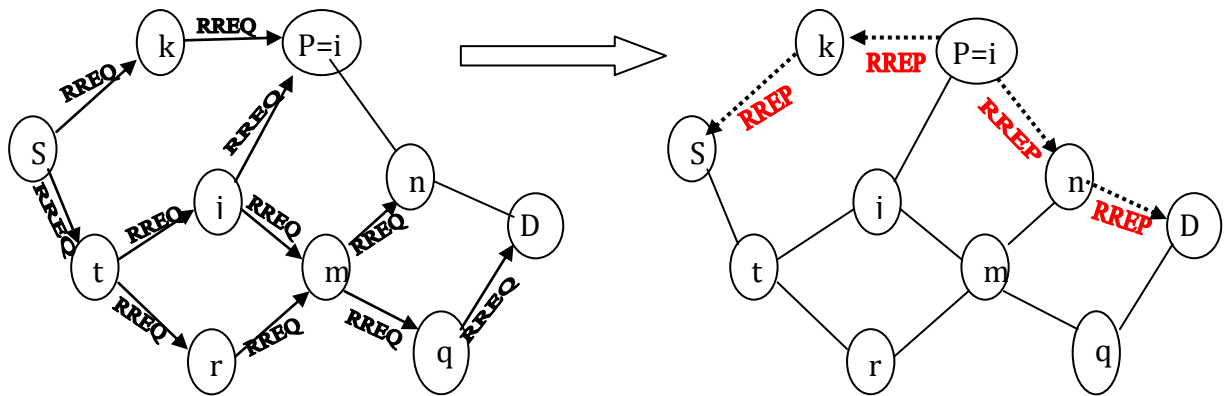


Figure 27: Exemple de découverte de route avec RREP générée par un nœud intermédiaire

Sinon, (le chemin vers la destination est encore inconnu ou expiré) alors le nœud (i) compare le numéro de séquence enregistré dans sa table de routage avec celui de la 'RREQ', puis il garde le maximum, puis il incrémente le nombre de sauts de la 'RREQ' ensuite il rediffuse de sa part le paquet 'RREQ'.

III.7.2.4.2- Maintenance des routes

Le mouvement des nœuds appartenant à une route active donnée peut causer une défaillance dans les liens composants la dite route. Pour cela AODV offre une maintenance des routes actives aussi longtemps possible, cette maintenance est réalisée par les étapes suivantes :

- a- **Détection des défaillances** : chaque nœud appartenant à un itinéraire actif vérifie la connectivité de ses voisins appartenant aussi à un itinéraire actif par l'envoi périodique du message 'Hello'. S'il compte trois messages 'Hello' consécutifs sans aucune réponse, alors le lien est considéré défaillant.

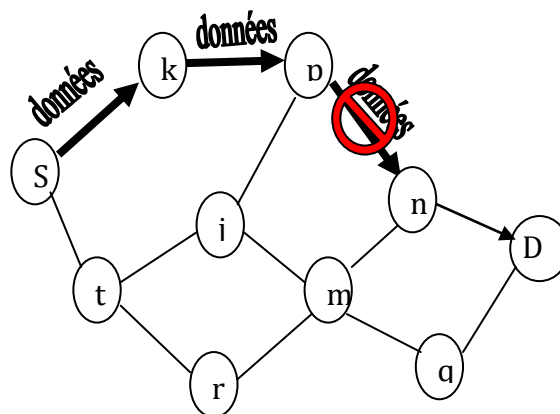


Figure 28: Exemple de détection d'une rupture d'un lien actif

- b- **Tentative de réparation locale** : le nœud qui détecte une rupture dans un itinéraire actif essaie de réparer le lien localement, pour cela il incrémente le numéro de séquence de la destination puis il diffuse une 'RREQ' pour cette destination, puis il attend une 'RREP'. Pendant la tentative de réparation, les paquets de données doivent être tamponnés. Si le nœud de réparation réussit sa mission, il achève l'envoi des paquets sans informer le nœud source, sinon il procède à l'étape (c).

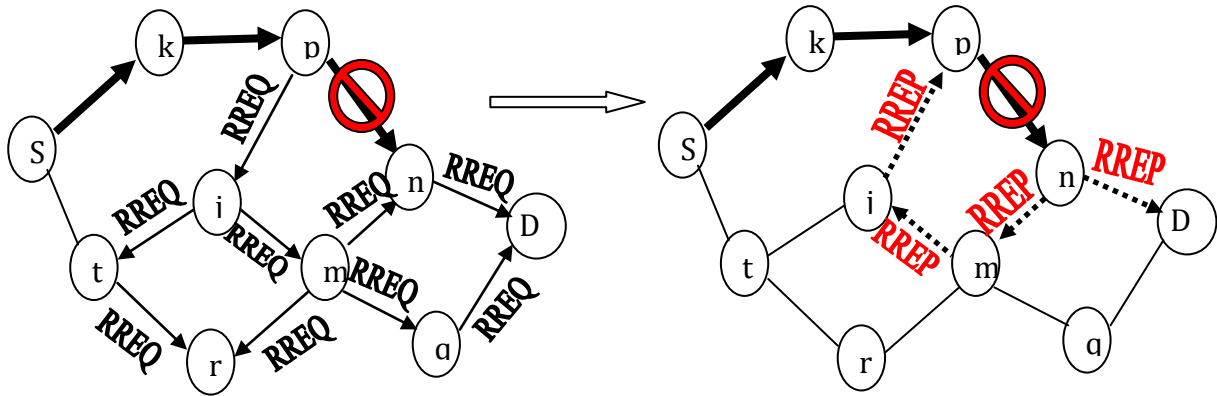


Figure 29: Exemple de réparation locale avec succès

- c- **Annonce d'une erreur dans la route** : le nœud qui détecte la rupture, commence par l'établissement de la liste des destinations inaccessibles par le lien perdu, à l'aide de sa table de routage, puis il diffuse un message d'erreur 'RERR' vers les nœuds sources qui ont sollicités ces destinations, la diffusion est débutée par l'envoi du 'RERR' vers les précurseurs actifs pour chaque destination [9], [19],[21],[23],[31].

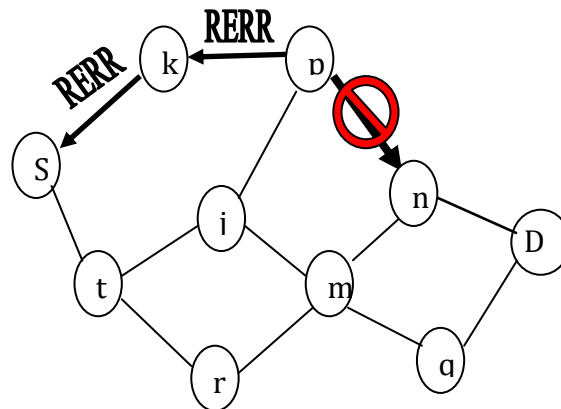


Figure 30: Exemple d'annonce d'une erreur de route

III.8- Conclusion

Nous avons montré dans ce chapitre les différentes classes des protocoles de routage dans les réseaux ad hoc. Nous nous sommes focalisés ensuite sur les deux protocoles AODV et OLSR qui sont concernés par notre étude.

Nous avons étudié en détail le fonctionnement de chaque protocole, les messages échangés et les bases d'informations stockées.

Chapitre IV : LE ROUTAGE DANS LES WMNs - EXPERIMENTATION ET EVALUATION

IV.1- Introduction

L'étude des trois chapitres précédents nous a permis de comprendre en détail les caractéristiques des réseaux maillés sans fil tel que l'architecture, les techniques de transmission, les différentes classifications, les domaines d'application, les avantages et les enjeux de cette solution.

Ainsi que les deux protocoles de routage dédiés pour les réseaux ad hoc : OLSR et AODV en montrant le principe de fonctionnement, l'algorithme utilisé, les paquets échangés et les bases d'informations stockées.

Ce chapitre a pour but d'appliquer et tester ces deux protocoles dans un environnement de réseaux maillés sans fil, et de suivre le comportement de chaque protocole pour pouvoir analyser ses performances et faire des comparaisons entre ces deux protocoles. Dans la pratique cette opération pose un problème par ce qu'elle nécessite de posséder un nombre important de nœuds (mobiles et fixes).

Une manière plus pratique et moins couteuse consiste à utiliser un simulateur qui est capable de représenter les principales caractéristiques d'un réseau maillés sans fil, et d'intégrer les protocoles de routage OLSR et AODV. Ainsi qu'il peut réaliser plusieurs scenarios dans un temps plus court. Pour cela on va utiliser le simulateur NS2 (Network Simulator 2), version 2.34.

IV.2- Présentation de NS2

NS2 est un simulateur des réseaux filaires et sans fil, il fournit un environnement permettant de représenter des différentes architectures des réseaux avec différents technologies et techniques de transmission, ainsi que des protocoles de routages. C'est un simulateur à évènements discrets développé en 1989 dans un but de recherche en tant que variante du "Real Network". Il a connu une évolution exponentielle aux cours des années.

NS2 est écrit en C++ et en OTcl (Object Tools command language), il est fourni avec divers outils d'analyse complémentaires [24],[25].

IV.3- Modèles de mobilité

Le mouvement des nœuds dans un réseau sans fil en général a un impact très important dans le module routage.

Dans les WMNs, nous distinguons deux types de mobilité :

La mobilité des mesh routeurs qui est nul ou très réduite.

La mobilité des Mesh clients qui est aléatoire, où un mesh client peut se déplacer vers n'importe quelle destination avec n'importe quelle vitesse [24],[26].

Le simulateur NS2 intègre plusieurs modèles de mobilité des nœuds à savoir :

IV.3.1- Le modèle de mobilité avec points de passage aléatoires WPM

Dans ce modèle un nœud commence par un séjour dans son endroit initial pendant une période de temps, après l'écoulement de cette période, il choisit une destination aléatoire (un point) et il commence le déplacement avec une vitesse aléatoire (comprise entre 0 et la vitesse maximale prédéfinie) vers cette destination.

Une fois la destination est atteinte, le nœud recommence le même processus, comme il est montré dans la figure 31.

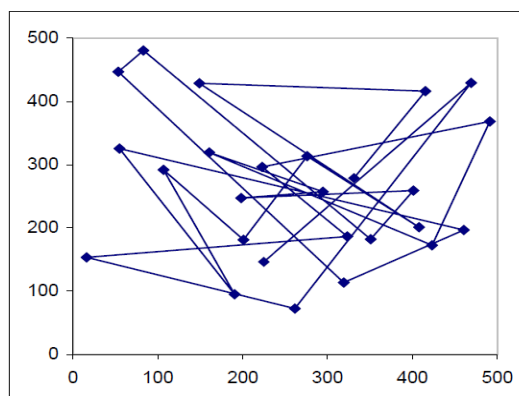


Figure 31 : La trace de déplacement d'un nœud utilisant le modèle de mobilité avec points de passage aléatoires [26]

IV.3.2- Le modèle de mobilité à marche aléatoire RWM

Dans ce modèle, un nœud se déplace de son endroit courant à un nouvel endroit en choisissant aléatoirement une direction et une vitesse comprises entre $[0, 180^\circ]$ et $[vitesse\ min, vitesse\ max]$ respectivement, Tel que chaque mouvement se produit dans une période

de temps constante égale à t , à la fin de cette période le nœud choisit nouvellement une direction et une vitesse de la même manière et il recommence le processus.

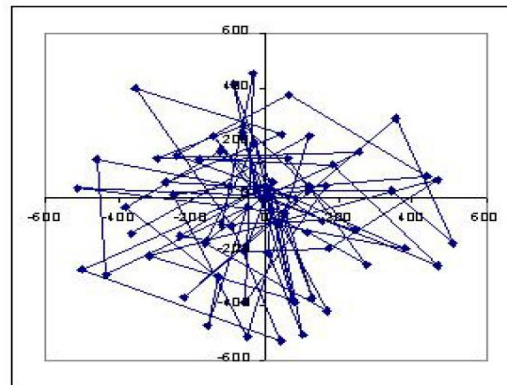


Figure 32: La trace de déplacement d'un nœud utilisant le modèle mobilité à marche aléatoire [26]

IV.3.3- Le modèle de mobilité avec direction aléatoire RDM

Dans ce modèle le nœud choisit une direction aléatoire (et non un point aléatoire), puis il commence le déplacement dans cette direction avec une vitesse aléatoire. Dès qu'il atteint une frontière de la zone de simulation, il fait une pause, puis il recommence le processus en choisissant une nouvelle direction. La figure 33 montre un exemple de trace d'un nœud qui commence le déplacement à partir du centre (250,250) en utilisant le modèle de mobilité avec direction aléatoire.

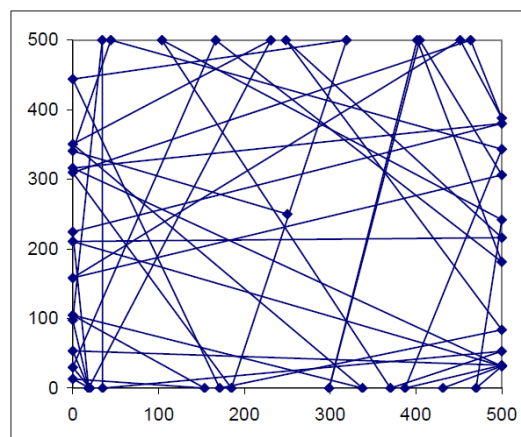


Figure 33: La trace de déplacement d'un nœud utilisant le modèle mobilité avec direction aléatoire [26]

L'étude de ces modèles de mobilité nous a permis de choisir le modèle de mobilité avec point de passage aléatoire pour simuler la mobilité des mesh clients, car il représente un mouvement des nœuds aléatoire, simple et non conditionné par des contraintes (frontières), ce qui est adapté avec la mobilité des mesh clients. Les mesh routeurs sont considérés comme des nœuds fixes sans aucune mobilité. La création d'un modèle de mobilité de type WPM dans NS2 est faite comme suit :

☞ Ouvrir la fenêtre 'Terminal'

☞ Accéder au dossier ns-allinone-2.34/ns-2.34/indep-utils/cmu-scen-gen/setdest/

```
mahseur@mahseur-HP-Compaq-6830s:~/ns-allinone-2.34/ns-2.34/indep-utils/cmu-scen-gen/setdest$
```

☞ Ecrire la ligne de commande suivante : `./setdest -v <version n°2> -n <nombre de nœuds> -s <type de vitesse> -m <vitesse min> -M <vitesse max> -t <temps de simulation> -P <type de pause> -p <temps de pause> -x <max X> -y <max Y> > <nom du fichier>`

Exemple :

```
./setdest -v 2 -n 30 -s 1 -m 1 -M 20 -t 100 -P 1 -p 5 -x 1000 -y 1000 > rwm1000x1000x30
```

Un fichier de modèle de mobilité sera créé dans le dossier en cours.

☞ Copier ce fichier dans le dossier ns-allinone-2.34/ns-2.34/tcl/mobility/scene qui contient généralement les fichiers de modèles de mobilité.

Ce fichier sera utilisé dans le paragraphe principal de simulation comme suit :

☞ Dans la partie définition des options, donner le chemin d'accès pour ce fichier.

```
set val(sc)                "../ns-allinone-2.34/ns-2.34/tcl/mobility/scene/rwm1000x1000x30"
```

☞ Puis lancer ce modèle dans le corps du programme

```
source $val(sc)
for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    $node_($i) start
}
```

IV.4- Modèles de trafic

NS2 permet de générer trois modèles de trafic [24],[25]

CBR (Constant Bit Rate) : envoie des paquets de taille fixe à un débit donné.

Exponential : envoie des paquets de taille fixe par rafale à un débit moyen.

FTP (File Transfer Protocol) : simule l'envoi de données en continu et en grande quantité.

Dans nos simulations on a utilisé Le générateur de trafic CBR, le fichier cbrgen.tcl qui se trouve sous ~ ns / indep-utils / CMU-scen-gen / peut générer des connexions TCP et CBR respectivement. En suivant les étapes suivantes :

☞ Ouvrir la fenêtre 'Terminal'

☞ Accéder au dossier ns-allinone-2.34/ns-2.34/indep-utils/cmu-scen-gen/

```
mahseur@mahseur-HP-Compaq-6830A:~/ns-allinone-2.34/ns-2.34/indep-utils/cmu-scen-gen$
```

☞ Ecrire la ligne de commande suivante : ns cbrgen.tcl [-type cbr ou tcp] [-nn nombre de nœuds] [-seed graine pour le générateur][-mc nombre maximum de connections][-rate vitesse]> nom du fichier modèle.

Exemple :

```
ns cbrgen.tcl -type cbr -nn 30 -seed 1.0 -mc 50 -rate 4.0 > cbr1000x1000x30
```

Ce fichier sera utilisé dans le paragraphe principal de simulation comme suit :

☞ Dans la partie définition des options, donner le chemin d'accès pour ce fichier

```
set val(cp)                "../ns-allinone-2.34/ns-2.34/tcl/mobility/scenecbr1000x1000x30"
```

☞ Puis lancer ce modèle dans le corps du programme

```
source $val(cp)
for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    $node_($i) start
}
```

Remarque : la boucle "for" est utilisée une seule fois pour lancer les deux modèles (mobilité et trafic).

IV.5- Modèles d'énergie

NS2 permet de représenter un modèle d'énergie pour les nœuds (mobiles), ce modèle initialise une valeur énergétique en "Joules" pour chaque nœud, cette valeur est diminuée avec chaque émission ou réception d'un paquet par une mesure bien déterminée [24],[25]. Ce modèle est écrit dans la partie configuration des nœuds dans le programme de simulation comme suit :

```
-energyModel <EnergyModel type>
-initialEnergy <specified in Joules> ; # énergie initiale
-rxPower <specified in W> ; # coût de réception d'un paquet
-txPower <specified in W> ; # coût de transmission d'un paquet
```

Exemple :

```
-energyModel EnergyModel \
-initialEnergy 100.0 \
-txPower 0.6 \
-rxPower 0.2 \
```

Remarque : dans nos simulations que les mesh clients qui sont liés à ce modèle, contrairement aux mesh routeurs qui n'ont pas le problème d'énergie.

IV.6- Analyse des résultats dans NS2

Lors de l'exécution du programme de simulation, NS2 génère des fichiers particuliers dits fichiers de trace, contenant un ensemble d'informations sur le déroulement de la simulation. Ces fichiers permettent d'évaluer les performances du réseau étudié selon des critères précis.

IV.6.1- Les fichiers de trace

On distingue deux types de fichiers de trace [24],[25] :

IV.6.1.1- Les fichiers trace ".NAM"

Ces fichiers contiennent des informations utiles pour la visualisation des nœuds et leurs déplacements ainsi que le parcours des paquets entre les nœuds.

Un logiciel appelé NAM est nécessaire pour exploiter ce type de fichiers.

IV.6.1.2- Les fichiers trace “.tr”

Ces fichiers contiennent un ensemble de lignes tel que chaque ligne correspond a un événement daté concernant soit un nœud ou un paquet, ils servent a calculer les différents critères et taux utiles pour évaluer les performances du réseau étudié.

IV.6.2- Les critères d'évaluation

On va utiliser quatre critères afin d'évaluer les performances de fonctionnement des différents scenarios étudiés [19]:

IV.6.2.1- Le taux de paquets délivrés

C'est le rapport entre le nombre des paquets effectivement reçus et le nombre de ceux qui ont été émis.

Taux de paquets délivrés= (nbre de paquets reçus avec succès)/ (nbre de paquets émis).

Formule 1: Taux de paquets delivrés [19]

IV.6.2.2- Le taux de perte

C'est le rapport entre le nombre de paquets perdus et le nombre global de paquets émis.

Taux de perte= (nbre de paquets perdus/nbre global de paquets émis).

Formule 2: Taux de perte [19]

IV.6.2.3- Le coût de routage

Il représente la quantité moyenne d'information de routage nécessaire pour assurer le routage d'un paquet, il est obtenu par le rapport entre le nombre de paquets de routage reçus et le nombre de paquets reçus.

Coût de routage= (nbre de paquets de routage reçus)/ (nbre de paquets reçus).

Formule 3: Coût de routage [19]

IV.6.2.4- Le délai de transmission moyen

Il correspond au temps moyen mis par les paquets reçus pour passer des couches applicatives de la source à celle de la destination.

Délai de transmission moyen= ($\sum$ temps passage des paquets)/ (nbre de paquets reçus avec succès).

Formule 4: Délai de transmission moyen [19]

IV.7- Les scenarios de simulation

Dans notre étude on va traiter cinq scenarios : l'impact de la mobilité, le niveau d'énergie, la charge du réseau, la densité, la distance.

IV.7.1- Paramètres généraux

Paramètres	Valeur
Type de réseau	WMN, MANET
Simulateur	NS-2.34
X*Y*Z	1000m*1000m*0m
Modèle de propagation	TwoRayGround
Type MAC	802_11
Protocole de routage	AODV, OLSR
Type de trafic	CBR
Type interface queue	Droptail
Modèle de mobilité	RWP
Durée de simulation	300 s
Modèle d'antenne	OmniAntenna
Nombre maximum de paquets dans la queue	50
Protocole de transport	UDP
Taille des paquets	512 octets

Tableau 12: Paramètres généraux pour la simulation

IV.7.2- Présentation des différents scenarios de simulation

IV.7.2.1- Scenario 1 : impact de la vitesse de mobilité

Paramètres	valeur
Vitesse de mobilité	0 .. 20m/s
Nombre de nœuds	46
Nombre de mesh clients	30
Nombre de mesh routeurs	16
Niveau d'énergie initial des nœuds mobiles	100 Joules
Nombre de connexions	30

Tableau 13: Paramètres de simulation pour le scenario1: impact de la vitesse de mobilité

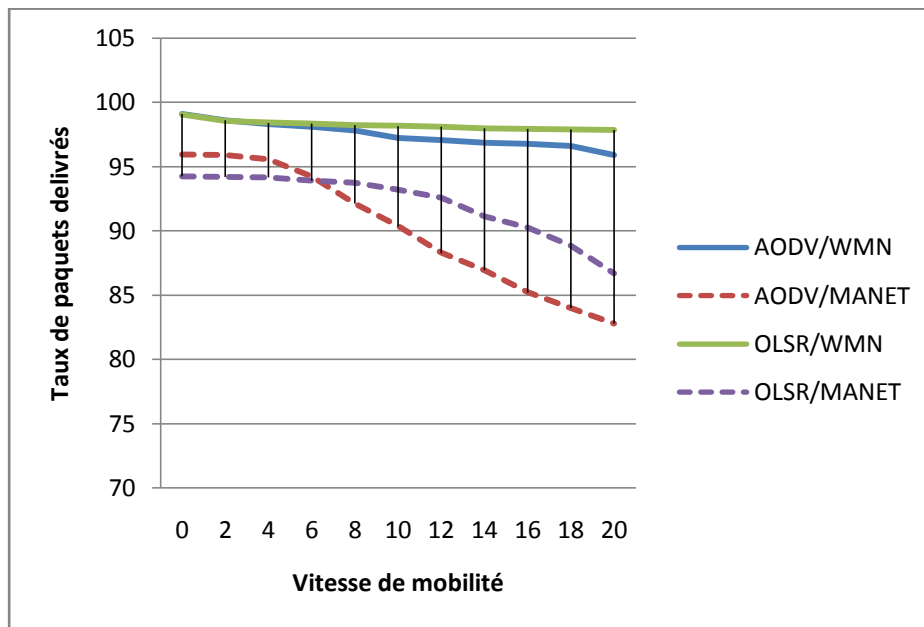


Figure 34: Impact de la vitesse de mobilité sur le taux de paquets délivrés

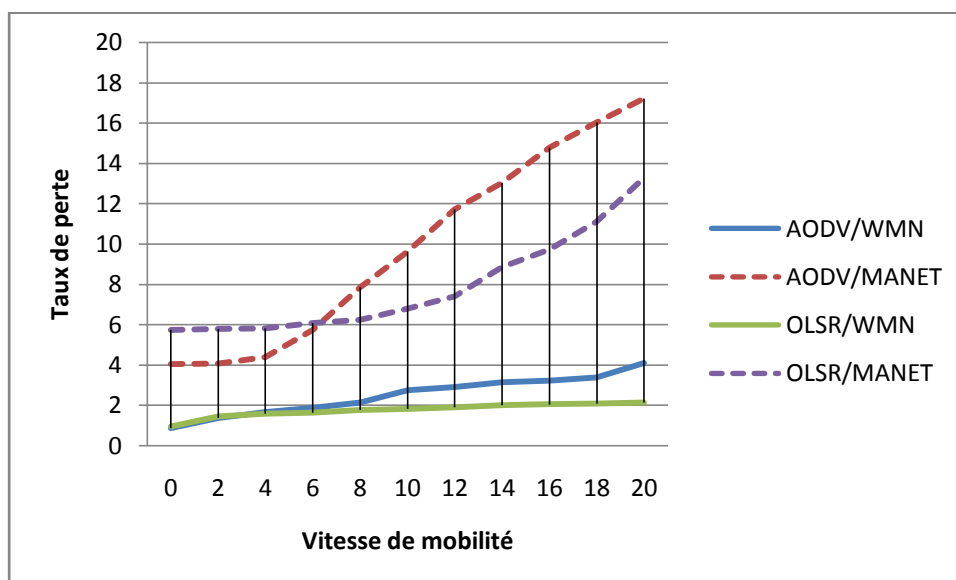


Figure 35: Impact de la vitesse de mobilité sur le taux de perte

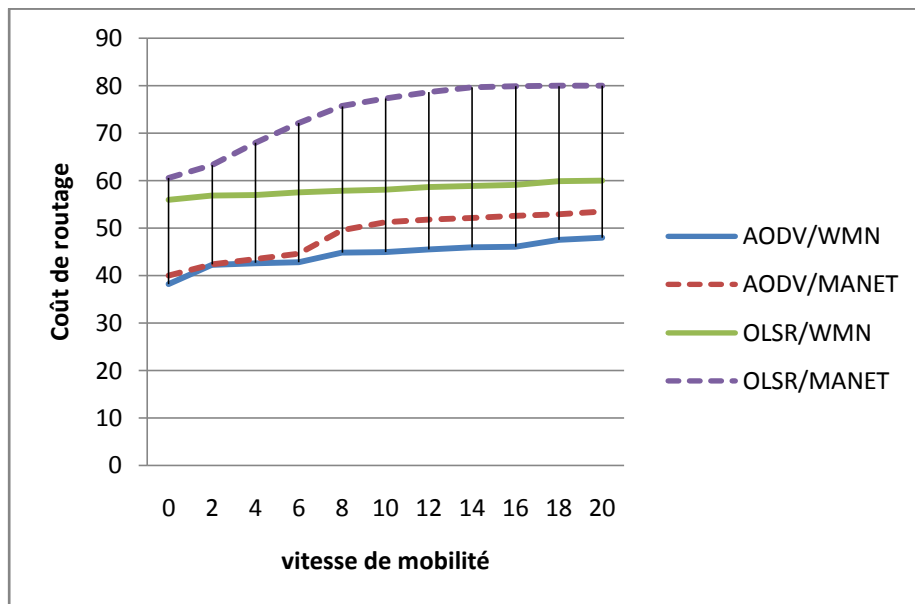


Figure 36: Impact de la vitesse de mobilité sur le coût de routage

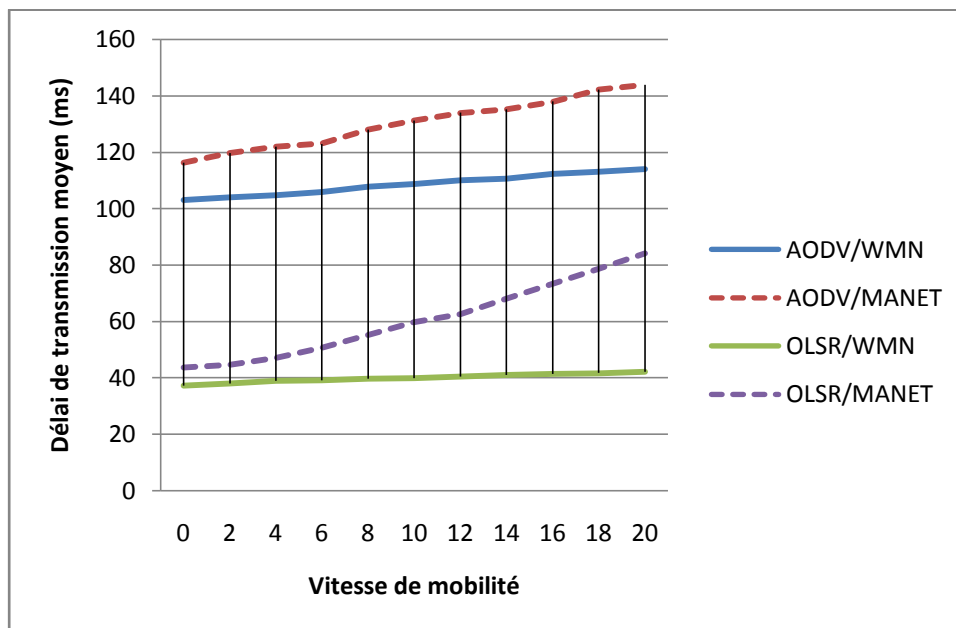


Figure 37: Impact de la vitesse de mobilité sur le de délai de transmission moyen

IV.7.2.2- Scenario 2 : impact du niveau d'énergie des nœuds mobiles

Paramètres	Valeur
Niveau d'énergie initial des nœuds mobiles	100..10 joules
Nombre de nœuds	46
Nombre de mesh clients	30
Nombre de mesh routeurs	16
Vitesse de mobilité	4m/s
Nombre de connexions	30

Tableau 14: Paramètres de simulation pour le scenario2: impact du niveau d'énergie des noeuds mobiles

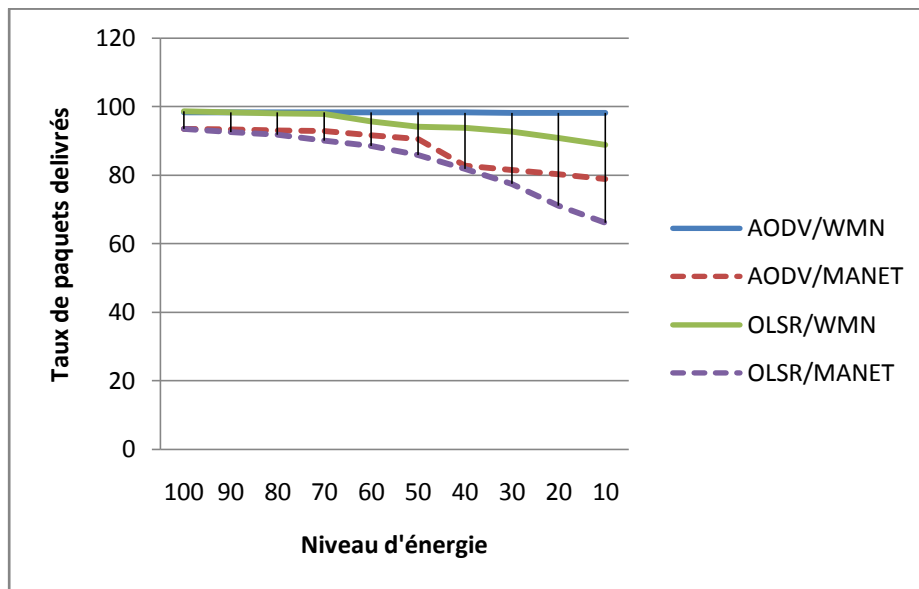


Figure 38: Impact du niveau d'énergie sur le taux de paquets délivrés

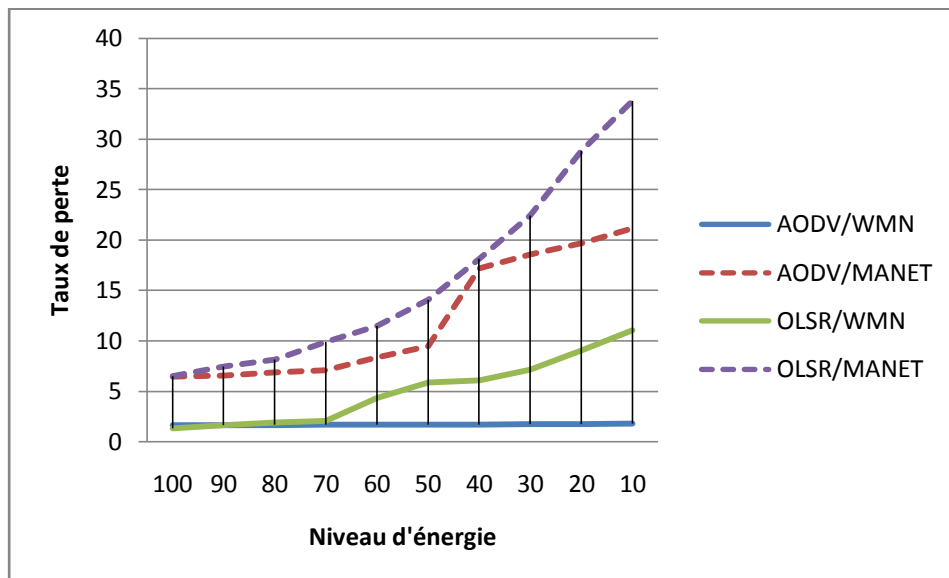


Figure 39: Impact du niveau d'énergie sur le taux de perte

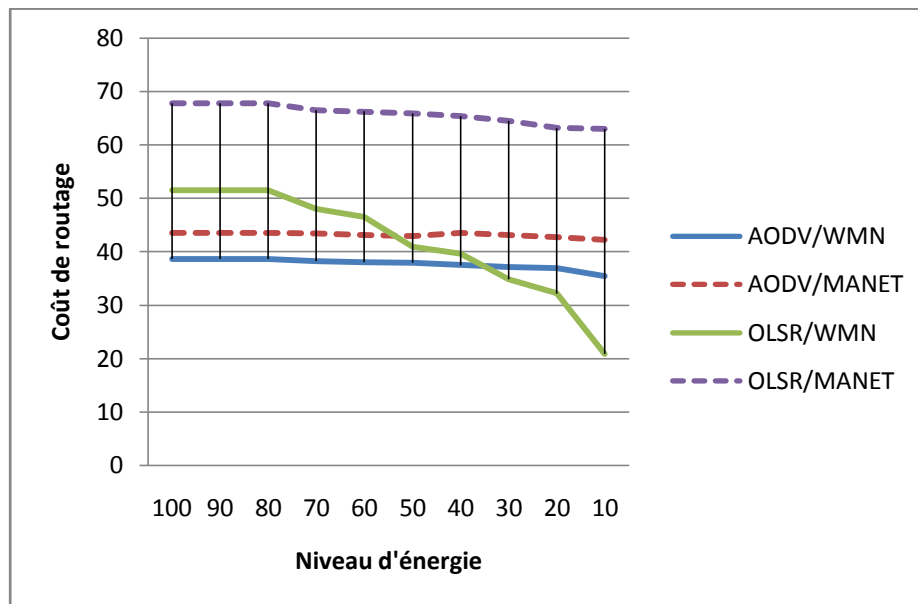


Figure 40: Impact du niveau d'énergie sur le coût de routage

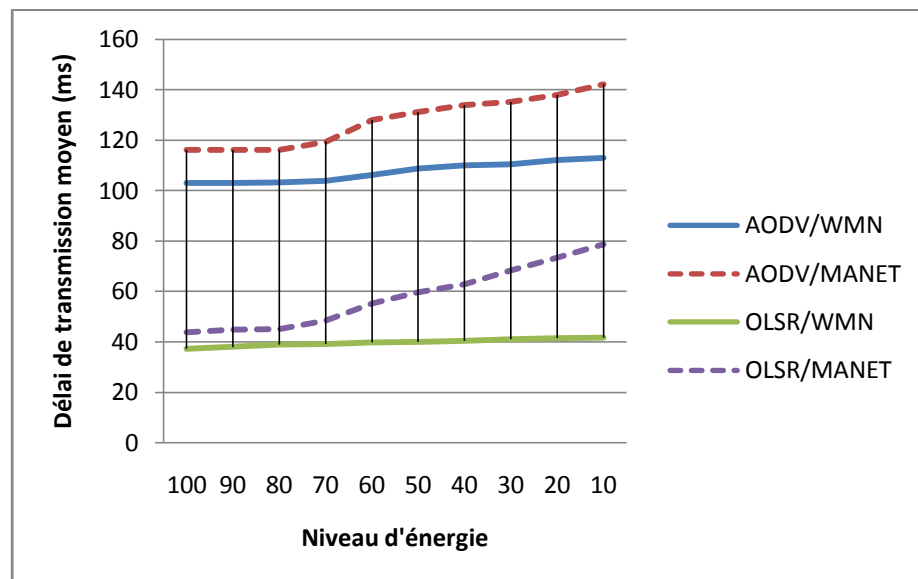


Figure 41: Impact du niveau d'énergie sur le délai de transmission moyen

IV.7.2.3- Scenario 3 : impact de la charge du le réseau

Paramètres	Valeur
Nombre de connexions	5..50
Nombre de nœuds	46
Nombre de mesh clients	30
Nombre de mesh routeurs	16
Niveau d'énergie initial des nœuds mobiles	100 Joules
Vitesse de mobilité	4m/s

Tableau 15: Paramètres de simulation pour le scenario3 : impact de la charge du réseau

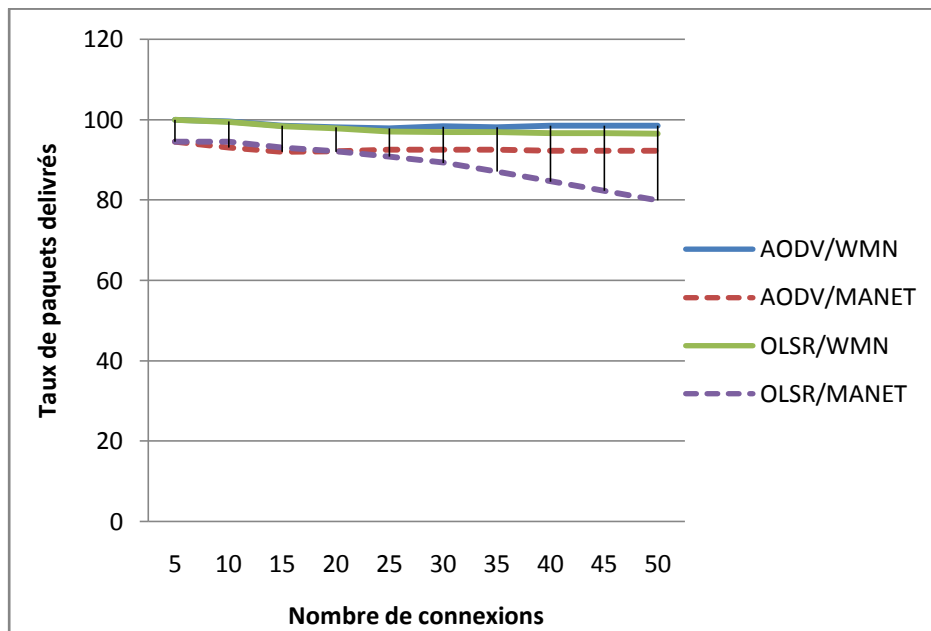


Figure 42 : Impact de la charge du réseau sur le taux de paquets délivrés

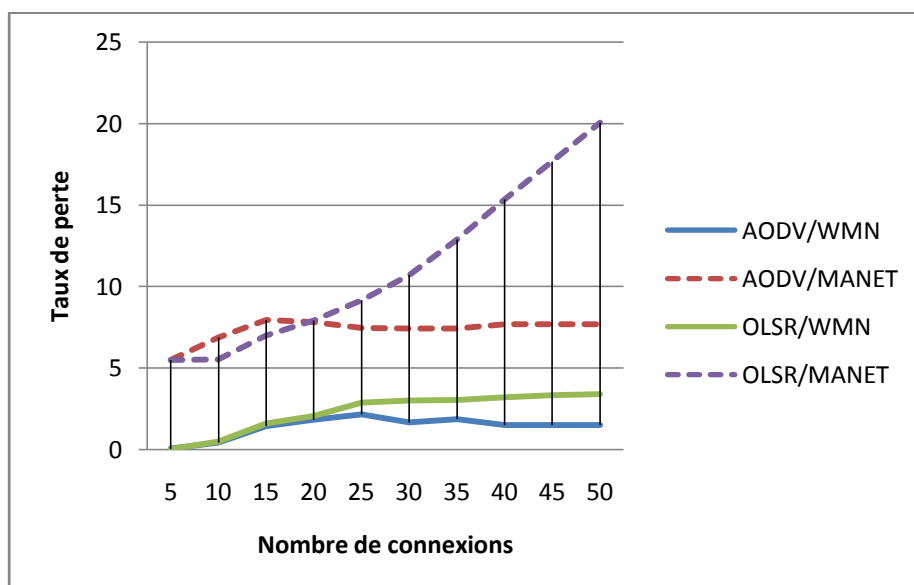


Figure 43: Impact de la charge du réseau sur le taux de perte

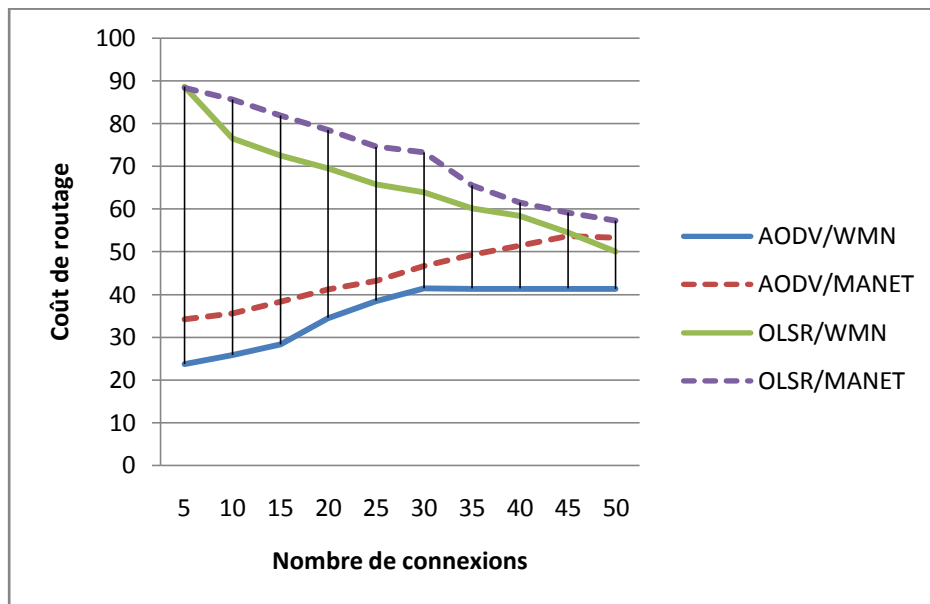


Figure 44: Impact de la charge du réseau sur le coût de routage

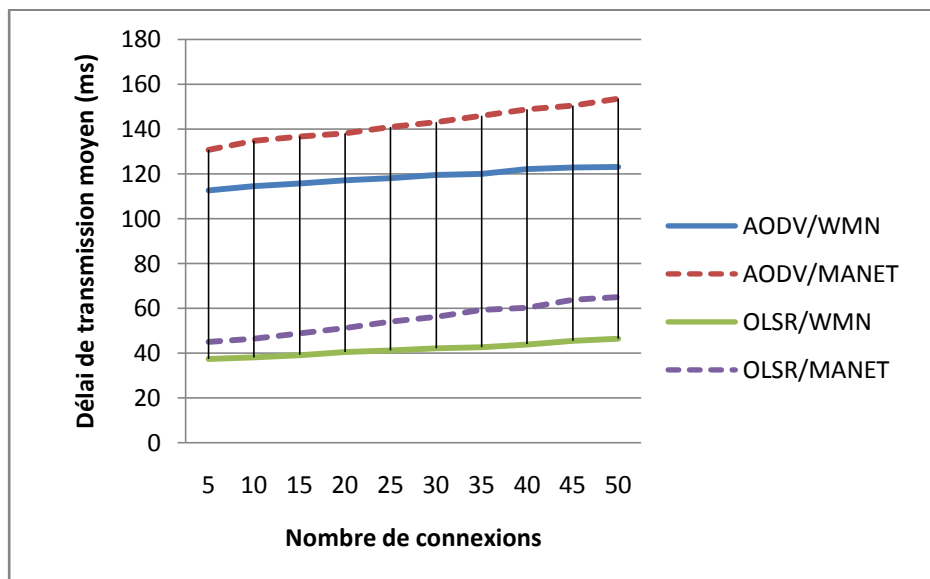


Figure 45: Impact de la charge du réseau sur le délai de transmission moyen

IV.7.2.4- Scenario 4 : impact de la densité du réseau

Paramètres	Valeur
Nombre de nœuds	20..65
Nombre de mesh clients	4..49
Nombre de mesh routeurs	16
Vitesse de mobilité	4m/s
Niveau d'énergie initial des nœuds mobiles	100 Joules
Nombre de connexions	30

Tableau 16: Paramètres de simulation pour le scenario4: impact de la densité du réseau

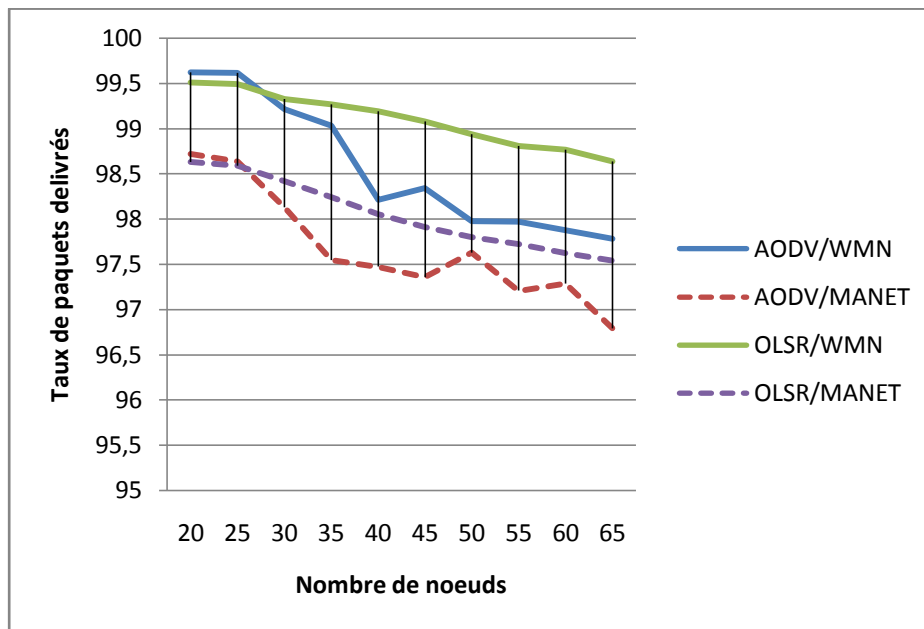


Figure 46: Impact de la densité du réseau sur le taux de paquets délivrés

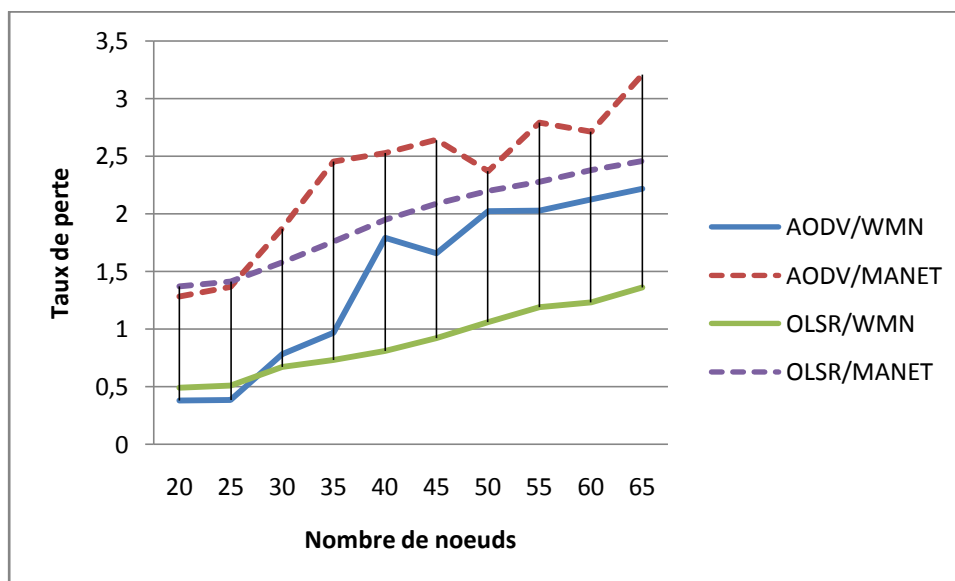


Figure 47: Impact de la densité du réseau sur le taux de perte

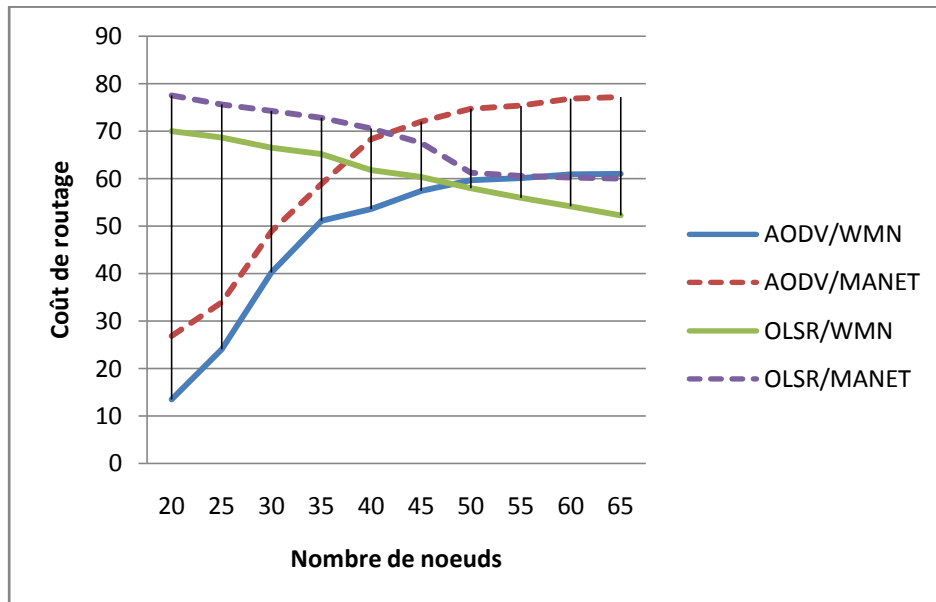


Figure 48: Impact de la densité du réseau sur le coût de routage

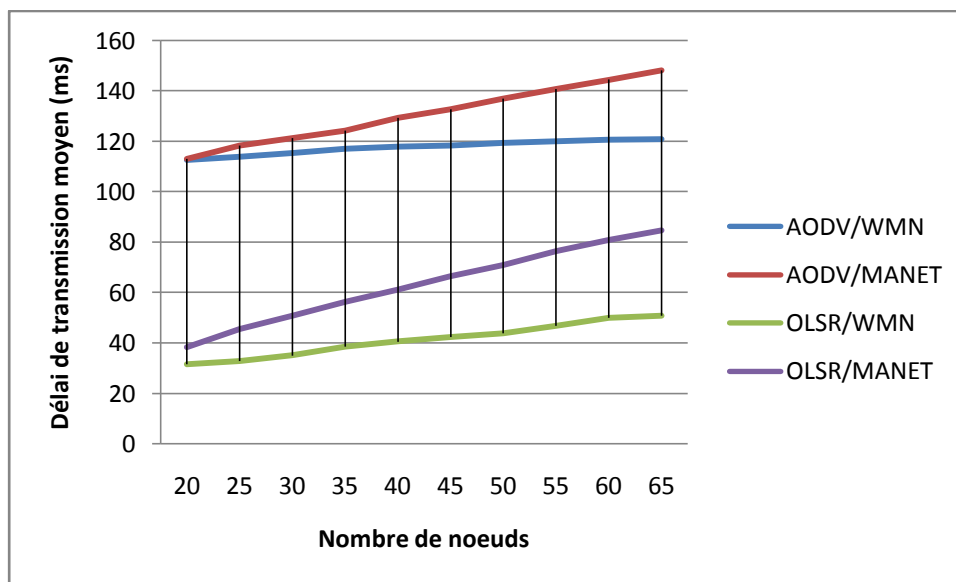


Figure 49: Impact de la densité du réseau sur le délai de transmission moyen

IV.7.2.5- Scenario 5 : impact de la distance entre émetteur récepteur

Paramètres	valeur
Distance entre émetteur récepteur	<300m ; >700m
Vitesse de mobilité	2m/s
Nombre de nœuds	46
Nombre de mesh clients	30
Nombre de mesh routeurs	16
Niveau d'énergie initial des nœuds mobiles	100 Joules
Nombre de connexions	30

Tableau 17: Paramètres de simulation pour le scenario5: impact de la distance entre émetteur récepteur

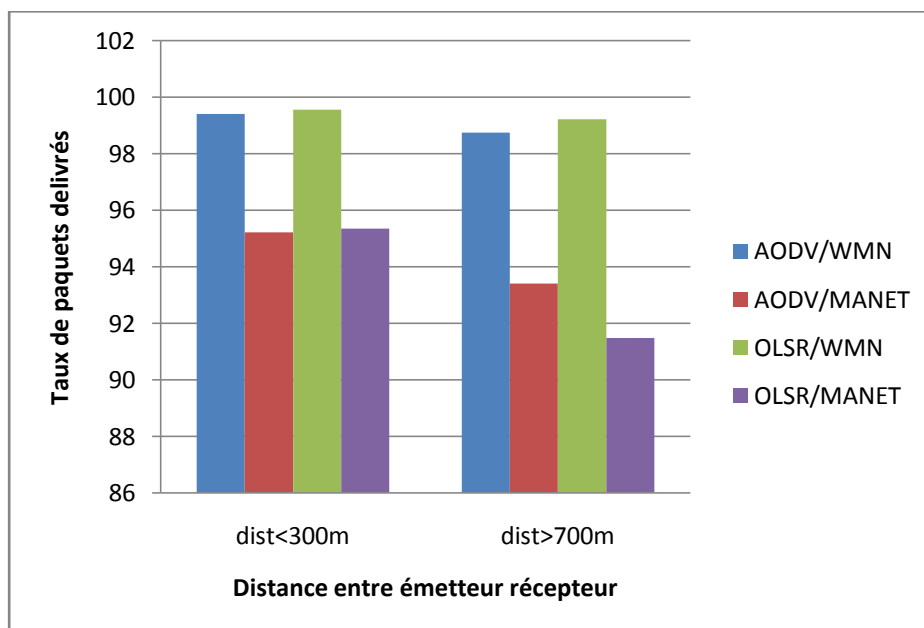


Figure 50: Impact de la distance entre émetteur récepteur sur le taux de paquets délivrés

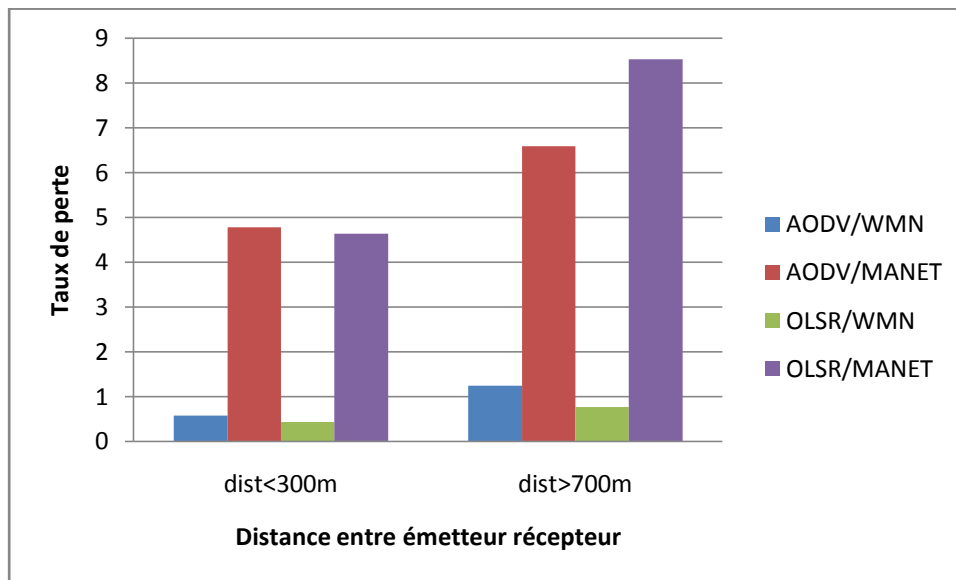


Figure 51: Impact de la distance entre émetteur récepteur sur le taux de perte

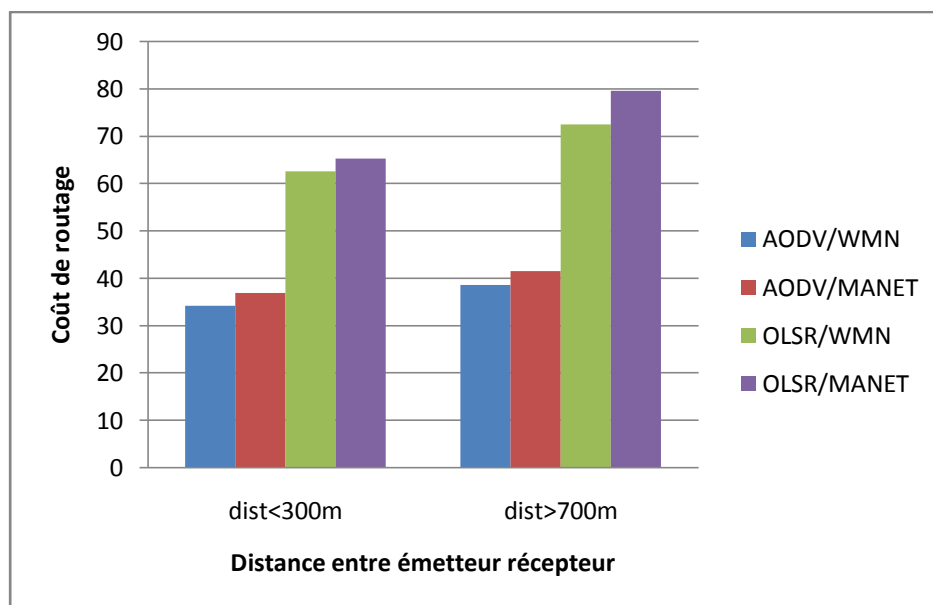


Figure 52: Impact de la distance entre émetteur récepteur sur le coût de routage

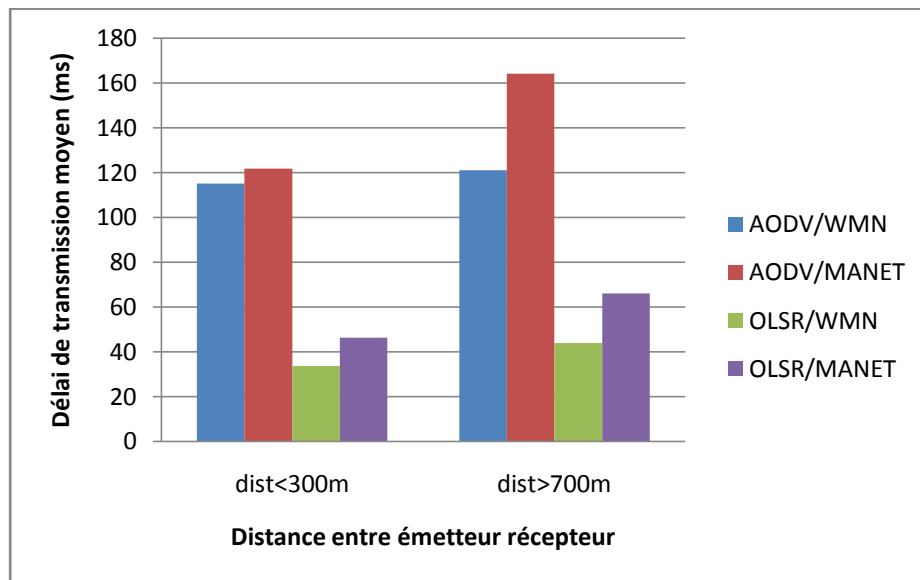


Figure 53: Impact de la distance entre émetteur récepteur sur le délai de transmission moyen

IV.7.3- Observations

Dans tous les scénarios :

- ☞ Le réseau maillé sans fil montre une robustesse et une efficacité plus forte que le réseau ad hoc, en point de vu taux de paquets délivrés, taux de perte, coût de routage et délai de transmission moyen.
- ☞ AODV est plus performant en point de vu coût de routage
- ☞ OLSR est plus performant en point de vu délai de transmission

Dans le WMN :

- ☞ Le protocole OLSR montre une efficacité lorsque la vitesse de mobilité des nœuds augmente par rapport au protocole AODV.
- ☞ L'influence de la dégradation du niveau d'énergie des nœuds mobiles est plus grave sur OLSR qu'AODV.
- ☞ Dans un WMN avec un nombre de connexions élevé AODV montre une petite supériorité qu'OLSR.
- ☞ Dans un WMN dense OLSR est plus efficace qu'AODV.

- ☞ Dans les distances courtes entre émetteur récepteur OLSR est efficace qu'AODV, par contre, lorsque la distance est plus importante AODV devient le plus intéressant.

IV.7.4- Analyse des résultats

- ☞ La robustesse et l'efficacité du WMN est justifiée par son épine dorsale qui est composée des mesh routeurs fixes, dotés des canaux multiples alimentés directement par les prises d'énergie électriques. Contrairement au MANET qui est soumis à la contrainte d'énergie et la mobilité de tous ses nœuds et qui utilisent généralement un seul canal de transmission.
- ☞ L'augmentation de la vitesse de mobilité influe négativement sur le routage en général, mai OLSR réagit d'une manière plus rapide qu'AODV en point de vu calcul des routes avec un coût de routage supérieur.
- ☞ Le protocole OLSR consomme plus d'énergie qu'AODV car il diffuse périodiquement des messages de contrôle pour mettre à jour les tables de routage, cela ne pose pas un grand problème dans un WMN car les mesh routeurs sont alimentés directement en énergie électrique.
- ☞ L'augmentation du nombre de connexions dans le réseau surcharge la file d'attente des nœuds surtout dans le protocole OLSR (en ajoutant les paquets de contrôle). Ce qui diminue le taux de paquets délivrés et augmente par conséquence le taux de perte. L'utilisation des canaux multiples par les mesh routeurs diminue l'impact de ce phénomène. Par contre le coût de routage diminue par ce que la quantité diffusée des paquets de contrôle et la même.
- ☞ Dans les réseaux denses le protocole OLSR est plus efficace car l'utilisation des MPRs minimise considérablement les traitements et la diffusions des paquets de contrôle. La sélection des mesh routeurs comme MPR donne une stabilité et une robustesse pour le WMN.
- ☞ Dans les communications à courte distance OLSR est plus performant en point de vu délai de transmission et coût de routage, dans le cas contraire (communication à longue distance) AODV est privilégié.

IV.8- Conclusion

L'expérimentation montre la grande supériorité des WMNs par rapport aux MANETs, cela confirme les avantages cités dans le deuxième chapitre.

La comparaison entre OLSR et AODV dans un réseau sans fils maillé montre que OLSR est plus rapide en terme de temps de réponse avec un coût de routage considérable, dans un réseau dense avec diamètre réduit ces deux facteurs sont optimisés.

D'autre part AODV donne de bonnes résultats en terme de coût de routage avec un temps de réponse perçu, ces facteurs sont optimisés dans un réseau dispersé avec un diamètre étendu. Donc la sélection du meilleur protocole adéquat pour cette famille des réseaux est un problème délicat, car chaque protocole possède des avantages et des inconvénients dans des scenarios bien précis.

V- SOLUTIONS ET PERSPECTIVES

V.1- Introduction

Notre étude sur le plan théorique et le plan pratique, montre que le protocole de routage idéale pour les réseaux maillés sans fil doit tenir compte ses caractéristiques et ses contraintes, ainsi qu'il faut fixer à l'avance les objectifs et le domaine d'application désirés.

La solution peut être portée sur plusieurs axes : la métrique de routage utilisée, l'approche de calcul des routes, l'algorithme de routage et la structure des tables de routage.

V.2- Domaine d'application

Dans la section II.7 on a illustré des différents domaines d'applications pour les WMNs.

L'infrastructure de connexion internet paraît le domaine le plus important et le plus prioritaire surtout dans des milieux ruraux étendus, des zones urbaines non couverts par l'internet.

Notre pays connaît un retard perçu par rapport à nos voisins dans le service internet en matière de couverture et débit et le nombre d'internautes, pour cela notre choix est porté pour un WMN conçu comme infrastructure internet.

V.3- Objectifs de la solution

Après détermination du domaine d'application il est maintenant clair que l'objectif principal de notre solution est un protocole de routage qui assure le meilleur débit avec un temps de réponse le plus réduit.

Cet objectif ne peut être atteint par les points suivants :

- ✓ Réduire les interférences.
- ✓ Prendre en compte la charge des nœuds en générale et les passerelles en particulier.
- ✓ Encourager les mesh routeurs de diversifier l'utilisation des canaux de transmission.

V.4- Approche de routage

L'approche de routage signifie le moment d'établissement des routes, on a cité dans le troisième chapitre trois approches de routage :

- L'approche réactive : préparation des routes à la demande
- L'approche proactive : préparation des routes à l'avance
- L'approche hybride : utilisation des deux approches.

Notre proposition est basée sur l'approche hybride, elle consiste à utiliser l'approche proactive localement sur une zone estimée à un nombre de sauts qui permet d'atteindre au moins une passerelle. Ainsi qu'une approche réactive en dehors de cette zone locale.

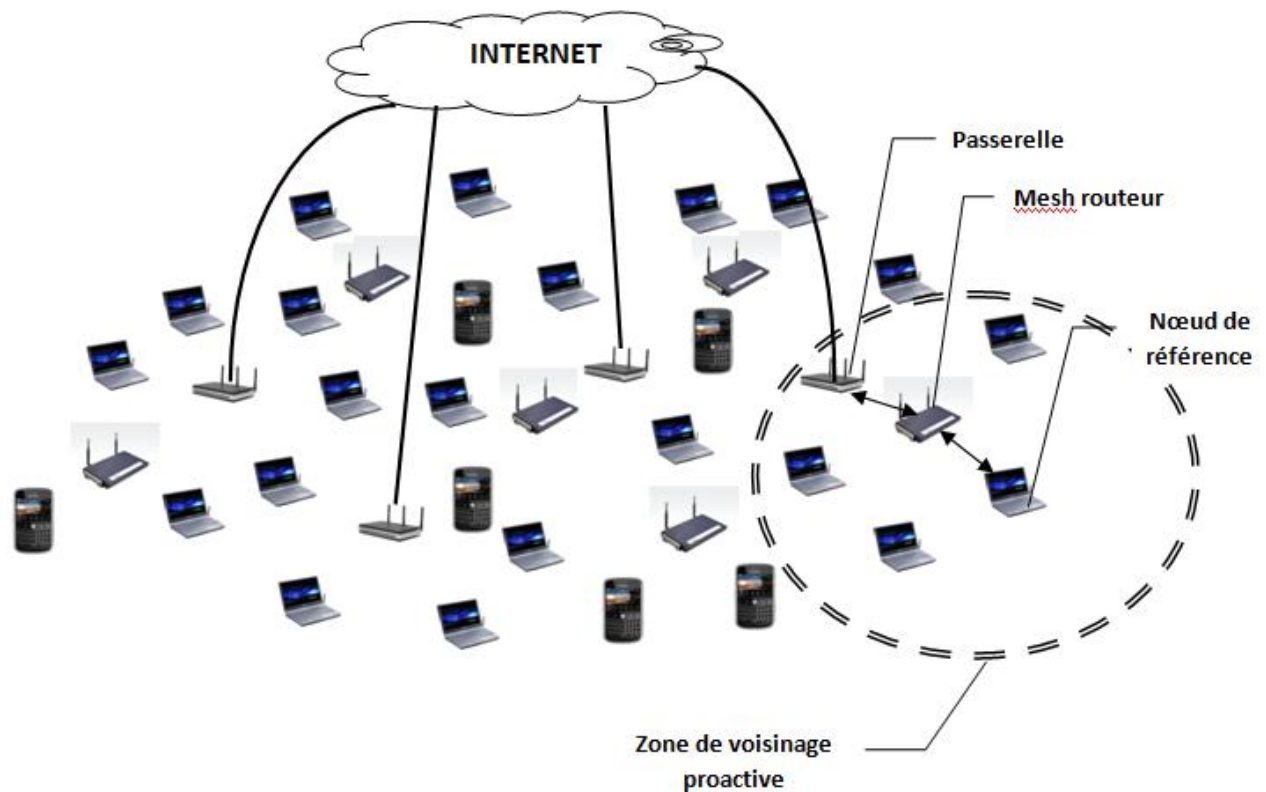


Figure 54: Approche de routage hybride

L'approche proactive dans la zone de voisinage pour un nœud offre un accès rapide au réseau INTERNET car la route qui mène vers la passerelle la plus proche est préétablie à l'avance.

Le fait de limiter la zone proactive à un périmètre incluant qu'une passerelle au minimum permet de minimiser le nombre de paquets de contrôle provenant du reste du réseau, ce qui minimise par conséquent le coût de routage et augmente le débit.

V.5- Méthode de routage

Notre protocole de routage utilise l'algorithme de routage état des liens celle qui est utilisée par OLSR, dans la zone de voisinage. Ainsi que la méthode de vecteur de distance celle qui est utilisée par AODV, en dehors de la zone de voisinage. La diffusion des messages de contrôle est limitée pour chaque nœud à sa zone de voisinage, par conséquent les bases d'informations stockées dans les nœuds sont locales.

Si un nœud **A** désire envoyer un message à un nœud **B** il exécute l'algorithme suivant :

Le nœud **A** vérifie dans sa table de routage

Si la destination **B** est contenue dans sa table alors la route est prête

Sinon (la destination est située en dehors de la zone de voisinage proactive de **A**), alors

L'émetteur **A** lance une requête de découverte de route 'RREQ' selon AODV.

Lorsqu'un nœud intermédiaire reçoit une 'RREQ' il réagit de la même manière que l'émetteur :

- Il vérifie dans sa table de routage, si la destination est déterminée alors il envoie une réponse de route 'RREP'.
- Sinon il rediffuse 'RREQ'.

Remarque : le périmètre de la zone de voisinage est mesuré par le nombre de sauts. Il peut être fixé à l'avance à une valeur moyenne, comme il peut être dynamique, c'est-à-dire chaque nœud calcule et actualise son périmètre propre de sa zone de voisinage, selon sa position dans le réseau.

V.6- Métrique de routage

Nous allons commencer par un état de l'art sur les métriques de routage conçues pour les WMNs [14].

V.6.1-Les exigences d'une métrique de routage

V.6.1.a- Réduire l'interférence intra-flux

L'interférence intra-flux se produit lorsque plusieurs nœuds situés dans une zone d'interférence au sein d'un flux sont en concurrence pour envoyer leurs paquets.

L'interférence intra-flux peut être réduite par l'introduction de la diversité des canaux dans un flux.

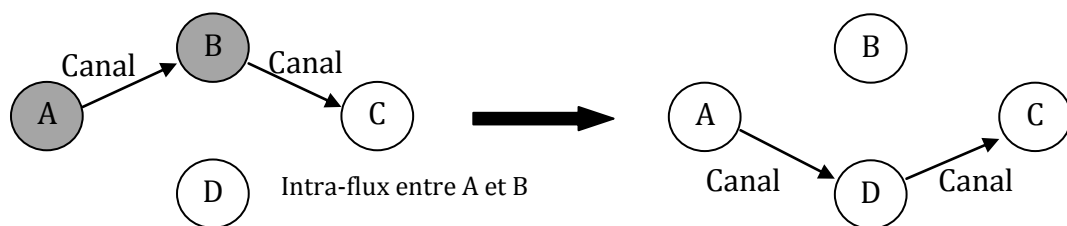


Figure 55: Exemple de diversité des canaux pour éviter l'interférence intra-flux

V.6.1.b- Réduire l'interférence inter-flux

L'interférence inter-flux se produit lorsque les nœuds appartenant à un flux sont gênés par des nœuds d'un autre flux situés dans la même zone d'interférence.

Ce problème est plus difficile, une métrique doit aider les protocoles de routage à choisir des chemins qui peuvent réduire l'inférence inter-flux.

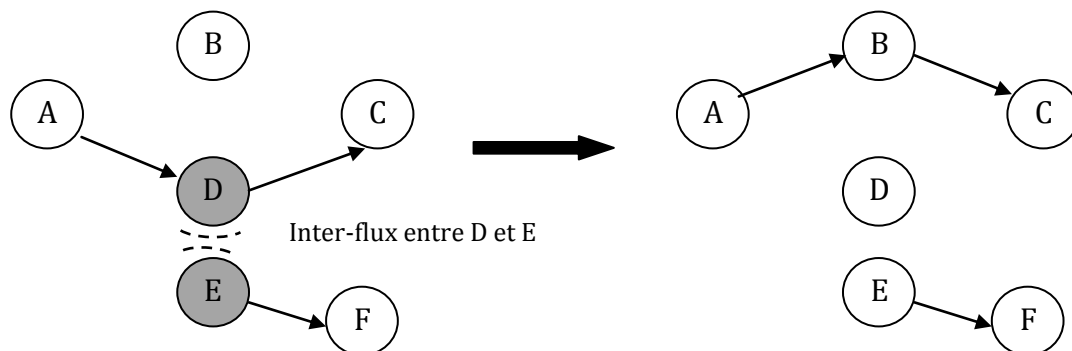


Figure 56: Exemple d'élimination d'un problème d'interférence inter-flux

V.6.1.c- Réduire l'interférence extérieure

C'est un problème d'interférence avec des flux transmis par des nœuds appartenant aux autres réseaux, on distingue deux types d'interférence extérieure :

V.6.1.c.1-Interférence contrôlée

Se produit lorsque les nœuds du réseau externe utilisent la même technologie de transmission que le réseau étudié.

V.6.1.c.2-Interférence non contrôlée

Se produit lorsque les nœuds du réseau externe utilisent des radios émises dans la même gamme de fréquence, mais ne partagent pas le même protocole MAC.

V.6.1.d- Equilibrage de charge

Un nœud qui a une grande capacité de transfert peut être sollicité de participer dans le routage des paquets par plusieurs nœuds. Cela peut surcharger ce nœud par rapport aux autres, ce qui diminue ses performances, et peut donner des résultats inverses dans le routage. Une métrique doit tenir en compte la capacité des nœuds sans négliger leurs charges.

V.6.1.e- Agilité

L'agilité d'une métrique se traduit par la capacité de s'adapter aux changements topologiques du réseau et sa charge. Si le taux de changement dépasse le taux de réaction de la métrique, alors elle ne peut pas avoir une image fidele sur le réseau, donc elle ne peut pas proposer une bonne décision.

V.6.1.f- Iso tonicité

La propriété d'iso tonicité d'une métrique de routage implique que l'ordre des poids de deux itinéraires est conservé s'ils sont annexés ou procédés par un chemin tiers commun, plus précisément :

Supposons une métrique de routage notée $W(.)$,

Le poids d'un itinéraire a est noté par $W(a)$,

La concaténation de deux itinéraires a et c est notée $a \oplus c$, son poids est noté $W(a \oplus c)$.

Une métrique de routage est isotonique si :

$W(a) \leq W(b)$ implique à la fois : $W(a \oplus c) \leq W(b \oplus c)$ et $W(c' \oplus a) \leq W(c' \oplus b)$, pour tout itinéraire a, b, c, c' .

Formule 5: Isotonicité [28]

L'isotonicité est une condition nécessaire et suffisante pour assurer l'efficacité de l'algorithme de routage utilisé (chemins optimaux sans boucle).

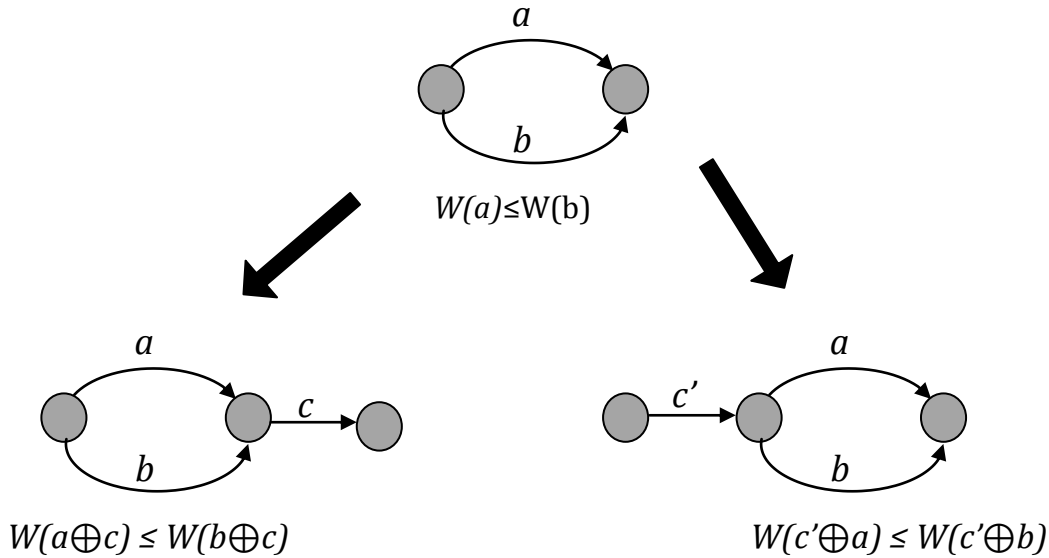


Figure 57: Exemple d'isotonicité

V.6.1.g- Stabilité

Une métrique ne doit pas trop varier au fil du temps, car les changements brusques de la métrique peuvent provoquer des mises à jour et des calculs énormes pour le routage.

V.6.1.h- Débit

Une métrique doit sélectionner des itinéraires avec des débits les plus élevés, ceci est très important et apporte plusieurs avantages, car un débit élevé d'un itinéraire occupe moins de temps dans l'utilisation de la bande passante, et moins de temps dans la diffusion des radios dans l'air, ce qui augmente la capacité du réseau (en terme bande passante), et qui minimise l'interférence, les délais de transmission et l'influence des changements topologiques du réseau [27], [28], [29].

V.6.2- Les composants d'une métrique de routage

On va définir dans cette section les éléments clés qui sont utilisés pour composer une métrique de routage dans les WMNs [28],[29].

V.6.2.a- Nombre de sauts

Le nombre de saut d'un itinéraire peut être considéré comme une métrique de routage en lui-même, il est utilisé dans plusieurs protocoles de routage dans les réseaux filaires et les réseaux sans fil tels que DSR, AODV, DSDV et GSR.

Dans les WMNs, le nombre de sauts comme métrique de routage comporte des limites et des insuffisances, par exemple un itinéraire composé des sauts avec capacité des liens importante et plus performant qu'un itinéraire plus court composé de liens de faible qualité, en plus la sélection intense des courts chemins peut charger des nœuds particuliers ce qui engendre une congestion dans certaines parties du réseau. Néanmoins, le nombre de sauts peut être considéré comme un composant dans une métrique plus complexe.

V.6.2.b- Capacité du lien

La capacité du lien peut être définie par la vitesse de transfert.

V.6.2.c- Qualité du lien

La qualité d'un lien peut être définie par une vitesse de transmission plus élevée avec un taux d'erreur inférieur. Elle peut être mesurée de plusieurs façons :

SNR : Signal to Noise Ratio et le taux de perte des paquets PLR

V.6.2.d- Diversité des canaux

Nous avons vu que l'utilisation d'un seul canal dans un chemin peut causer un problème d'interférence intra-flux et réduire le débit global.

Or l'utilisation de divers canaux dans le même chemin évite ce problème et augmente les performances du réseau, (solution possible que dans les réseaux multi radio) [27], [28], [29].

V.6.3- Présentation des métriques de routage pour les WMNs

V.6.3.a- Nombre de sauts

C'est la métrique la plus intuitive et la plus commune dans les réseaux filaires et sans fils, elle est isotonique et simple, elle ne prend pas en considération le taux de transmission, le taux de perte, les interférences, la présence de multiples canaux, la charge des nœuds, donc elle n'est pas une mesure de qualité pour les WMNs [28], [29], [30].

V.6.3.b- Nombre de transmissions attendues (ETX)

C'est l'une des premières métriques prévues pour les WMNs. L'ETX d'un lien est le nombre attendu de transmissions et retransmissions de données nécessaires pour réussir la livraison d'un paquet de données à travers ce lien. L'ETX est calculée en utilisant les probabilités suivantes :

d_f : la probabilité mesurée qu'un paquet de données arrive chez le destinataire.

d_r : la probabilité que le paquet 'Ack' est reçu avec succès. Ensuite, en supposant que les deux probabilités sont indépendantes, on peut dire que la probabilité qu'une transmission est bien reçue = $d_f \times d_r$.

L'inverse de cette valeur donne le nombre de transmissions attendues

$$ETX = \frac{1}{d_f \times d_r}$$

Formule 6: Nombre de transmissions attendues [28]

L'ETX d'un itinéraire est la somme des ETXs de chaque saut qui lui composent.

Donc le but de l'utilisation de cette métrique est de trouver un itinéraire avec la plus haute probabilité de livraison de paquets. L'avantage de cette mesure est la possibilité de choisir des itinéraires à haut débit, elle prend en considération l'asymétrie des qualités des liens.

En outre ETX ne prend pas en considération la charge des liens, et elle ne fait aucune différence entre les types de nœuds, ainsi qu'elle ne fait aucune tentative d'utilisation de la diversité des canaux dans le but de minimiser l'interférence intra-flux [28], [29], [30].

V.6.3.c- Le temps de transmissions prévu (ETT)

C'est la durée prévue pour la transmission d'un paquet de données, ETT est conçue pour améliorer les performances d'ETX, en tenant compte des différences dans les taux de transmission, l'ETT d'un seul lien est définie comme suit :

$$ETT = ETX \times \frac{S}{B}$$

Formule 7: Temps de transmissions prévu (ETT) [28]

S désigne la taille moyenne d'un paquet, et B le taux de transmission du lien.

L'ETT d'un chemin est obtenue par l'addition des ETT des liens qui lui composent.

ETT maintient les avantages d'ETX, avec augmentation de débit.

Cependant, ETT ne prend pas en compte également de l'interférence inter et intra-flux ainsi que la charge des nœuds [28], [29], [30].

V.6.3.d- ETT pondérée cumulative (WCETT)

La métrique WCETT est conçus pour améliorer l'ETT par l'introduction de la notion de la diversité des canaux, elle est définie pour un chemin P comme suit :

$$WCETT = (1 - \alpha) \times \sum_{i \in P} ETT_i + \alpha \max_{1 \leq j \leq K} X_j$$

Formule 8: ETT pondérée cumulative (WCETT) [28]

α est un paramètre ajustable compris entre 0 et 1 permettant de contrôler la préférence sur la longueur du trajet par rapport à la diversité du canal.

X_j est le nombre de fois que le canal j est utilisé le long du chemin P.

K est le nombre des canaux disponibles.

Le premier terme cumule les ETT élémentaires des liens, donc il favorise les plus courts chemins de haute qualité. Le deuxième terme compte le nombre maximal de fois que le même canal apparait le long du chemin, donc il favorise les chemins avec un niveau élevé de diversité des canaux ce qui implique des chemins avec minimum d'interférence intra-flux.

WCETT hérite les avantages des deux métriques ETX et ETT avec la considération de la diversité des canaux. Cependant WCETT souffre de quelques problèmes comme l'isotonie car le deuxième terme de sa formule n'est pas isotonique, ainsi qu'elle prend en considération que le nombre de canaux utilisés et pas l'emplacement ou l'ordonnancement des liens, ce qui peut donner des résultats non optimaux.

Toutefois WCETT ne traite pas le problème d'interférence inter-flux [28], [29], [30].

V.6.3.e- Métrique d'ingérence et de canal de commutation (MIC)

Elle est proposée dans le but d'améliorer la métrique WCETT en résolvant ses problèmes de non iso tonicité et l'incapacité de capturer l'interférence inter-flux. Ainsi d'assurer une charge équilibrée de routage. La métrique MIC d'un chemin P est définie comme suit :

$$MIC(P) = \frac{1}{N \times \min(ETT)} \sum_{l \in P} IRU_l + \sum_{i \in P} CSC_i$$

Formule 9: Métrique d'ingérence et de canal de commutation (MIC) [28]

N est le nombre total de nœuds dans le réseau et $\min(ETT)$ est la plus petite ETT dans le réseau, l est un lien dans le chemin P, le paramètre i est un nœud dans le chemin P.

IRU_l (Interference-aware Resource Usage) est définie comme suit : $IRU_l = ETT_l \times N_l$

N_l est l'ensemble des voisins que la transmission sur le lien l interfère avec eux.

CSC_i (Channel Switching Cost) est définie comme suit :

$$CSC_i = \begin{cases} \omega 1 & \text{if } CH(prev(i)) \neq CH(i) \\ \omega 2 & \text{if } CH(prev(i)) = CH(i) \end{cases}$$

$$0 \leq \omega 1 < \omega 2$$

Formule 10: Coût du canal de commutation (CSCi) [28]

$CH(i)$ représente le canal attribué pour le nœud i , et $prev(i)$ représente le saut précédent d'un nœud(i) [28], [29], [30].

V.6.3.f- Métrique de l'interférence courant iAware

La métrique iAware tente de surmonter quelques insuffisances de la MIC à l'aide d'un modèle d'interférence plus précis (courant) [28], [29], [30].

iAware est définie comme suit : $iAware(P) = (1-\alpha) \times \sum_{1 \leq i \leq k} iAware_i + \alpha \times \max X_j$

Formule 11: Métrique de l'interference courant (iAware) [28]

X_j est la même composante utilisée dans WCETT.

$$iAware_i = \frac{ETT_i}{IR_i}$$

L'interférence ratio $IR_i = \min(IR_i(u), IR_i(v))$

Formule 12: L'interference ratio [28]

L'interférence ratio à un nœud (u) unique pour un lien i est définie comme suit :

$$IR_i(u) = \frac{SINR_i(u)}{SNR_i(u)}$$

Formule 13: L'interference ratio à un noeud (u) pour un lien (i) [28]

Le tableau suivant résume les composants et les caractéristiques de chaque métrique.

	composants				caractéristiques						
	Nombre de sauts	Capacité du lien	Qualité du lien	Diversité des canaux	l'interférence intra-flux	l'interférence inter-flux	l'interférence extérieure	Equilibrage de charge	Agilité	Iso tonicité	Stabilité
Nbre de sauts	O	N	N	N	O	N	N	N	O	O	O
ETX	N	N	O	N	N	O	N	N	N	O	N
ETT	N	O	O	N	N	O	N	N	N	O	N
WCETT	N	O	O	O	O	O	N	O	N	N	N
MIC	N	O	O	O	O	O	N	N	N	O	N
iAware	N	O	O	O	O	O	O	O	N	N	N

Tableau 18: Composants et caracterestiques des metriques de routage conçues pour les WMNs [30]

V.6.4- Métrique choisie

Notre solution est appuyée sur l'équilibrage de charge dans le réseau et le temps de réponse avec un débit maximum. Notre choix est porté sur la métrique iAwar, car elle prend en considération ces critères.

V.7- Conclusion

On a posé dans ce chapitre les bases de conception d'un protocole de routage pour un WMN dédié comme une infrastructure de connexion internet.

Notre proposition vise comme objectifs le débit et le temps de réponse, elle a été portée sur plusieurs axes : approche et méthode de routage ainsi qu'on a choisi une métrique de routage adéquate.

Cependant, la réalisation de cette solution nécessite la précision du format des paquets de contrôle, les structures de données installées...etc.

Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire est de trouver le protocole de routage le plus adéquat pour les réseaux maillés sans fil, cette famille de réseaux qui représente une solution prometteuse dans le domaine de télécommunication.

Pour cela on a procédé en premier temps à une étude détaillée sur les réseaux sans fil en général et les réseaux maillés sans fil en particulier.

Puis on a fait une étude sur les protocoles de routage en se focalisant sur un protocole Proactif : OLSR et un autre réactif : AODV.

Cette étude a été suivie par des simulations où on a soulevé des résultats et des analyses comparatives.

Ce qui nous a permis par la suite de concevoir notre solution qui consiste à un protocole de routage hybride qui tire les avantages et les points forts de chaque protocole ainsi de minimiser l'impact de ses inconvénients.

Notons que les portes restent ouvertes pour les autres pour enrichir et améliorer cette solution en tenant compte d'autres critères et contraintes de cette famille des réseaux, a savoir le multicast, la prise en charge du troisième axe Z (l'espace), ...etc.

En fin nous espérons que ce travail apporte une contribution pour les futurs travaux s'inscrivant dans ce domaine.

ANNEXE

Bluetooth

Nom commercial de la norme IEEE 802.15.1, lancée par Ericsson en 1994, une norme d'un débit de 1 Mb/s, et d'une portée d'environ de 30 mètres.

La faible consommation énergétique de Bluetooth et la possibilité de faire une communication entre deux équipements sans une ligne de vue directe, offre une souplesse d'utilisation.

ZigBee

Nom commercial de la norme IEEE 802.15.4, une norme d'un débit de 250 Kb/s, et d'une portée d'environ de 100 mètres, permet d'obtenir des liaisons sans fil à très bas prix et avec une très faible consommation d'énergie, ce qui la rend particulièrement adaptée pour être directement intégrée dans des petits appareils électroniques (appareils électroménagers, hifi, ...).

Infrarouges IrDA

Les liaisons infrarouges permettent de créer des liaisons sans fil de quelques mètres avec des débits pouvant monter à quelques mégabits par seconde. Cette technologie est largement utilisée pour la domotique (télécommandes) mais souffre toutefois des perturbations dues aux interférences lumineuses.

Home RF

Norme de télécommunication sans fil à haut débit destinée à un usage domestique, mise au point par le HomeRF Working Group, un groupe de sociétés actives dans le réseau sans fil incluant Siemens, Motorola et plus de cent autres sociétés,

C'est une norme de 10 mb/s et d'une portée d'environ de 50mètres.

WIFI

Nom commercial de la norme IEEE 802.11, offre des débits allant jusqu'à 54 Mb/s sur une distance de plusieurs centaines de mètres,

En fait la norme IEEE 802.11 est la norme initiale à partir de laquelle plusieurs normes dérivées ont été créées dans le but de répondre à des objectifs précis : sécurité, interopérabilité, etc.

Les normes dérivées les plus connues sont :

IEEE 802.11a : qui offre un débit de 54 Mb/s dans la bande de fréquence 5.3 GHz.

IEEE 802.11b : qui offre un débit de 11 Mb/s dans la bande de fréquence 2.4 GHz.

IEEE 802.11g : qui offre un débit de 54 Mb/s dans la bande de fréquence 2.4 GHz.

IEEE 802.11i : met l'accent sur la sécurité : authentification et chiffrement de données.

IEEE 802.11n : qui offre un débit de 100 Mb/s dans la bande de fréquence 2.4 GHz.

IEEE 802.11e : a pour but d'améliorer la qualité de service surtout dans la transmission de la voix et de la vidéo.

IEEE 802.11s : utilisée pour les réseaux maillés sans fil.

Hiperlan2 : High Performance LAN2

C'est une norme de 54Mbit/s et d'une portée de 100m, (50m pour une qualité optimale),

Hiperlan2 utilise la bande de fréquence 5.25-5.35 Ghz

HiperLAN2 est incompatible avec le WiFi car elle n'utilise pas la même bande de fréquences.

Wimax

Le Wimax, pour Worldwide Interoperability for Microwave Access, est une norme technique basée sur le standard de transmission radio 802.16, validée en 2001 par l'organisme international de normalisation IEEE, techniquement le WiMax permet des débits de l'ordre de 70 Mb/s avec une portée d'environ de 50 km en exploitant les bandes de fréquence 2.4Ghz et 3.5 GHz, ses caractéristiques permettent une connexion sans fil entre une station de base et des milliers d'abonnés sans nécessiter de ligne visuelle directe.

GSM: Global System for Mobile communication

GPRS: General Packet Radio Service

UMTS : Universel Mobile Telecommunication System

Algorithme utilisé pour sélectionner les MPR d'un nœud

Soient :

(u) un nœud quelconque,

MPR(u) : l'ensemble des MPR de u

$N(u)$: l'ensemble des voisins de u ayant –au moins- un lien avec les voisins de deux sauts de u ,

$N2(u)$: l'ensemble des voisins à deux sauts de u

- 1- Initialiser $MPR(u) = \{\}$
- 2- Identifier l'ensemble $N(u)$,
- 3- Tant que $N2(u) \neq \{\}$ faire
 - Calculer le degré de chaque élément de $N(u)$, sachant que le degré d'un nœud v appartenant à $N(u)$ = nombre de ses voisins appartenant à $N2(u)$.
 - Choisir le nœud qui a un degré maximal et l'ajouter à $MPR(u)$ puis éliminer ses voisins dans l'ensemble $N2(u)$.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. DE LA ROCHE. '*Simulation de la propagation des ondes radio en environnement multi-trajets pour l'étude des réseaux sans fil*'. Thèse doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Lyon France 2007.
- [2] M. RAHOUAL, Patrick SIARRY. '*Réseaux informatiques : conception et optimisation. Edition technip*'. Paris 2006.
- [3] S. BUETTRICH. '*LA PHYSIQUE RADIO DE BASE*'. 2006.
- [4] A. VAN DEN BOSSCHE. '*Proposition d'une nouvelle méthode d'accès déterministe pour un réseau personnel sans fil à fortes contraintes temporelles*'. Thèse doctorat de l'université de Toulouse. 2007.
- [5] A. DESSUREAULT. '*Les réseaux sans fil*'. Centre d'innovation en microélectronique du Québec. 2006.
- [6] J. DEFAYE. '*Les différents types de réseaux sans fil*'. Conservatoire national des arts et métiers. Lyon 2006.
- [7] S. ZIANE. '*Une approche inductive dans le routage à optimisation du délai : application aux réseaux 801.11*'. Thèse de doctorat de l'université de Paris 12 val de Marne 2008.
- [8] O. BILODEAU, F. PROULX. '*La mobilité dans les réseaux ip*'. Rapport technique. École de technologie supérieure université du québec 2006.
- [9] A. BENOIT. '*Réseaux sans fil*'. Cours Université de Lyon.
- [10] I F. AKYILDIZ, X. WANG, W. WANG. '*Wireless mesh networks*'. Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, USA. 2005.
- [11] A. OUNI, H. RIVANO, F. VALOIS. '*Ordonnancement du trafic dans un réseau maillé sans fil*'. Rapport de recherche INRIA 2010.
- [12] C. MOLLE. '*Optimisation de la capacité des réseaux radio maillés*'. Thèse Doctorat de l'Université de Nice - Sophia Antipolis. 2009.
- [13] L. IANNONE. '*Routage Cross-Layer et Gestion de la Mobilité dans les Réseaux Maillés Sans fil*'. Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI Pierre et Marie Curie. 2006.
- [14] U. ASHRAF. '*Qualité de Service et Routage dans les Réseaux Maillés Sans Fil*'. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse. 2010.

- [15] I F. AKYILDIZ and X. WANG. '*Wireless Mesh Networks*'. John Wiley et sons Ltd 2009.
- [16] E. HOSSAIN, K. LEUNG. '*Wireless mesh networks- Architectures and protocols*'. Springer science+ business Media LLC 2008.
- [17] '*Wireless product*'
<http://olivercomm.com/?ocg=scwireless&ban=images/wireless>
- [18] '*Réseaux maillés sans fil (mesh)*'
http://www.itrainonline.org/itrainonline/mmtk/wireless_fr/17_Mesh_Networking/17_fr_mmtk_wireless_mesh_slides.pdf
- [19] E. CIZERON. '*Routage Multi chemins et Codage à Description Multiple dans les Réseaux Ad Hoc*'. Thèse de doctorat de l'université de Nante. France 2009.
- [20] A. BENOIT. '*Routage dans les réseaux*'. Cours Université de Lyon.
- [21] M. NAFA. '*Optimisation des applications de streaming peer to peer pour des réseaux ad hoc mobiles*'. Thèse doctorat de l'Université d'Évry-Val-d'Essonne. 2009.
- [22] T. CLAUSEN, P. JACQUET, '*Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)*', Request for Comments: 3626, Project Hipercom, INRIA 2003.
- [23] C. PERKINS, E. BELDING-ROYER, and S. DAS, '*Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing (AODV)*'. University of California. 2003.
- [24] K. FALL, K. VARADHAN, '*The ns manual*'. 2010.
- [25] E. ALTMAN and T. JIMENEZ. '*NS Simulatrpr for beginners*'. Univ de los Andes, Mérida , Vensuela and ESSI Sophia Antipolis, Farance. 2003.
- [26] M. IZUAN, M. SAAD, Z. AHMAD ZUKARNAIN. '*Performance Analysis of Random-Based Mobility Models in MANET Routing Protocol*'. European Journal of Scientific Research. 2009.
- [27] A. EL FATNI, T. VAL, G. JUANOLE. '*Classification de protocoles MAC multicanaux dans les réseaux locaux maillés sans fil*'. Université de Toulouse 2009.
- [28] Y. YANG, J. WANG, R. KRAVETS. '*Designing Routing Metrics for Mesh Networks*'. Department of Computer Science Univ. of Illinois at Urbana-Champaign , 2006.
- [29] I. BHAKTA, K. MAJUMDAR, A. Kumar BHATTACHARJEE, A. DAS, D. KUMAR SANYAL, M. CHATTOPADHYAY and S. CHATTOPADHYAY. '*Incorporating QoS Awareness in Routing*'

Metrics for Wireless Mesh Networks'. Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol I WCE 2010, June 30 - July 2, 2010, London, U.K.

[30] B. Kumar ADDAGADA, V. KISARA and K. DESAI. '*A Survey: Routing Metrics for Wireless Mesh Networks*'. 2009.

[31] A. HUHTONEN , '*Comparing AODV and OLSR Routing Protocols*', Helsinki University of Technology, 2004.

[32] J. CHEN, Y. LEE, D. MANIEZZO, M. GERLA, '*Performance Comparison of AODV and OFLSR in Wireless Mesh Networks*'. University of California, Los Angeles 2005.

[33] S. SINGH, S. SINGH SRAN, T. CHAND. '*Performance Comparison of AODV, OLSR and OFLSR in Wireless Mesh Networks*'. Proceedings of 2nd National Conference on Challenges & Opportunities in Information Technology (COIT-2008).

[34] I. GLAROPOULOS, A. MAKRIS and B. TIGHNAVARD.

' *Performance Analysis of OLSR and Comparison with OSPF and AODV*'. School of Electrical Engineering KTH Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden. 2007.

[35] A. KLEIN. '*Performance Comparison and Evaluation of AODV, OLSR, and SBR in Mobile Ad-Hoc Networks*'. Innovation Works EADS Deutschland GmbH Munich, Germany. 2008.

[36] S. A. ADE, P.A.TIJARE . '*Performance Comparison of AODV, DSDV, OLSR and DSR Routing Protocols in Mobile Ad Hoc Networks*'. International Journal of Information Technology and Knowledge Management 2010.

[37] M. KANE , H. HOUD , A. LAFARCINADE. '*Qualité de Service dans les réseaux Ad Hoc*'. Rapport Projet 6 . IUP GMI Avignon 2007/2008.