

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université A/Mira de Béjaia  
Faculté des Sciences Exactes  
Département d'Informatique

## MÉMOIRE DE MASTER RECHERCHE

En  
Informatique

Option  
*Réseaux et Systèmes Distribués*

### Thème

Routage dans les réseaux Ad hoc basé sur la  
gestion d'énergie.

Présenté par : Melle MADI Mebrouka.  
Melle BERKOUKI Kenza.

Soutenu le 28 Juin 2018 devant le jury composé de :

Président	Dr L. LEKADIR	U. A/Mira Béjaia.
Examineur	Mr. F. MIR	U. A/Mira Béjaia.
Examineur	Melle L. LAKAOUR	U. A/Mira Béjaia.
Promotrice	Dr K. ADEL	U. A/Mira Béjaia.
Co-promotrice	Dr D. BOULAHROUZ	U. A/Mira Béjaia.

Béjaia, Juin 2018.

## *※ Remerciements ※*

Nous remercions Dieu tout puissant pour son aide.

Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention d'un grand nombre de personnes, nous souhaitons ici les en remercier.

Nous tenons à remercier notre promotrice Dr **ADEL** Karima, ses précieux conseils, sa confiance, sa patience et son aide durant toute la période de travail ont constitué un apport considérable. Nous tenons à remercier Dr **BOULAHROUZ** Djamila pour son aide.

A Dr **MADI** Kamel qui nous a donné énormément d'aide.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils portent à notre travail en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leurs propositions .

※ *Dédicaces* ※

Nous dédions ce travail à :

Nos très chers parents.

Nos frères et sœurs.

Tous nos adorables amis et amies.

Ainsi qu'à toute personne qui nous a soutenues.

*Mebrouka, Kenza*

# Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	iv
Liste des tableaux	v
Introduction générale	1
<b>1 Généralités sur les réseaux Ad hoc</b>	<b>4</b>
1.1 Historique . . . . .	4
1.2 Réseaux mobiles . . . . .	5
1.2.1 Réseaux mobiles avec infrastructure . . . . .	5
1.2.2 Réseaux mobiles Ad hoc . . . . .	6
1.3 Modélisation d'un réseau mobile Ad hoc . . . . .	8
1.4 Caractéristiques des réseaux Ad hoc . . . . .	8
1.5 Domaines d'application . . . . .	10
1.6 Avantages et inconvénients des réseaux Ad Hoc . . . . .	11
1.6.1 Avantages . . . . .	11
1.6.2 Inconvénient . . . . .	12
1.7 Mode de communication dans les réseaux Ad hoc . . . . .	13
1.8 Conclusion . . . . .	14
<b>2 Protocoles de routage dans les réseaux Ad hoc</b>	<b>15</b>
2.1 Introduction . . . . .	15
2.2 Définition du routage dans les réseaux Ad Hoc . . . . .	15

---

2.3	Difficulté de routage dans les réseaux mobiles Ad hoc . . . . .	16
2.4	Classification des protocoles de routage Ad hoc . . . . .	16
2.4.1	Le protocole proactif Table-driven . . . . .	18
2.4.1.1	Protocole DSDV (Destination-Sequenced Distance- Vector) . . . . .	19
2.4.1.2	Protocole OLSR (Optimized Link State Routing) . . . . .	19
2.4.1.3	Protocole STAR (Source-Tree Adaptive Routing) . . . . .	20
2.4.1.4	Protocole GSR (Global State Routing) . . . . .	21
2.4.2	Protocoles réactifs On-demand . . . . .	22
2.4.2.1	Protocole AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) . . . . .	22
2.4.2.2	Protocole DSR (Dynamic Source Routing) . . . . .	23
2.4.2.3	Protocole TORA (Temporally Ordered Routing Al- gorithm) . . . . .	24
2.4.2.4	Protocole ARA (Ant-colony based Routing Algorithms) . . . . .	25
2.4.2.5	Protocole ABR (Associativity-Based Routing) . . . . .	26
2.4.3	Protocoles Hybrides . . . . .	27
2.4.3.1	Protocole ZRP (Zone Routing Protocol) . . . . .	27
2.4.3.2	Protocole FSR (Fisheye State Routing) . . . . .	28
2.5	Tableau comparatif . . . . .	28
2.6	Conclusion . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Proposition d'une nouvelle approche</b> . . . . .	<b>31</b>
3.1	Introduction . . . . .	31
3.2	Spécifications des paramètres de notre approche . . . . .	32
3.2.1	La liste des paramètres à minimiser ( <i>MinP</i> ) . . . . .	32
3.2.2	La liste des paramètres à maximiser ( <i>MaxP</i> ) . . . . .	33
3.3	Définition du score . . . . .	35
3.4	Durée de vie du réseau . . . . .	35
3.5	La mobilité . . . . .	36
3.6	La stabilité . . . . .	36
3.7	Recherche du plus court chemin . . . . .	36
3.8	Conclusion . . . . .	39

---

<b>4</b>	<b>Implémentation et validation de l'approche proposée</b>	<b>40</b>
4.1	Introduction . . . . .	40
4.2	Environnement de travail . . . . .	40
4.2.1	Présentation de langage de programmation JAVA . . . . .	41
4.2.2	Eclipse IDE . . . . .	41
4.3	Conception et implémentation . . . . .	42
4.3.1	Interface graphique . . . . .	42
4.4	Évaluation des performances . . . . .	44
4.4.1	Résultat . . . . .	44
4.4.2	Comparaison . . . . .	46
4.5	Conclusion . . . . .	46
	<b>Conclusion et perspective</b>	<b>47</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>49</b>

# Table des figures

1.1	Réseau mobile avec infrastructure [10]. . . . .	5
1.2	Changement de la topologie à cause de la mobilité [29]. . . . .	7
1.3	Modélisation d'un réseau Ad hoc [1]. . . . .	8
1.4	Domaines d'application [27]. . . . .	11
2.1	Catégories des protocoles de routage Ad hoc [32]. . . . .	18
2.2	Protocole OLSR [4]. . . . .	20
2.3	Protocole AODV [24]. . . . .	23
2.4	Protocole DSR [4]. . . . .	24
2.5	Protocole ZRP [7]. . . . .	28
3.1	Exemple de la découverte de chemin entre la source et la destination.	38
4.1	Interface principale. . . . .	43
4.2	Génération. . . . .	44
4.3	Comparaison des performances dans le nombre de nœuds composant le chemin. . . . .	45

# Liste des tableaux

- 2.1 Tableau comparatif des différents protocoles de routage Ad hoc . . . 29
- 4.1 Comparaison des performances. . . . . 45

# Liste des abréviations

<b>ABR</b>	Associativity-Based Routing.
<b>AODV</b>	Ad hoc On-demand Distance Vector.
<b>ARA</b>	Ant-colony based Routing Algorithms.
<b>CSMA</b>	Carrier Sense Multiple Access.
<b>DARPA</b>	Defense Advanced Research Project Agency.
<b>DSDV</b>	Destination-Sequenced Distance-Vector.
<b>DSR</b>	Dynamic Source Routing.
<b>DAG</b>	Directed Acyclic Graph.
<b>FSR</b>	Fisheye State Routing.
<b>GSR</b>	Global State Routing.
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
<b>IDE</b>	Integrated Drive Electronics.
<b>IBM</b>	International Business Machines.
<b>MANET</b>	Mobile Ad hoc Network.
<b>MPR</b>	Multi Point Relays.
<b>PAN</b>	Personnel Area Network.
<b>PDA</b>	Personal Digital Assistant
<b>RERR</b>	Route Error.
<b>RREQ</b>	Route Request
<b>RREP</b>	Route Reply
<b>STAR</b>	Source-Tree Adaptive Routing.
<b>SURAN</b>	Sur vivable Radio Networks.
<b>SWT</b>	Standart Width Toolkit.
<b>TC</b>	Topology Control.
<b>TORA</b>	Temporally Ordered Routing Algorithm.
<b>ZRP</b>	Zone Routing Protocol.

# Introduction générale

Ces dernières années le développement de la technologie sans fil a ouvert de nouvelles perspectives dans le domaine des télécommunications, les réseaux mobiles basés sur la technologie sans fil connaissent aujourd'hui une forte expansion. Les réseaux mobiles offrent une grande flexibilité d'emploi, ils permettent aux utilisateurs de se déplacer librement tout en continuant normalement leurs communications. Il existe deux types de réseaux mobiles, les réseaux mobiles avec infrastructure et les réseaux mobiles Ad hoc. Les réseaux mobiles avec infrastructure sont basés sur un ensemble de sites fixes appelés stations de base, ces sites vont relier les différents nœuds mobiles pour former un réseau interconnecté. L'inconvénient de ce type de réseau c'est qu'il requière le déploiement d'une importante infrastructure fixe.

Les réseaux Ad hoc sont constitués de plusieurs nœuds ayant une caractéristique essentielle résidant dans l'absence d'infrastructure fixe et ayant une topologie changeante due à la mobilité des nœuds et pose le problème de l'épuisement de leurs batteries.

Les recherches actuelles dans les réseaux Ad-hoc sont dirigées vers les algorithmes de routage. En effet à cause de la mobilité des nœuds il est très difficile de localiser une destination à un instant donné, les protocoles de routage conçus pour des réseaux statiques sont donc inadaptés pour ce type de réseaux. Plusieurs protocoles de routage pour les réseaux Ad hoc ont été développés, chaque protocole essaye de maximiser les performances du réseau en minimisant le délai de livraison des paquets, l'utilisation de la bande passante et la consommation d'énergie. Les algorithmes de routage pour les réseaux Ad hoc peuvent se classer en trois catégories,

les protocoles Table-driven, les protocoles On-demand et les protocoles Hybrides. Les protocoles Tables-driven maintiennent à jour des tables de routage qui indiquent les routes vers chaque destination du réseau, les routes sont donc calculées même si elles ne sont pas utilisées. L'avantage de ces protocoles c'est que la connexion entre les nœuds est immédiate puisque les routes sont calculées à l'avance, l'inconvénient c'est qu'ils utilisent beaucoup de paquets de contrôle pour maintenir à jour les tables de routage. Les protocoles On-demand en contrepartie calculent les routes selon les besoins, la route est calculée quand elle est demandée, l'avantage de ces protocoles c'est qu'ils utilisent moins de paquets de contrôle que les protocoles Table-driven, l'inconvénient est qu'ils ont un délai initial avant de commencer la transmission des données, c'est le délai nécessaire pour déterminer la route. Les protocoles hybrides essaient de combiner les deux approches précédentes pour bénéficier de leurs avantages mais ils cumulent aussi leurs inconvénients. Le problème est donc de trouver un compromis et essayer d'avoir un délai initial court tout en utilisant un minimum de paquets de contrôle.

Dans les années passées, plusieurs protocoles ont été proposés, appelés les protocoles de l'énergie consciente (Energy-aware protocols). Certains protocoles essaient de réduire le trafic, et donc l'énergie dépensée. Une autre série de protocoles est basée sur le contrôle de la topologie et les problèmes de routage avec énergie minimale. Les nœuds peuvent modifier leur niveau d'énergie de transmission pour maintenir le niveau de connectivité de la topologie du réseau, pour accroître la capacité du réseau, et de réduire la consommation des interférences et de l'énergie.

Ce travail rentre dans le cadre de l'étude du problème de routage dans les réseaux mobiles Ad hoc. Son objectif principal est de proposer une nouvelle approche pour le routage dans les réseaux Ad hoc basé sur la gestion d'énergie tout en garantissant une longue durée de vie des réseaux. La nouvelle approche proposée se base sur l'algorithme d'acheminement Dijkstra[14] pour trouver le plus court chemin entre la source et la destination.

Ce mémoire se divise en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous présentons les réseaux mobiles Ad hoc, leurs caractéristiques et leurs applications, nous avons consacré le deuxième chapitre à la

classification des différents protocoles de routage pour les réseaux Ad hoc.

Dans le troisième chapitre, nous proposons une nouvelle approche pour la découverte des routes qui se base sur un paramètre appelé score qui dépend de : l'énergie, la disponibilité, la fiabilité pour trouver le plus court chemin.

Le quatrième chapitre, contient une validation de notre approche en utilisant des scénarios de simulation et en comparant nos résultats avec ceux obtenues par un autre algorithme. Le programme de simulation est développé avec java. Nous avons clôturé notre mémoire avec une conclusion générale et quelques perspectives de recherche.

# Généralités sur les réseaux Ad hoc

## 1.1 Historique

Historiquement, un réseau mobile Ad hoc est un réseau mobile sans infrastructure fixe, généralement employé dans le domaine militaire, pour améliorer et garantir la communication sans fil. Tout a commencé au début des années 70, quand sont apparus les premières applications des réseaux Ad hoc par le département de la défense américaine *DARPA* (Defense Advanced Research Project Agency).

Un réseau Ad hoc dispose d'une architecture distribuée qui partage le canal de diffusion par la combinaison des protocoles CSMA et ALOHA. Ensuite au milieu des années 80, le SURAN (Survivable Radio Networks) a été développé par DARPA afin de combler les lacunes au sein du projet *PRN* et de permettre au réseau d'avoir une dizaine de milliers de nœuds mobiles qui peuvent être gérés par des protocoles avec des mécanismes radio simple. À partir des années 90 le groupe de travail MANET a lancé des recherches dans ce domaine. Il a pris son essor avec l'arrivée des technologies radio, spécialement la norme IEEE 802.11 et ses différentes dérivées. Cette norme a été standardisée en 1999 par l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), dans le but d'assurer la communication entre ordinateurs utilisant le médium radio.

## 1.2 Réseaux mobiles

Un réseau est dit mobile s'il permet à ses utilisateurs d'accéder à l'information indépendamment de leurs position géographique. Pour communiquer entre eux les noeuds du réseau mobile utilisent une interface de communication sans fil (médium radio ou infrarouge) qui permet de propager les signaux sur une certaine distance. Les réseaux mobiles offrent une plus grande flexibilité d'emplois et un plus grand confort par rapport au réseaux statiques(fixe). Nous pouvons distinguer deux classes de réseaux mobiles, les réseaux mobiles avec infrastructure de communication, et les réseaux mobiles sans infrastructure de communication ou les réseaux Ad hoc [10].

### 1.2.1 Réseaux mobiles avec infrastructure

Un réseau mobile avec infrastructure est basé sur un ensemble de sites fixes appelés stations de base qui sont interconnectés entre eux à travers un réseau de communication filaire, chaque station de base peut communiquer directement en utilisant une interface sans fil avec les noeuds mobiles se trouvant dans une zone géographique limitée comme le montre la figure suivante [10] :

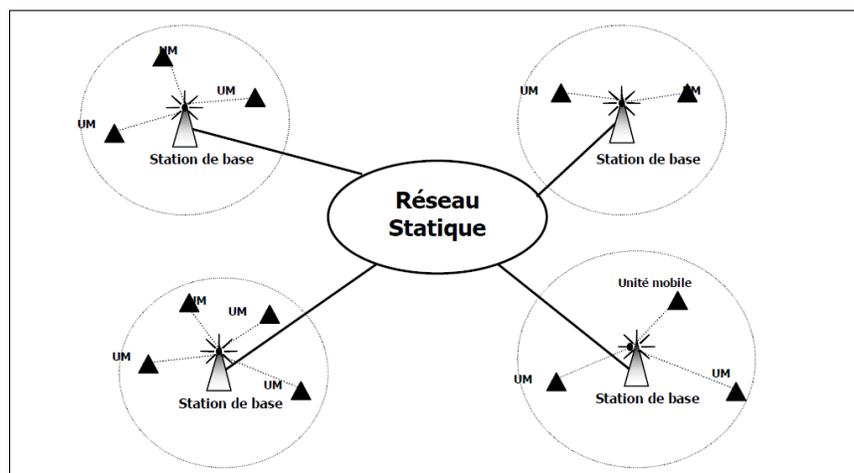


FIGURE 1.1 – Réseau mobile avec infrastructure [10].

Un nœud dans les réseaux mobiles avec infrastructures se connecte et communique avec les autres nœuds du réseau à travers la station de base la plus proche dans sa portée de communication, si le nœud mobile sort de la portée de cette station il doit trouver une autre station de base pour continuer la communication. Les réseaux mobiles avec infrastructures coûtent chère car ils demandent le déploiement d'une importante infrastructure fixe.

### 1.2.2 Réseaux mobiles Ad hoc

Un réseau mobile Ad hoc, appelé généralement Mobile Ad hoc Network (MANET), est un ensemble de nœuds mobiles qui se déplacent dans un territoire quelconque d'une manière autonome et coopérative, sans l'utilisation d'une infrastructure préexistante ou d'une administration centralisée. Les “ondes radio” qui se propagent entre les différents nœuds mobiles sont le seul moyen de communication. Dès qu'un ensemble de nœuds mobiles se trouve à portée radio les uns des autres, alors le réseau se forme spontanément mais de manière provisoire. Il existe deux modes de communication entre deux nœuds mobiles qui dépendent de la distance qui les sépare. Dans le cas où les deux nœuds sont à portée radio et peuvent communiquer directement, ce mode est appelé transmission Ad hoc. En revanche, dans le cas où les deux nœuds ne sont pas à portée, ils doivent utiliser d'autres nœuds mobiles comme relais afin d'assurer la communication et d'acheminer les paquets à destination, ce mode est appelé transmission multi-sauts [29].

L'absence de l'infrastructure ou du réseau filaire composé des stations de base, oblige les unités mobiles à se comporter comme des routeurs qui participent à la découverte et la maintenance des chemins pour les autres hôtes du réseau.

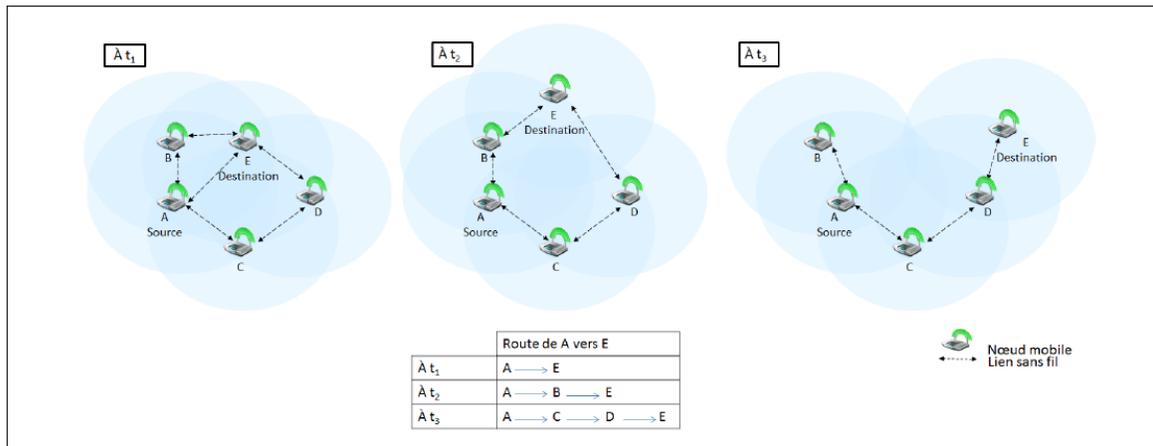


FIGURE 1.2 – Changement de la topologie à cause de la mobilité [29].

La figure 1.2 montre un exemple de changement de la topologie à cause de la mobilité des noeuds sans fil. Chaque fois qu'un noeud bouge, les tables de routage doivent être recalculées pour prendre en compte les mises à jour. A  $t_1$ , nous observons dans la figure 1.2 que la route de  $A$  vers  $E$  est le lien direct  $A \rightarrow E$ . A  $t_2$ , la topologie change :  $E$  n'est plus à la portée radio de  $A$ , alors le lien direct n'existe plus. De ce fait, la route de  $A \rightarrow E$  change et devient :  $A \rightarrow B \rightarrow E$ . Les noeuds bougent encore à  $t_3$ ,  $E$  s'éloigne de  $B$  alors la route qui existe pour l'atteindre devient  $A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ .

La mobilité des terminaux est l'avantage indéniable des réseaux mobiles Ad hoc. La topologie du réseau peut changer à tout moment d'une manière dynamique, rapide et aléatoire. Mais, les changements fréquents de la topologie peuvent engendrer la rupture des liens. En plus, l'utilisation des “ ondes radio ” pour communiquer limite la bande passante réservée à un noeud. Les erreurs de transmission radio sont plus fréquentes dans les réseaux mobiles Ad hoc que dans les réseaux filaires. Une autre contrainte s'ajoutant aux contraintes des réseaux mobiles Ad hoc est celle de l'interférence. Deux transmissions simultanées sur une même fréquence ou utilisant des fréquences proches peuvent interférer. Aussi, les contraintes et limitations physiques qui minimisent le contrôle des données transférées sont les causes d'une fiabilité limitée dans ce type de réseau.

### 1.3 Modélisation d'un réseau mobile Ad hoc

Un réseau Ad hoc peut être modélisé par un graphe  $G_t = (V_t, E_t)$ . Où :  $V_t$  représente l'ensemble des nœuds (par exemple, les unités ou les hôtes mobiles) du réseau et  $E_t$  modélise l'ensemble des connections qui existent entre ces nœuds. Si  $e = (u, v) \in E_t$ , cela veut dire que les nœuds  $u$  et  $v$  sont en mesure de communiquer directement à l'instant  $t$ . La topologie du réseau peut changer à tout moment, elle donc dynamique et imprévisible ce qui fait que la déconnexion des unités soit très fréquente [1]. La figure représente un réseau Ad hoc de 7 unités mobiles sous forme d'un graphe.

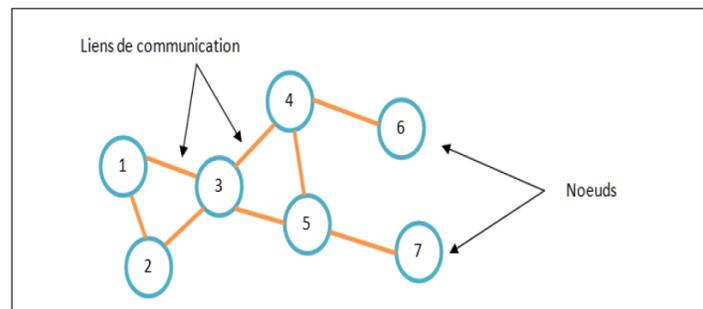


FIGURE 1.3 – Modélisation d'un réseau Ad hoc [1].

### 1.4 Caractéristiques des réseaux Ad hoc

Les réseaux Ad hoc peuvent être déployés dans un environnement quelconque. Le déploiement de ces réseaux est d'une part simple puisqu'il suffit de disposer d'un certain nombre de terminaux et d'autre part rapide car il est immédiatement fonctionnel dès lors que les terminaux sont présents [15].

Certaines autres caractéristiques peuvent être dégagées pour ce type de réseaux :

- **L'absence d'infrastructure** : les réseaux Ad hoc se distinguent des autres réseaux mobiles par la propriété d'absence d'infrastructure préexistante et

de toute administration centralisée. Les nœuds mobiles sont responsables de l'établissement et du maintien de la connectivité du réseau de manière continue.

- **Une topologie dynamique** : les unités mobiles du réseau, se déplacent d'une façon libre et arbitraire. Elles peuvent accéder au réseau ou en sortir. De ce fait, la topologie du réseau peut changer, à des instants imprévisibles, de manière rapide et aléatoire. Les liens de communication peuvent être unidirectionnels ou bidirectionnels.
- **Une bande passante limitée, une capacité variable des liens** : la bande passante est limitée et restreinte si on la compare à celle offerte dans les réseaux filaires, puisque le canal de transmission sans fil est partagé. La congestion est une des conséquences du problème de la limitation de la bande passante qu'est encore alourdi par la diffusion. En effet, tout paquet de diffusion émis vers une station en cours de communication (que ce paquet lui est destiné ou pas) va altérer la communication de cette station.
- **La contrainte d'énergie** : les nœuds mobiles sont alimentés par des sources d'énergies autonomes comme les batteries ou autres sources consommables. Le paramètre d'énergie semble très important car il affecte directement la durée de vie du réseau. Plusieurs équipes de recherche se pèchent sur ce point afin d'améliorer la gestion des ressources énergétiques des systèmes sans pour autant affecter les applications.
- **Une sécurité limitée** : les réseaux mobiles Ad hoc sont les plus touchés par le paramètre de sécurité, que les réseaux filaires classiques. Dans ces derniers, fournir une sécurité au réseau paraît simple du fait de l'utilisation d'une administration centralisée. Cependant, les réseaux Ad hoc n'ont pas un nœud qui joue le rôle d'administrateur. De ce fait les modèles de sécurité des réseaux filaires sont inadaptés pour les réseaux Ad hoc.

## 1.5 Domaines d'application

Historiquement, les réseaux mobiles Ad hoc ont été conçus par l'entité DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) de l'armée américaine comme un moyen de communication efficace entre les soldats pendant les situations de guerre. Cependant, ces réseaux trouvent aujourd'hui plusieurs applications dans le domaine civil. Parmi ces applications on peut citer [27] :

- **Opérations militaires** : les militaires accordent beaucoup d'importance à la mise en place des réseaux MANET. L'intérêt de cette catégorie de réseaux par rapport aux réseaux avec infrastructure réside dans leur aspect distribué et spontané. De plus, dans les situations de bataille, l'infrastructure est la première cible de l'ennemi.
- **Services d'urgence et de crise** : lors des catastrophes naturelles, l'infrastructure de communication est totalement ou partiellement détruite. Il est, donc, nécessaire de mettre en place un réseau de communication le plus rapidement possible avec le moindre coût afin d'organiser les opérations de secours des personnes touchées. Les réseaux Ad hoc représentent l'alternative idéale à ce genre de situations.
- **Evènements temporaires** : l'organisation d'un évènement temporaire (réunion de travail, conférence) qui nécessite le déploiement d'un réseau de communication représente un autre champ d'application des réseaux Ad hoc. En effet, mettre en place une infrastructure filaire ou sans fil pour assurer les communications lors d'un évènement de quelques jours n'est pas pratique puisque le réseau qui sera mis en place ne sera plus utilisé après cet évènement. Par contre, l'utilisation d'un réseau MANET permet de gagner du temps lors de son déploiement et de gagner en coût puisque les terminaux seront récupérés pour être utilisés ailleurs.
- **Réseaux personnel (PAN)** : Il est évident que le déploiement d'une infrastructure de communication pour mettre en place un réseau de communication à faible portée comme Bluetooth n'est pas pratique et n'est pas envisageable

en raison du surcout engendré. Ainsi, les réseaux Ad hoc s'impose comme une excellente alternative pour ce genre de situations.

D'une façon générale, les réseaux Ad hoc sont utilisés plutôt que les réseaux filaires ou les réseaux cellulaires lorsque le déploiement d'une infrastructure est contraignant ou impossible en raison de contrainte de temps, de budget ou de durée d'exploitation du réseau.

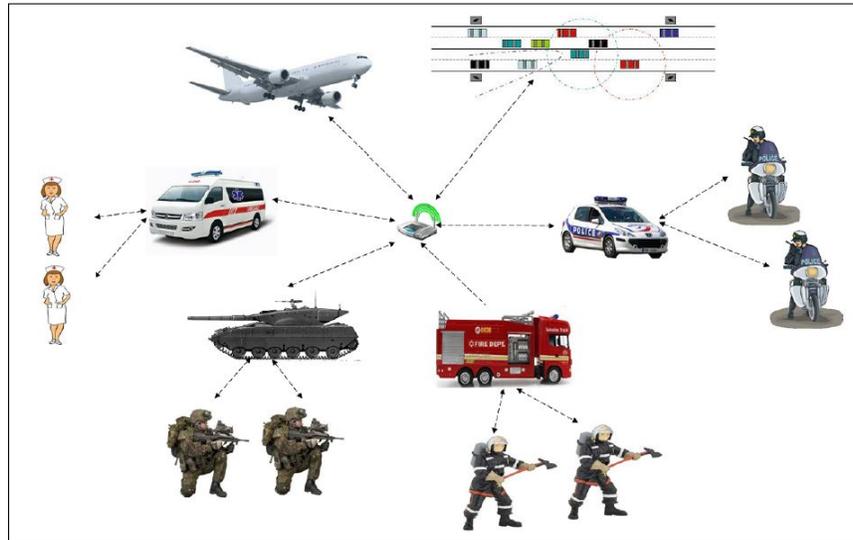


FIGURE 1.4 – Domaines d'application [27].

## 1.6 Avantages et inconvénients des réseaux Ad Hoc

### 1.6.1 Avantages

Les réseaux Ad hoc présentent plusieurs avantages, les plus importants sont [28] :

- **Déploiement facile** : l'absence du câblage donne plus de souplesse, et permet de déployer un réseau Ad hoc facilement et rapidement. Cette facilité peut être justifiée par l'absence d'une infrastructure préexistante permettant,

ainsi, d'économiser tout le temps de déploiement et d'installation du matériel nécessaire.

- **Pas de câblage** : l'une des caractéristiques des réseaux Ad hoc est l'absence d'un câblage, et ce en éliminant toutes les connexions filaires qui sont remplacées par des connexions radio.
- **Coût** : le déploiement d'un réseau Ad hoc ne nécessite pas d'installer des stations de base, les mobiles sont les seules entités physiques nécessaires pour déployer un tel réseau. Ce qui conduit à la réduction de son coût d'une manière significative.
- **Extensible** : l'une des propriétés les plus importantes d'un réseau Ad hoc est la possibilité de l'étendre, et d'augmenter sa taille très facilement et sans nécessiter trop de moyens. Pour expliquer cet aspect, il suffit uniquement d'imaginer l'arrivée d'un nouveau nœud mobile à un réseau Ad hoc déjà installé et mis en place. Pour que ce nœud fonctionne au sein du réseau, il suffit de procéder à quelques configurations au niveau du nœud lui-même.
- **Permet la mobilité** : comme l'indique leur nom, et à l'image des réseaux sans fil avec infrastructure, les réseaux mobiles Ad hoc permettent une certaine mobilité à leurs nœuds. De ce fait, ces derniers peuvent se déplacer librement à condition de ne pas s'éloigner trop les uns des autres pour garder leur connectivité.

### 1.6.2 Inconvénient

- **Topologie non prédictible** : l'activité permanente et les déplacements fréquents des nœuds d'un réseau Ad hoc rendent son étude très difficile. Le raisonnement est bien connu, le changement rapide de sa topologie dû aux déplacements des nœuds.
- **Capacités limitées** : dans un tel réseau, la configuration de la portée de communication des nœuds (ce qui revient à paramétrer la puissance d'émission) est important. En effet, il faut qu'elle soit suffisante pour assurer la connectivité du réseau. Mais plus on accroît la portée des mobiles, plus les commu-

communications demandent de l'énergie. Il faut donc trouver un compromis entre la connectivité du réseau et consommation énergétique.

- **Taux d'erreur important** : les risques de collisions augmentent avec le nombre de nœuds qui partagent le même médium. Par conséquent, plus la portée augmente, plus les risques de collision n'est importante.
- **Sécurité** : un autre dilemme des réseaux Ad hoc et qui attire la curiosité des chercheurs et des spécialistes de ce domaine et la notion de sécurité. Un réseau Ad hoc tels que défini précédemment ne permet pas d'assurer la confidentialité de l'information échangée entre les nœuds. Contrairement aux réseaux filaires, les réseaux sans fil sans infrastructure ne peuvent utiliser un matériel spécifique (firewall par exemple) pour empêcher les accès non autorisés au réseau.

## 1.7 Mode de communication dans les réseaux Ad hoc

Les échanges de données dans les réseaux mobiles Ad hoc utilisent les trois principaux modes de communication suivants [40] :

- **Communication “ point à point ” ou Unicast** : On spécifie le nœud suivant sur la route d'un paquet de données.
- **Communication “ multipoint ” ou Multicast** : Chaque nœud source va transmettre ces paquets à un groupe de nœuds.
- **Communication par la “ diffusion ” ou Broadcast** : Dans ce mode un nœud source va transmettre les paquets à tous les nœuds voisins, chaque nœud mobile réémet à son tour les paquets qu'il reçoit à ses voisins jusqu'à ce qu'ils arrivent à la destination.

## 1.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les réseaux mobiles Ad hoc. Ils se distinguent des autres réseaux par leur grande flexibilité d'emploi mais aussi par des contraintes supplémentaires telles que la limitation d'énergie et l'absence d'une station fixe le problème des nœuds isolés. La communication dans ce type de réseaux est une tâche ardue comparé aux réseaux filaires ce qui rend les protocoles de routage très difficiles à établir pour les réseaux Ad hoc.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter quelques protocoles de routage développés pour les réseaux Ad hoc.

# Protocoles de routage dans les réseaux Ad hoc

## 2.1 Introduction

Ces dernières années plusieurs protocoles de routage pour les réseaux Ad hoc ont été développés, ces protocoles essayent de maximiser les performances en minimisant le délai de livraison des paquets, l'utilisation de la bande passante et la consommation d'énergie. Dans ce chapitre nous allons présenter une classification des protocoles de routage existants et présenter en détail le fonctionnement de quelques protocoles.

## 2.2 Définition du routage dans les réseaux Ad Hoc

Le routage est une méthode à travers laquelle on fait transiter une information donnée depuis un certain émetteur vers un destinataire bien précis. Le problème du routage ne se résume pas seulement à trouver un chemin entre les deux nœuds du réseau, mais encore à trouver un acheminement optimal et de qualité d'énergie [5]. Dans les réseaux Ad hoc il existe aucune infrastructure fixe ou élément centrale qui peut gérer le routage. Chaque nœud doit donc participer au routage qui lui permet de communiquer avec les autres nœuds du réseau.

## 2.3 Difficulté de routage dans les réseaux mobiles Ad hoc

Afin de pallier aux problèmes dus aux différents mouvements des nœuds mobiles qui peuvent modifier le trafic, un réseau Ad hoc doit donc s'organiser automatiquement de telles sortes à être capable d'accomplir la tâche pour laquelle il a été déployé rapidement, et de pouvoir s'accommoder aux conditions de propagation.

Dans le cas où le nœud destinataire se trouve dans la portée du nœud émetteur nous n'aurons pas besoin de routage proprement dit, malheureusement ce n'est pas toujours le cas, en effet, chaque nœud sera donc susceptible de jouer un rôle dans l'acheminement du paquet vers sa destination finale. Dans ce cas Nous parlerons alors d'une communication “ multihop ” . Vu les modestes capacités de calcul et de sauvegarde et de la taille du réseau dont il est caractérisé un réseau Ad hoc, il est très important de signaler que les méthodes et les approches utilisés pour l'acheminement des paquets dans le réseau sont évidemment différentes et plus complexes à mettre en œuvre par rapport à celles utilisées dans les réseaux classiques (statique).

## 2.4 Classification des protocoles de routage Ad hoc

La classification des protocoles de routage se fait en fonction de la méthode de création et de maintenance de routes lors de l'acheminement des données. Selon les informations de routage échangées et les méthodes de calcul des routes utilisées, on distingue deux grandes familles de routage, les routages à vecteurs de distance et les routages à état de liens et une autre hybride entre les deux.

1. **Routage à vecteurs de distance** : Dans la méthode à vecteurs de distance, chaque nœud diffuse périodiquement sa table de routage à ses voisins, la table contient les adresses des nœuds destination du réseau et la distance en nombre de sauts pour atteindre chacun d'eux. Un nœud met sa table de routage à jour s'il trouve une route plus courte que celle qu'il a dans sa table, ou si le nœud

par lequel il passe pour atteindre une destination donnée change de distance vers cette destination, ou encore s'il trouve un nœud inconnu (c'est-à-dire, qui n'existe pas dans sa table) [18].

2. **Routage à état de liens** : Dans la méthode à état de liens chaque nœud diffuse périodiquement (par inondation) l'état des liens avec ses voisins à tous les nœuds du réseau, chaque nœud maintient alors une vue globale de la topologie du réseau ce qui lui permet de calculer les routes pour atteindre chaque destination. On inonde aussi le réseau quand il y a un changement dans l'état des liens. Cette méthode permet de trouver rapidement des alternatives pour transmettre les paquets en cas de coupure d'une route, on peut aussi utiliser simultanément plusieurs routes pour atteindre la même destination. Le problème avec cette méthode est que la quantité d'informations à stocker et diffusées peut devenir considérable si le réseau contient un grand nombre de nœuds [18].

Nous discuterons de la classification des protocoles de routage Ad hoc existants, de leurs caractéristiques et de leurs types. Les protocoles de routage pour les réseaux mobiles Ad hoc peuvent être divisés en trois catégories en fonction du mécanisme de mise à jour des informations de routage. Ils peuvent être proactifs (pilotés par des tables), réactifs (à la demande) ou hybrides [20][39].

La figure2.4 montre les trois catégories des protocoles des routages Ad hoc et divers protocoles proposés dans chaque catégorie [32][41][36].

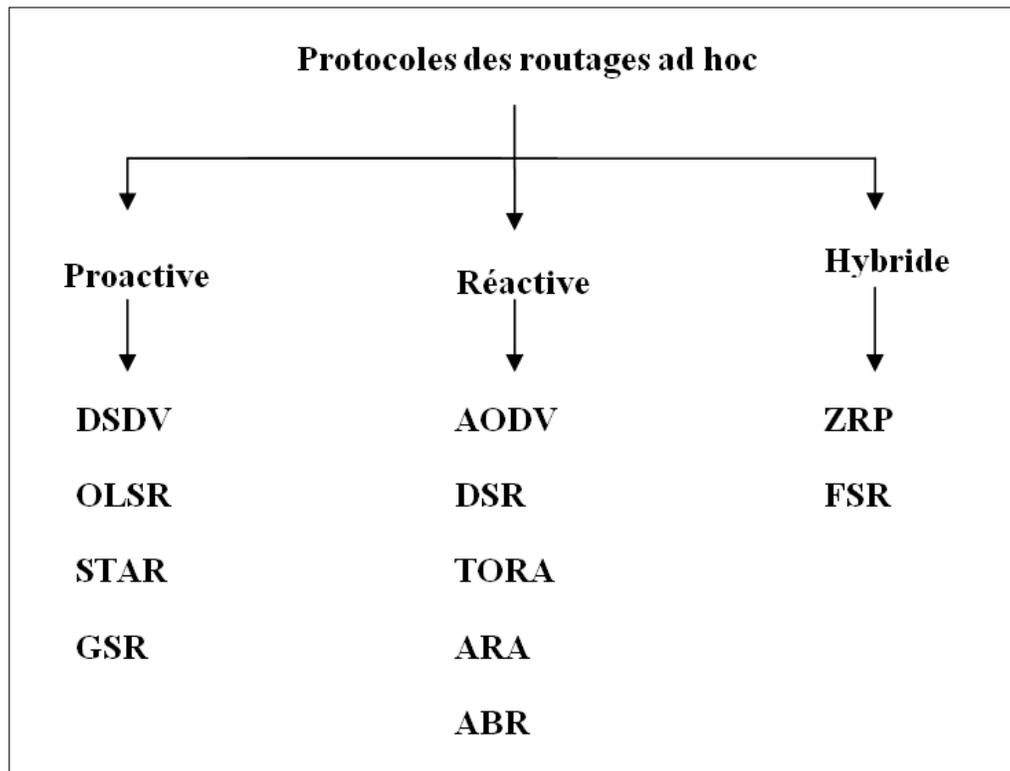


FIGURE 2.1 – Catégories des protocoles de routage Ad hoc [32].

### 2.4.1 Le protocole proactif Table-driven

L'essentiel de ce type de routage est l'établissement des routes immédiates entre les sources et les destinations, pour cela, chaque nœud maintient une table de routage qui contient des informations concernant les autres nœuds du réseaux. Comme l'environnement est mobile, la mise à jour des tables se fait dans un intervalle de temps régulier ou lorsqu'il y a un changement dans l'une des tables de routage. Cette tâche est accomplie par l'échange des messages entre les nœuds. Ces messages permettent de calculer les chemins suivant des critères : comme le nombre de sauts séparant les nœuds, le délai et la bande passante disponible sur le chemin. L'avantage de ces protocoles réside dans l'acheminement des informations qui connaîtront la route à prendre et la transmission sera considérée comme immédiate. L'inconvénient

majeur est le coût de maintenance des connaissances sur la topologie et de routage dû à l'envoi périodique des messages. Ceci génère une consommation continue de la bande passante.

De nombreux protocoles proactifs existent. Nous allons présenter les suivants :

#### 2.4.1.1 Protocole DSDV (Destination-Sequenced Distance-Vector)

Perkins et Bhagwat [34]. ont Proposé le DSDV. C'est un protocole de routage proactif à vecteur de distance basé sur l'algorithme distribué de Bellman-Ford avec quelques améliorations. Chaque nœud maintient une table de routage qui contient une entrée pour chacun des autres nœuds du réseau, cette entrée contient les informations suivantes :

- Identifiant du nœud ;
- Le nombre de sauts pour atteindre ce nœud ;
- Un numéro de séquence attribué par le nœud destination, ce numéro permet de reconnaître la dernière mise à jour de route et préserve ainsi le réseau du bouclage.

Les mises à jour dans DSDV sont transmises périodiquement à travers deux types de paquets :

- **Mise à jour complète** : Elle correspond à un envoi de toutes les informations de la table de routage et nécessite plusieurs paquets pour l'envoi.
- **Mise à jour incrémentale** : Un paquet contenant les changements depuis la dernière mise à jour complète est envoyé, cette opération ne nécessite qu'un seul paquet.

Une table additionnelle est maintenue par chaque nœud pour la sauvegarde des mises à jour incrémentales.

#### 2.4.1.2 Protocole OLSR (Optimized Link State Routing)

Clausen et Jacquet [12]. ont Proposé OLSR qu'est un protocole proactif à état de lien optimisé. L'idée principale du protocole OLSR est de minimiser le nombre de retransmissions lors de la diffusion des paquets de contrôle. OLSR définit deux types

de messages : «Hello »et «TC : Topology Control ». Les messages HELLO sont diffusés périodiquement et contiennent des informations sur le voisinage du nœud à un saut et à deux sauts. Pour minimiser le trafic généré par les retransmissions dupliquées dans la même région, OLSR propose l'utilisation des MPRs. Chaque nœud dans le réseau sélectionne, pour la retransmission de ses paquets, un ensemble de nœuds parmi ses voisins à un saut qui peuvent atteindre tous les voisins à deux sauts. Cet ensemble est appelé MPR (Multi Point Relays). Les messages TC sont diffusés périodiquement et contiennent l'ensemble des nœuds l'ayant choisi comme MPRs. Ces messages TC sont diffusés vers tout le réseau. Après la réception de certains messages TC, un nœud connaîtra les informations sur la topologie du réseau. Ensuite, il calcule les routes vers tout autre nœud dans le réseau.

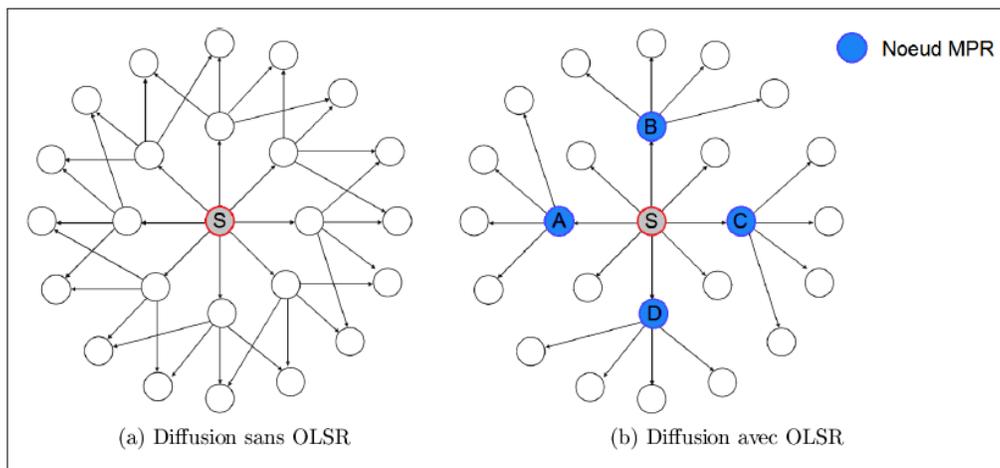


FIGURE 2.2 – Protocole OLSR [4].

### 2.4.1.3 Protocole STAR (Source-Tree Adaptive Routing)

Garcia-Luna-Aceves et Spohn [16].ont Proposé le protocole STAR qu'est également basé sur l'algorithme de l'état des liens. Chaque nœuds routeur conserve l'arborescence source, qui est un ensemble de liens contenant les meilleures chemins vers les destinations. Ce protocole a réduit de manière significative la quantité de surcharge de routage disséminée dans le réseau en utilisant une approche de routage par

moindre surcharge (LORA), pour échanger des informations de routage. L'approche de routage optimal (ORA) obtient le chemin le plus court vers la destination tandis que LORA minimise le sur débit de paquet, où chaque nœud maintient un arbre source qui contient des liens préférés vers toutes les destinations possibles. Les arborescences source voisines échangent des informations pour maintenir des tables à jour. Les routes sont conservées dans une table de routage contenant des entrées pour le nœud de destination et le voisin de saut suivant. Les messages de mise à jour de l'état des liens sont utilisés pour mettre à jour les modifications des routes dans les arbres sources.

#### 2.4.1.4 Protocole GSR (Global State Routing)

Chen et Gerla [11]. Proposer le protocole GSR, où la taille du paquet de contrôle est ajustée (adaptée) pour optimiser le débit MAC. Chaque nœud gère la liste des voisins et trois tables de routage contenant respectivement la topologie, le saut suivant et la distance. La liste des voisins contient tous les voisins du nœud actuel. La table de topologie contient les informations d'état de liaison et un horodatage indiquant l'heure à laquelle les informations d'état de liaison sont générées. La table de saut suivante contient une liste de voisins de saut suivant pour transmettre les paquets tandis que la table de distances conserve la distance la plus courte vers et depuis le nœud vers diverses destinations. Comme dans la méthode à état des liens chaque nœud dans GSR construit sa table de topologie basé sur les informations de liens reçus, et l'utilise pour calculer les distances minimales qui le séparent des autres nœuds du réseau. Dans GSR la table de topologie entière de chaque nœud est échangé périodiquement uniquement avec les voisins au lieu de la diffusé par inondation dans tout le réseau. GSR réduit la charge des paquets de contrôle en évitant l'inondation et assure plus de précision, concernant les données de routage. Le problème de GSR est la taille de ses paquets de mise à jour (Table de topologie) qui peut devenir considérable si le réseau contient un grand nombre de nœuds.

## 2.4.2 Protocole réactifs On-demand

Le routage initié à la source représente une classe de protocole de routage où la route est créée uniquement lorsque la source demande un itinéraire vers la destination. L'itinéraire est créé à l'aide d'une procédure de découverte d'itinéraire qui implique une inondation du réseau avec les paquets de demande de route qui commencent par les voisins immédiats de la source. Une fois que l'itinéraire est formé ou que plusieurs itinéraires qui mènent vers la destination sont obtenus, le processus de découverte des routes se termine.

De nombreux protocoles réactifs existent. Nous allons présenter les suivants :

### 2.4.2.1 Protocole AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector)

Perkins, Belding-Royer et Das [35]. ont proposé le protocole AODV, est présenté comme une amélioration de DSDV. Il réduit le nombre de diffusions de messages, et cela, en créant les routes lors du besoin, contrairement au DSDV, qui maintient la totalité des routes. Le protocole AODV [35] appartient à la famille des protocoles à la demande, il est basé sur deux mécanismes, la découverte de route et la maintenance de route. La découverte de route permet de trouver une route pour atteindre une destination et cela en inondant le réseau par des paquets de requête dans tout le réseau. La maintenance de route permet de détecter et signaler les coupures de routes provoquées éventuellement par la mobilité des nœuds. AODV n'utilise pas des mises à jour périodiques, les routes sont découvertes et maintenues selon les besoins. Chaque nœud intermédiaire qui se trouve dans la route entre un nœud source et un nœud destination doit garder une table de routage qui contient :

- L'adresse de la destination ;
- Le nœud suivant à utiliser pour atteindre la destination ;
- La distance en nombre de nœud : C'est le nombre de nœud nécessaire pour atteindre la destination ;
- Le numéro de séquence destination : Il permet de distinguer les nouvelles routes des anciennes ;

- Le temps d'expiration de l'entrée de la table : C'est le temps au bout duquel l'entrée est valide.

AODV utilise trois types de messages pour créer et maintenir les routes, le RREQ (Route Request) pour demander une route, le RREP (Route Reply) pour répondre à une requête de demande de route, et le RERR (Route Error) pour signaler une coupure de route. Le protocole AODV ne présente pas de boucle de routage, en outre il évite le problème de comptage à l'infini de l'algorithme de Bellman-Ford, ce qui offre une convergence rapide quand la topologie du réseau Ad hoc change.

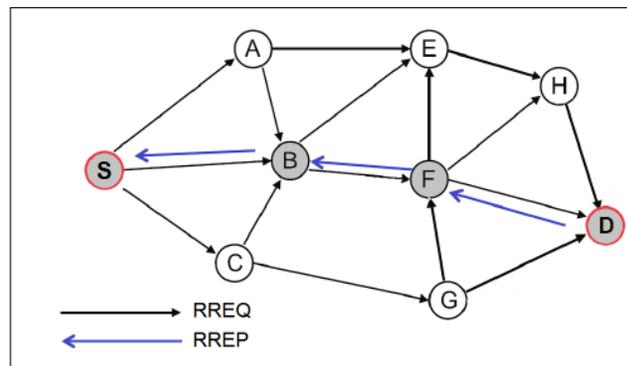


FIGURE 2.3 – Protocole AODV [24].

#### 2.4.2.2 Protocole DSR (Dynamic Source Routing)

Johnson et al [25]. ont Proposé l'un des algorithmes de routage les plus connus, appelé DSR, qui est un algorithme “à la demande” c'est-à-dire que la source des données détermine le chemin complet par lequel les données vont transiter et ce dernier sera transmis avec les données. Dans chaque paquet transmis, il y a un champ qui contient la séquence de nœuds à suivre pour atteindre la destination. Le protocole DSR repose sur deux mécanismes :

- Un mécanisme de découverte de route dont la source inonde le réseau par une requête RREQ. Au passage de paquet, chaque nœud insert un identificateur qui le désigne. Si l'opération de découverte est réussite, l'initiateur (la source) reçoit un paquet réponse de route RREP qui liste la séquence de nœuds à

travers lesquels la destination peut être atteinte. Le paquet requête de route contient donc un champ enregistrement de route, dans lequel sera accumulée la séquence des nœuds visités durant la propagation de la requête dans le réseau. Afin d'éviter la duplication de route, un identifiant unique par requête est mis en place. Il est constitué du couple : <adresse de l'initiateur, identificateur de requête>. Ainsi, si un nœud reçoit deux fois le même couple qui sera ignoré. La destination reçoit plusieurs requêtes RREQ mais effectue le choix de route le plus approprié.

- Un mécanisme de maintenance de route est nécessaire afin d'assurer la validité des liens. Si la défaillance d'un lien est indiquée par un nœud, un message erreur de route (route error) est envoyé à la source du paquet. Alors, le nœud est supprimé de l'enregistrement de route et l'ensemble des routes possédant ce nœud sont tronqués en ce point. Puis une procédure de réinitialisation de la recherche de destination est lancée.

DSR offre donc un routage qui se base sur la mémorisation des routes dans les paquets et qui assure l'absence de boucle de routage.

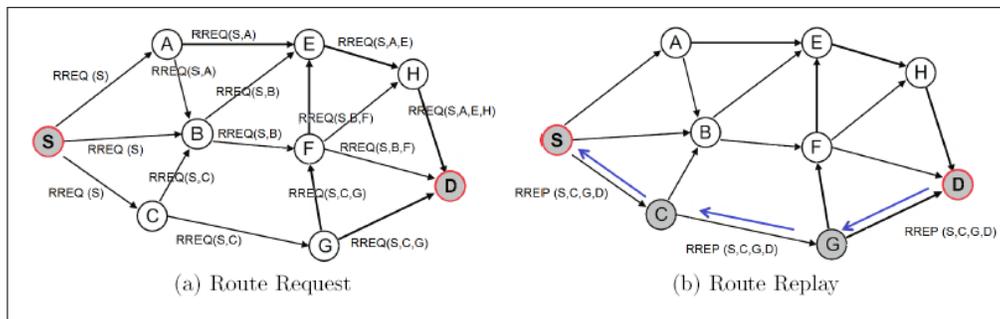


FIGURE 2.4 – Protocole DSR [4].

### 2.4.2.3 Protocole TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm)

L'algorithme de routage à commande temporaire (TORA) a été développé par Park et Corson [21]. L'algorithme TORA est un algorithme de routage distribué hautement adaptatif, sans boucle, basé sur le concept d'inversion de lien. Il utilise

des graphes acycliques dirigés (DAG) pour définir les routes en amont ou en aval. Ce graphique permet à TORA de fournir une meilleure aide à l'acheminement pour les réseaux à forte densité de population de nœuds. Cependant, pour fournir cette fonctionnalité, TORA a besoin d'une synchronisation des nœuds qui limite l'application du protocole. TORA est un protocole assez compliqué mais ce qui le rend unique et sa caractéristique principale est la propagation de messages de contrôle uniquement autour du point de défaillance lorsqu'une défaillance de liaison se produit.

Comme comparaison, tous les autres protocoles doivent réinitialiser une découverte d'itinéraire en cas d'échec d'une liaison, mais TORA serait en mesure de se corriger autour du point de défaillance. Cette fonctionnalité permet à TORA d'évoluer pour réseaux à grande échelle mais plus élevés pour les réseaux plus petits. TORA implique quatre fonctions principales : créer, maintenir, effacer et optimiser les routes. Comme chaque nœud doit avoir une hauteur, tout nœud qui n'a pas de hauteur est considéré comme un nœud effacé et sa hauteur est considérée comme nulle. Parfois, les nœuds reçoivent de nouvelles hauteurs pour améliorer la structure de liaison. Cette fonction est appelée optimisation des routes.

#### 2.4.2.4 Protocole ARA (Ant-colony based Routing Algorithms)

Gunes et al [19]. ont présenté une nouvelle technique de routage Ad hoc en utilisant des concepts d'intelligence de la méta-heuristique de la colonie de fourmi. Cette classe d'algorithmes vise à résoudre les problèmes d'optimisation et de collaboration complexes sans communication directe entre les participants. La communication indirecte est réalisée par la fourmi le processus consiste à laisser des traces dans l'environnement, similaire au comportement des fourmis qui déposent les signaux de phéromone. La découverte d'itinéraire est effectuée en inondant le réseau par une fourmi de l'avant (forward ant) vers la destination, similaire à la demande d'itinéraire en AODV.

Les paquets en double sont identifiés par l'utilisation d'un numéro de séquence et sont supprimés par le système. Lorsqu'une route est trouvée vers la destination, une ant en arrière (backward ant) est créée, similaire à Route Reply dans AODV. La fourmi backward suit le chemin avec le temps de voyage le plus court détecté par la

fourmi de l'avant. La quantité de phéromone déposée par les deux fourmis est une fonction de la longueur de la route associée à la phéromone. La phase de maintenance de la route est responsable de la mise à jour de l'information de routage pendant la communication. L'algorithme met à jour le chemin vers l'avant et vers l'arrière avec une quantité égale de phéromone. L'ARA permet également l'évaporation des phéromones .

ARA réalise des chemins sans boucle en utilisant des numéros de séquence. Si un nœud reçoit un paquet en double, il définit l'indicateur DUPLICATE ERROR et renvoie le paquet au nœud précédent, et supprime le lien.

#### 2.4.2.5 Protocole ABR (Associativity-Based Routing)

Toh [13]. Propose l'algorithme ABR qui considère la stabilité de la route comme le facteur le plus important dans la sélection d'un itinéraire. Les routes sont découvertes en diffusant un paquet de requête. En utilisant ces paquets, la destination prend conscience de toutes les routes possibles entre lui et la source.

L'algorithme ABR maintient un "degré d'associativité", en utilisant un mécanisme appelé " ticks d'associativité ". Chaque nœud maintient une valeur de tique pour chaque voisin, augmenté par un à chaque fois qu'un message périodique de la couche de liaison HELLO est reçu du voisin.

La route est stable une fois que la valeur de la tique atteint une valeur seuil spécifiée. Si le voisin sort de la zone, la valeur de la tique est remise à zéro. D'où un niveau de tique au-dessus de la valeur de seuil est un indicateur d'une association plutôt stable entre ces deux nœuds. Une fois qu'une destination a reçu la requête de paquet de diffusion , il doit décider quel chemin sélectionner par la vérification de l'associativité des tiques.

La route avec le plus haut degré d'associativité est choisie puisqu'il est considéré comme le plus stable des routes disponibles.

### 2.4.3 Protocoles Hybrides

Les protocoles hybrides essaient de combiner les deux approches précédentes pour bénéficier de leurs avantages, ils utilisent la notion de Table-driven, pour connaître les voisins les plus proches, dans le but de réduire le délai et l'approche On-demand au-delà de cette zone dans le but de réduire la charge des paquets de contrôle. De nombreux protocoles hybrides existent. Nous allons présenter les suivants :

#### 2.4.3.1 Protocole ZRP (Zone Routing Protocol)

Haas et Pearlman [22]. ont Proposé un protocole de routage par zone, ZRP est un protocole de routage hybride pour les réseaux mobiles Ad hoc qui organisent les nœuds en sous-réseaux (zones). Il intègre les mérites des protocoles de routage proactifs et ceux à la demande. Dans chaque zone, le routage proactif est adapté pour accélérer la communication entre voisins. La communication inter-zone utilise un routage à la demande pour réduire les communications inutiles. Le réseau est divisé en zones de routage en fonction des distances entre les nœuds mobiles. Compte tenu d'une distance d'un saut  $D$  et d'un nœud  $N$ , tous les nœuds à l'intérieur de la distance de saut au plus  $D$  de  $N$  appartiennent à la zone de routage de  $N$ . Les nœuds périphériques de  $N$  sont les nœuds voisins de  $N$  dans sa zone de routage qui sont exactement  $D$  nœuds de  $N$ . Un problème important du routage de zone est de déterminer la taille de la zone. Un protocole de routage de zone amélioré, IZR (Independent Zone Routing), qui permet la reconfiguration adaptative et distribuée de la taille optimisée de la zone, est présenté dans [37]. En outre, la nature adaptative de l'IZR améliore l'évolutivité du réseau Ad hoc. Chaque nœud a périodiquement besoin de mettre à jour les informations de routage à l'intérieur de la zone. De plus, une optimisation de route locale est effectuée sur chaque nœud, qui comprend les actions suivantes : suppression des routes redondantes, raccourcissement des routes, détection des défaillances de liaison.

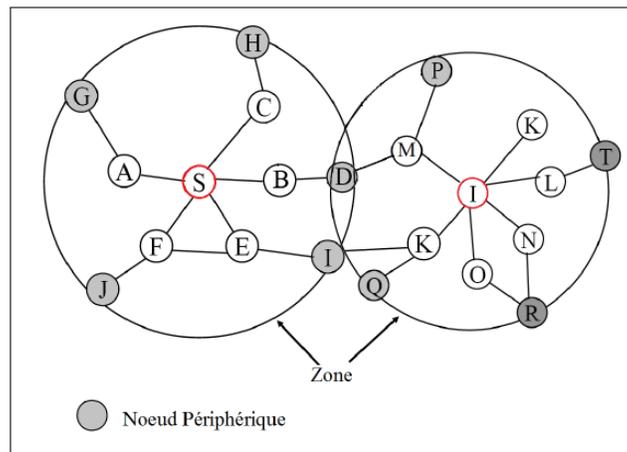


FIGURE 2.5 – Protocole ZRP [7].

### 2.4.3.2 Protocole FSR (Fisheye State Routing)

Pei et al [33]. ont Proposé le Protocole FSR qui s'inspire du l'œil de poisson (Fisheye), est un protocole Table-diriven, il minimise la charge des paquets de mise à jour des tables de routage du protocole GSR en utilisant la technique de l'œil de poisson. Les paquets de mise à jour dans FSR, ne contiennent pas l'information sur tous les nœuds du réseau, il échange les informations sur les nœuds les plus proches plus fréquemment qu'il le fait sur les nœuds les plus lointains, il réduit ainsi la taille des paquets de mise à jour. Un nœud dans FSR a donc des informations précises sur les nœuds proches, la précision des informations diminue quand la distance augmente. Malgré qu'un nœud dans le réseau n'as pas des informations précises sur les nœuds éloignés (surtout si le réseau est très dynamique), les paquets peuvent être transmis correctement car l'information sur les routes devient de plus en plus précise quand les paquets se rapprochent de leurs destinations.

## 2.5 Tableau comparatif

Une tableau comparatif des protocoles de sélection analysées précédemment.

Protocoles	Proactive		Réactive			Hybrid	
Paramètres	DSDV [34]	OLSR [12]	AODV [35]	DSR [25]	TORA [21]	ZRP [22]	FSR [33]
Route sans cycle	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui
Mise à jour des routes	Périodique	Périodique	Non périodique	Non périodique	Frais généraux élevée	Utilise dans chaque zone	Utilise dans chaque zone
Métrique de route	Court chemin	Court chemin	Le plus récent itinéraire et le plus court chemin	court chemin ou prochain disponible	court chemin ou prochain disponible	Court chemin	Court chemin
Disponibilité de la route	Toujours disponible	Toujours disponible	Calculé selon le besoin	Calculé selon le besoin	Calculé selon le besoin	Dépend de l'emplacement de la destination	Dépend de l'emplacement de la destination
Multi route	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Non
Multi caste	Non	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non
Débit	Faible	Moyen	Haut	Faible	Faible	Moyen	Moyen
Délai	Faible	Faible	Haut	Haut	Haut	Faible pour les destinations locales et élevé pour Interzone	Faible pour les destinations locales et élevé pour Interzone
Diffusion périodique	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui
Contrôle de trafic	Haut	Haut	Faible	Faible	Faible	Abaisser les deux autres types	Abaisser les deux autres types
Conservation d'énergie	Non	Oui	Non	Non	Non	Non	Non
Frais généraux de la communication	Faible	Haut	Haut	Haut	Haut	Moyen	Faible
Information de routage	Garder stocké dans la table	Garder stocké dans la table	N'est pas stocké	N'est pas stocké	N'est pas stocké	Dépend de l'exigence	Dépend de l'exigence
Sécurité	Non	Non	Oui	Non	Non	Non	Non
Évolutivité	> 100 nœuds		> 100 nœuds			> 1000 nœuds	

TABLE 2.1 – Tableau comparatif des différents protocoles de routage Ad hoc

## 2.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une classification des protocoles de routage pour les réseaux Ad hoc. Ces protocoles peuvent se classer en trois grandes catégories : les protocoles proactifs, les protocoles réactifs et les protocoles hybrides qui essaient de combiner les deux approches précédentes pour avoir de meilleures performances. Dans le chapitre suivant nous allons présenter une nouvelle approche basée sur la gestion d'énergie.

## Proposition d'une nouvelle approche

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons une nouvelle approche pour la recherche des routes dans les réseaux Ad hoc basée sur un mécanisme de gestion d'énergie. Notre objectif est de maximiser la durée de vie du réseau.

Nous avons introduit quelques hypothèses logiques :

- Une architecture réseau s'appuie sur un graphe orientée (source, nœuds intermédiaires, destination).
- La fiabilité des données, la consommation d'énergie et la disponibilité correspondent aux paramètres à prendre en considération dans notre approche.
- Les nœuds sont aléatoirement et densément déployés.
- Le nombre de nœuds et les paramètres sont générés aléatoirement.
- Le calcul du score se fait par la moyenne des paramètres.
- Le plus court chemin est déterminé sur la base du meilleur score.
- La construction des tables de routage se fait par les "Hello" messages conformément aux méthodes "Table-driven".
- La mise à jour ne se fait que si il ya un impact sur la route dans la table.

## 3.2 Spécifications des paramètres de notre approche

Pour chaque nœud  $n_i$ , on définit la liste des paramètres  $P_i : 0 \leq P_i \leq 1$ .

Les attributs de notre approche correspondent à des paramètres et des métriques observables, déductibles ou calculables comme : le temps de transmission, l'énergie, la disponibilité,...etc. La définition exacte et le processus de mesure, le calcul ou inférence correspondant à chaque paramètre va être préalablement bien définie.

Notre approche distingue deux types de paramètres : les paramètres à minimiser ( $MinP$ ) et les paramètres à maximiser ( $MaxP$ ).

### 3.2.1 La liste des paramètres à minimiser ( $MinP$ )

Les paramètres à minimiser ( $MinP$ ) sont le niveau d'énergie consommée ( $P_1$ ) et le temps de transmission ( $P_2$ ). Pour nous travailler que sur le problème de maximisation, nous avons transformé ces paramètres. Tell que :

$$P_1(n_i) = NEngC_t(n_i) = 1 - Q_1(n_i). \quad (3.1)$$

$$P_2(n_i) = Ttrans_t(n_i) = 1 - Q_2(n_i). \quad (3.2)$$

Où

$Q_1(n_i)$  et  $Q_2(n_i)$  en utilisant dans les formules 3.3 et 3.4 ci-dessous :

1. **Le niveau d'énergie consommée ( $NEngC$ )** : ce paramètre indique le niveau d'énergie consommée par un nœud mobile est due essentiellement aux opérations suivantes : la sécurité, le traitement et la communication de données. Le niveau d'énergie consommé  $NEngC_t(n_i)$  est calculé en utilisant la formule suivante à l'instant  $t$  :

$$P_1(n_i) = NEngC_t(n_i) = 1 - Q_1(n_i), \quad Q_1(n_i) = \frac{Energie\ Consome_t(n_i)}{Energie\ Initiale(n_i)}. \quad (3.3)$$

Tellque

*Energie Consome<sub>t</sub>(n<sub>i</sub>)* : est l'énergie consommée par un nœud  $n_i$  à l'instant  $t$ .

*Energie Initiale* : est l'énergie initiale du nœud  $n_i$ .

2. **Le temps de transmission ( $Ttrans$ )** : ce paramètre est considéré comme étant le temps nécessaire à un paquet de données pour passer d'un nœud  $n_i$  vers un nœud  $n_j$ .

La formule suivante permet le calcul du temps de transmission  $Ttrans(n_i)$  à l'instant  $t$  :

$$P_2(n_i) = Ttrans_t(n_i) = 1 - Q_2(n_i) , \quad Q_2(n_i) = \frac{T(n_i, n_j)}{TTL}. \quad (3.4)$$

Tell que :

- $T(n_i, n_j)$  :le temps de transmission d'un message entre un nœud  $n_i$  et son voisin  $n_j$  à l'instant  $t - 1$ .
- TTL(Time To Live) : le temps maximum pour la transmission entre le nœud ( $n_i$ ) et ( $n_j$ ).

### 3.2.2 La liste des paramètres à maximiser ( $MaxP$ )

Contrairement aux paramètres à minimiser, les paramètres à maximiser changent en fonction du contexte d'utilisation. Par exemple, la disponibilité d'un nœud peut dépendre de son niveau énergétique courant.

Dans ce qui suit, nous considérons quatre paramètres à maximiser : la disponibilité ( $Dispo$ ), la fiabilité ( $Fiab$ ), le niveau de sécurité ( $NSecu$ ) et la portée ( $Porte$ ).

1. **La disponibilité [17] ( $Dispo$ )** : Un nœud peut être disponible ou indisponible, et cela peut être engendrée par plusieurs raisons, à savoir : des pannes du réseau, l'échec d'un nœud, isolement, obstacle,...etc.

La formule suivante permet de déterminer la disponibilité  $Dispo(n_i)$  :

$$P_3(n_i) = Dispo(n_i) = \begin{cases} 1 & \text{si le noeud } n_i \text{ est disponible} \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (3.5)$$

2. **La fiabilité (*Fiab*)** : les réseaux Ad hoc sont souvent utilisés comme solution dans des situations de secours lorsque l'utilisation d'une infrastructure fixe est impossible. Le routage doit être fiable et des procédures de secours peuvent être exigées. Par exemple, si une table de routage est saturée en raison de la capacité de mémoire limitée, un protocole réactif devrait toujours pouvoir trouver une route de secours pour une destination donnée.

La formule suivante permet le calcul de la fiabilité  $Fiab(n_i)$  à l'instant  $t$  :

$$P_4(ni) = Fiab_t(n_i) = \frac{Nbre\ MSGs\ transmis\ avec\ succes_{(t-1)}(n_i)}{Nbre\ Totale\ MSGs_{(t-1)}}. \quad (3.6)$$

Tell que :

- $Nbre\ MSGs\ transmis\ avec\ succes_{(t-1)}(n_i)$  : le nombre des messages transmis à l'instant  $t$  avec succès par le nœud  $(n_i)$ .
  - $Nbre\ Totale\ MSGs_{(t-1)}$  : le nombre de messages totale.
3. **Le niveau de sécurité (*NSecu*)** : Un nœud est sécurisé s'il active son IDS (Intrusion Détection System). Il s'agit d'un système permettant de surveiller l'activité d'un nœud, afin de détecter toute tentative d'intrusion et éventuellement de réagir à cette tentative. Le niveau de sécurité  $NSecu(n_i)$  est déterminé en utilisant la formule suivante :

$$P_5 = NSecu(n_i) = \begin{cases} 1 & \text{si le noeud } (n_i) \text{ a active son IDS} \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (3.7)$$

4. **La portée (*Porte*)** : La portée  $Porte_{(n_i, n_j)}$  de nœud  $n_i$  est modélisée de la façon suivante :

$$P_6 = Porte_{(n_i, n_j)} = \begin{cases} 1 & \text{si } d(n_i, n_j) \leq R(n_i) \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (3.8)$$

Tell que :

- $d(n_i, n_j)$  : représente la distance euclidienne entre les nœuds  $n_i$  et  $n_j$ .
- $R(n_i)$  : le rayon de transmission.

### 3.3 Définition du score

- **Le score (*Score*)** : Pour prendre en considération tous les paramètres définis dans les sections précédentes, nous avons introduit la notion du score. Il correspond à la moyenne des paramètres pondérés par des coefficients.
- **Les coefficients  $C_i$**  : sont des relatif au paramètres, compris entre 1 et 5 selon le degré d'importance (du moins important au plus important). Dans le cas où aucune coefficient  $C_i$  ni fournie par l'utilisateur, nous considérons les coefficients  $C_i$  par défaut comme suit :  $C_i = 1 \quad \forall i$ .

$$Score(n_i) = \frac{\sum_{i=1}^{NbParametres} C_i \times P_i(n_j)}{\sum_{i=1}^{NbParametres} C_i} \quad (3.9)$$

Tell que :

- Les paramètres  $P_i(n_j)$  correspond au paramètres du noeud  $n_j$ .

Donc :

$$Score(n_i) = Dispo(n_j) \times \frac{NEngC_t(n_j) \times (C_1) + Fiab_t(n_j) \times (C_2) + Ttrans_t(n_j) \times (C_3) + NSecu((n_j)) \times (C_4)}{\sum_{i=1}^{NbParametres} C_i} \quad (3.10)$$

### 3.4 Durée de vie du réseau

Plusieurs définitions coexistent dans la littérature. Une définition présentée dans [30] dit qu'un réseau Ad hoc devient inutilisable lorsque la connectivité entre les nœuds est perdue. Dans [9] les auteurs définissent la durée de vie du réseau comme le temps cumulé du réseau, jusqu'à la disparition de tous les nœuds. Dans [30], les auteurs définissent la durée de vie du réseau par la durée du premier nœud à tomber en panne à cause d'une perte d'énergie ou un autre problème.

### 3.5 La mobilité

La mobilité des nœuds dans les réseaux Ad hoc a un grand effet sur leurs performances. Les protocoles de routage employés dans ce type des réseaux doivent prendre en considération le facteur de mobilité afin de garantir la continuité des communications et d'assurer la reprise lors d'une déconnexion tout en conservant le plus possible l'énergie [30].

### 3.6 La stabilité

Dans les réseaux Ad hoc, il est important de préserver une route tant qu'elle est fonctionnelle. Cela évite des mises à jour trop fréquentes et réduit considérablement les messages nécessaires à la construction des routes de secours. La stabilité d'un lien est la possibilité de garder ce lien plus longtemps possible.

### 3.7 Recherche du plus court chemin

Un problème de plus court chemin est un problème algorithmique de la théorie des graphes. L'objectif est de calculer un chemin entre des nœuds d'un graphe qui minimise ou maximise une certaine fonction.

Il existe de nombreuses variantes de ce problème. On suppose un graphe fini, orienté ou non selon les cas ; de plus, chaque arc ou arête possède une valeur qui peut être un poids ou une longueur. Un chemin le plus court entre deux nœuds donnés est un chemin qui minimise la somme des valeurs des arcs traversés. Pour calculer un plus court chemin, il existe de nombreux algorithmes, selon la nature des valeurs et d'éventuelles contraintes supplémentaires. L'algorithme de Bellman-Ford, aussi appelé algorithme de Bellman-Ford-Moore[8], est un algorithme qui calcule des plus courts chemins depuis un nœud source donné dans un graphe orienté pondéré.

#### 1. Définition de l'algorithme Dijkstra

L'algorithme de Dijkstra [14] est l'un des meilleurs algorithmes pour le calcul

du plus court chemin dans un graphe orienté où les poids sont positifs.

La complexité temporelle de l'algorithme de Dijkstra sous cette forme simple est  $O(n^2)$ . En effet, à chaque étape, on transfère un nœud de  $\bar{S}$  vers  $S$ , ce qui nous fait  $n$  itérations. A l'intérieur de chaque itération, on recherche le nœud de  $\bar{S}$  qui possède la plus petite distance temporaire, opération en  $O(n)$  dans le pire des cas.

La procédure complète de plus court chemin en utilisant l'algorithme de Dijkstra à notre métrique score.

---

**Algorithm 1** Dijkstra\_Score
 

---

```

1: Procédure Dijkstra_Score (G, depart, arrivee);
2:  $nœud\_visites \leftarrow \emptyset$ ;
3: pour chaque nœud  $n$  de  $G$  faire
4:  $score\_max \leftarrow 0$ ;
5: fin pour
6:  $score\_max[depart] \leftarrow 1$ ;
7: Tantque  $nœuds\_visites$  ne contient pas tous les nœuds de  $G$  faire
8:  $nœud\_courant \leftarrow$  nœud non visité de  $score\_max$ ;
9:  $nœud\_visites \leftarrow nœud\_visites \cup nœud\_courant$ ;
10: si  $nœud\_courant = arrivee$  alors
11: quitter boucle
12: fin si
13: pour chaque arc sortant ( $extrimite\_terminal, score\_de\_successeur$ ) de
    nœud_courant faire
14:  $score \leftarrow score\_max[nœud\_courant] + score\_de\_successeur$ ;
15: si  $score > score\_max[extrimite\_terminal]$  alors
16:  $score\_max[extrimite\_terminal] \leftarrow score$ ;
17: fin si
18: fin pour
19: fin tant que
20: retourner  $score\_max[arrivee]$ ;
21: fin procédure.
```

---

La figure suivante 3.1 montre un exemple de graphe orientée de simulation de la méthode de Dijkstra\_Score qui comprend 45 *nœuds mobiles*, fait apparaître le plus court chemin entre le *nœud source*  $N0$  jusqu'au *nœud destinataire*  $N10$  est :  $(N0 \rightarrow N1 \rightarrow N2 \rightarrow N3 \rightarrow N4 \rightarrow N5 \rightarrow N6 \rightarrow N7 \rightarrow N10)$  indiqué par les cercles vert.

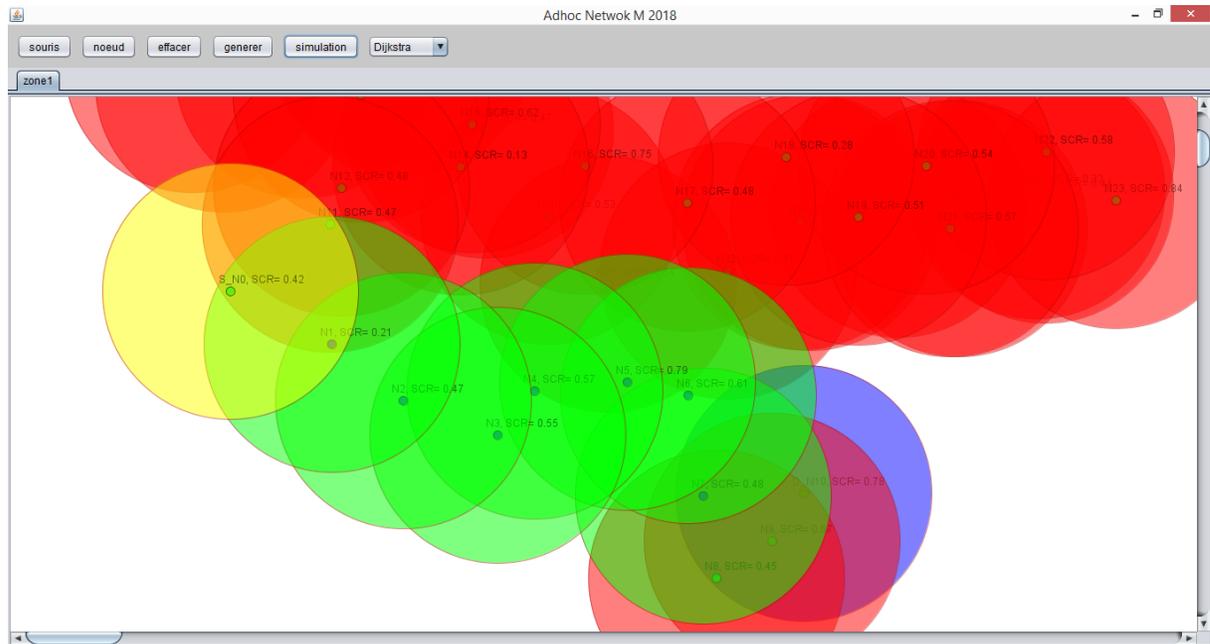


FIGURE 3.1 – Exemple de la découverte de chemin entre la source et la destination.

Pour valider notre approche nous avons appliqué l'algorithme Dijkstra sous sa forme standard sur notre réseau en utilisant la matrice des distances Euclidiennes.

L'algorithme de Dijkstra\_distance permet de trouver le chemin de distance minimale entre les nœuds.

La procédure complète de plus court chemin (Dijkstra\_distance) est réalisée à l'aide de l'algorithme suivant :

---

**Algorithm 2** Dijkstra\_distance

---

```
1: Procédure Dijkstra_distance (G, départ, arrivée);
2:  $nœud\_visites \leftarrow \emptyset$ ;
3: pour chaque nœud  $n$  de  $G$  faire
4:  $distance\_min[n] \leftarrow +\infty$ ;
5: fin pour
6:  $distance\_min$  [départ]  $\leftarrow 0$ ;
7: Tantque  $nœuds\_visites$  ne contient pas tous les nœuds de  $G$  faire
8:  $nœud\_courant \leftarrow$  nœud non visité de distance minimale;
9:  $nœud\_visites \leftarrow nœud\_visites \cup nœud\_courant$ ;
10: si  $nœud\_courant = arrivée$  alors
11: quitter boucle
12: fin si
13: pour chaque arc sortant ( $successeur, longueur\_arc$ ) de  $nœud\_courant$  faire
14:  $distance \leftarrow distance\_min$  [ $nœud\_courant$ ] +  $longueur\_arc$ ;
15: si  $distance < distance\_min$  [ $successeur$ ] alors
16:  $distance\_min$  [ $successeur$ ]  $\leftarrow distance$ ;
17:  $predcesseur[successeur] \leftarrow nœuds\_courant$ ;
18: fin si
19: fin pour
20: fin tant que
21: fin procédure.
```

---

### 3.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une nouvelle approche pour le réseau Ad hoc. La découverte des routes est basée sur le mécanisme de gestion d'énergie, tout en garantissant la maximisation de la durée de vie du réseau.

Dans le chapitre suivant, nous présentons la mise en œuvre en simulation de notre approche et analysons ses performances.

# Implémentation et validation de l'approche proposée

## 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons dans la première partie les détails d'implémentation de l'approche proposée dans le chapitre précédent. Dans la seconde partie du chapitre, nous étudions une analyse comparative des performances de cette approche avec une approche existante.

## 4.2 Environnement de travail

L'environnement d'exécution est une machine *HP* dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Système d'exploitation : Windows 8.1 Professionnel.
- Type de système : 64 bits.
- Processeur : IntelCore<sup>tm</sup>i3-2330M CPU@2.20GHz 2.20GHz.
- RAM : 6.00 Go.
- Machine virtuelle java 1.7.

### 4.2.1 Présentation de langage de programmation JAVA

Java est à la fois un langage de programmation et un environnement d'exécution. Il a la particularité principale d'être portable sur plusieurs systèmes d'exploitation tels que Microsoft Windows, Mac OS ou Linux c'est la plateforme qui garantit la portabilité des applications. Ce langage reprend en grande partie la syntaxe du langage C++, très utilisé par les informaticiens. Néanmoins, Java a épurée des concepts les plus subtils du C++ et à la fois les plus déroutants, tels que l'héritage multiple remplacée par l'implémentation des interfaces. Java permet de développer des applications autonomes mais aussi, et surtout, des applications client/serveur. Il est doté en standard d'une riche bibliothèque de classes, comprenant la gestion des interfaces graphiques (fenêtres, boîtes de dialogue, contrôles, menus) [23].

Java fournit un grand nombre de frameworks et afin de permettre l'utilisation de Java pour des usages très diversifiés. On distingue essentiellement 4 grands frameworks :

Java SE Pour les applications pour poste de travail.

Java EE Pour les applications serveurs.

Java ME Pour les applications mobiles.

Java FX Pour les applications liées aux cartes à puces et autres SmartCards.

### 4.2.2 Eclipse IDE

Eclipse IDE est un environnement de développement intégré libre (le terme Eclipse désigne également le projet (Un projet est un engagement irréversible de résultat incertain, non reproductible a priori à l'identique, nécessitant le concours et l'intégration d'une grande diversité de...) correspondant, lancé par IBM) extensible, universel et polyvalent, permettant potentiellement de créer des projets de développement mettant en œuvre n'importe quel langage de programmation (Un langage de programmation est un langage informatique, permettant à un être humain d'écrire un code source qui sera analysé par une machine,...). Eclipse IDE est principalement écrit en Java (à l'aide de la bibliothèque graphique SWT, d'IBM),

et ce langage, grâce à des bibliothèques spécifiques, est également utilisé pour écrire des extensions[3].

## 4.3 Conception et implémentation

Nous avons choisi un environnement de développement JAVA dans lequel les nœuds sont homogènes et déployés aléatoirement. Nous avons considéré un réseau de densité varie de 100 jusqu'a 2600 *nœuds* déployés dans une surface rectangulaire de  $(16000 * 8000)m^2$ . La figure 4.2 montre la topologie de notre réseau. Notre simulateur utilise le modèle de mobilité Random Way Point [26] qu'est basé sur des paramètres de mobilité aléatoire.

### 4.3.1 Interface graphique

Dans cette section nous présentons quelques interfaces réalisées avec la bibliothèque swing[2] de java.

#### a) Fenêtre principale

Cette interface représente la fenêtre principale du simulateur, elle est conviviale, intuitive et simple à utiliser. Elle comporte plusieurs boutons tels que :

- **Bouton souris** : Permet de déplacer un nœud ou un groupe des nœuds.
- **Bouton nœud** : Permet de créer des nœuds.
- **Bouton effacer** : Permet d'effacer tous les nœuds du réseau.
- **Bouton générer** : Permet de générer aléatoirement le nombre des nœuds.
- **Bouton simulation** : Permet d'afficher les résultats dans la console.
- **Bouton Dijkstra** : Permet de lancée l'algorithme.

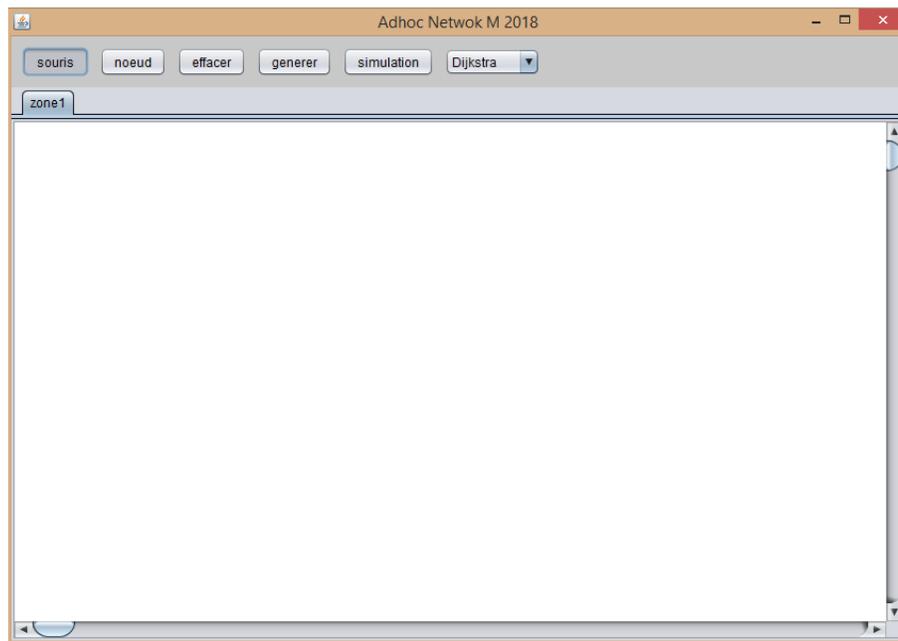


FIGURE 4.1 – Interface principale.

**b) Génération des nœuds**

Cette interface s'affiche lorsque l'utilisateur ouvre un scénario de simulation (Clique sur le bouton générer) telque :

- **La zone de couverture jaune** : Pour définir le nœud source avec son rayon de transmission.
- **La zone de couverture bleue** : Pour définir le nœud destination.
- **La zone de couverture rouge** : Pour définir les voisins et les nœuds intermédiaires.

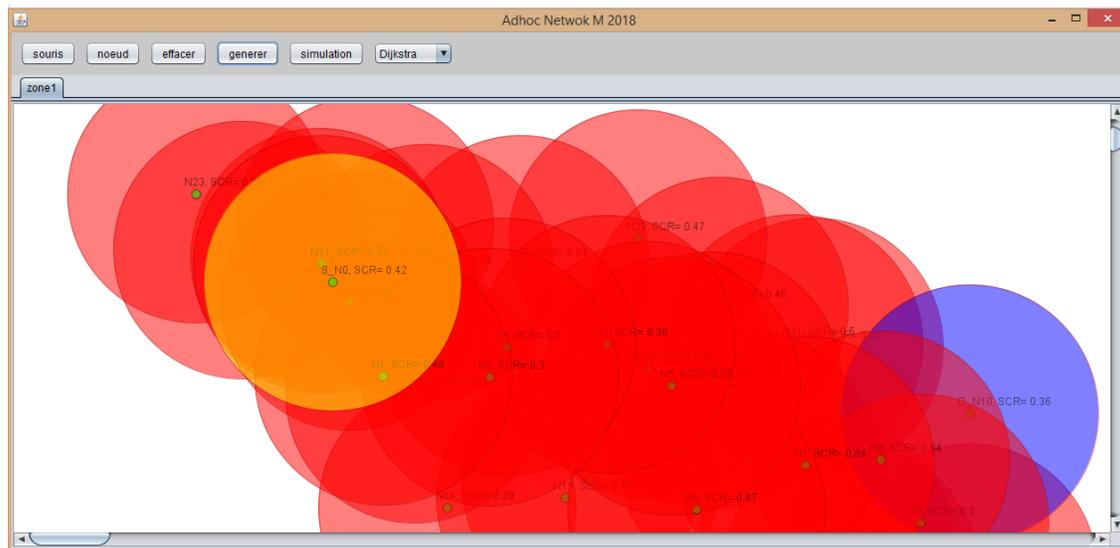


FIGURE 4.2 – Génération.

## 4.4 Evaluation des performances

L'évaluation de l'approche de Dijkstra.score consiste à calculer le nombre de nœuds composant le chemin le plus court. Pour ce faire, nous avons défini des scénarii de simulation selon plusieurs nœuds mobiles, chaque scénario se fait d'une manière aléatoire.

### 4.4.1 Résultat

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 4.1 et la figure 4.3.

Algorithmme	Dijkstra score	Dijkstra distance
Nombre de noeuds	Nombre de noeuds dans le chemin	
100	72	73
200	136	147
300	173	196
400	266	289
500	327	349
600	405	417
700	462	486
800	509	536
900	602	618
1000	658	686
1100	734	764
1200	809	837
1300	881	889
1600	968	1152
1700	1039	1076
1900	1090	1304
2000	1157	1366
2400	1424	1636
2500	1502	1719
2600	1518	1737

TABLE 4.1 – Comparaison des performances.

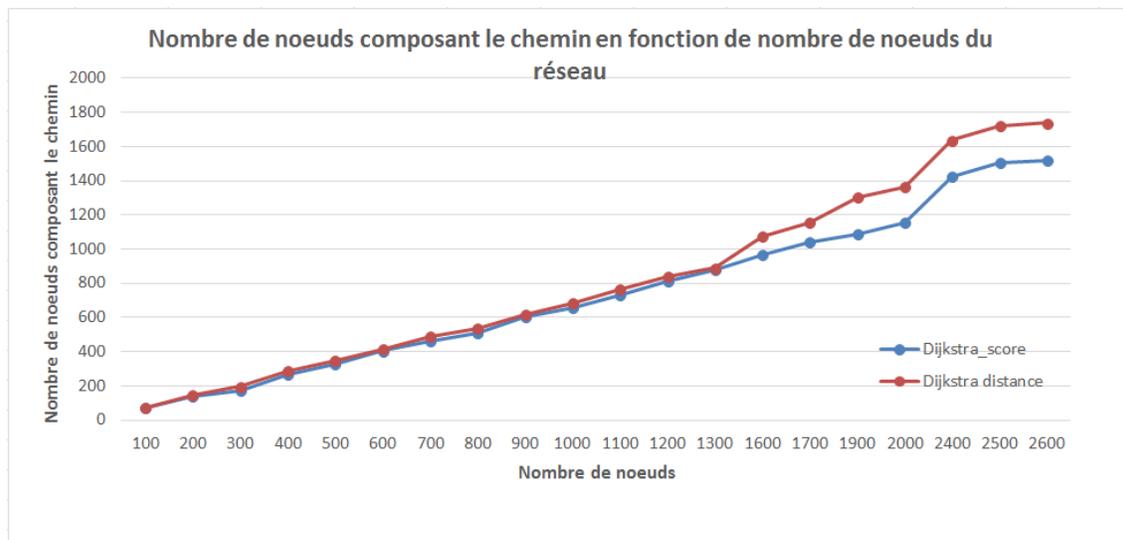


FIGURE 4.3 – Comparaison des performances dans le nombre de nœuds composant le chemin.

La figure 4.3 montre le nombre de nœuds composant le chemin en fonction du nombre de nœuds totale, dans l'approche de Dijkstra\_score et dans l'algorithme Dijkstra\_distance. Le nombre de nœuds est représenté sur l'axe des abscisses et le nombre de nœuds composant le chemin sur l'axe des ordonnées.

### 4.4.2 Comparaison

Pour montrer l'efficacité de l'approche de Dijkstra\_score, nous avons réalisé une étude comparative des résultats obtenus dans l'algorithme Dijkstra\_distance avec les résultats que nous avons obtenus. Pour ce faire, nous nous sommes placés dans les mêmes conditions de simulation en considérant le nombre de nœuds varie entre 100 et 2600. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 4.1 et la figure 4.3, les performances de l'approche de Dijkstra\_score en terme le nombre de nœuds composant le chemin sont largement supérieures à celles du l'algorithme Dijkstra\_distance. Ceci explique que quand nous sommes en présence de peu de nœuds, la majorité des algorithmes de routage converge. Par contre, dans le cas d'un graphe très dense, il est important de bien planifier l'utilisation des ressources. En effet, pour un réseau des 2600 nœuds, le nombre de nœuds composant le chemin est à égale à 1518 *nœud* (respectivement 1737 *nœud*) pour l'approche de Dijkstra\_score (respectivement pour l'algorithme Dijkstra\_distance). Ces résultats montrent l'efficacité de notre approche par rapport à celles de l'algorithme Dijkstra\_distance.

## 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'application ayant servi de support pour l'évaluation des performances de l'approche de Dijkstra\_score proposée. A travers la simulation effectuée, nous avons montré l'efficacité de notre approche par rapport au l'approche de l'algorithme Dijkstra\_distance d'où sa validation.

## Conclusion et perspective

A travers ce travail, nous avons approfondi nos connaissances sur les réseaux Ad hoc avec leurs différentes caractéristiques (absence d'infrastructure, topologie dynamique, bande passante limitées, sécurité physique limitée, contraintes d'énergie, ...Etc.), et on a constaté que malgré les avantages de ce type de réseau (à savoir la minimisation du cout d'installation, la rapidité de déploiement, réseau local mobile ...etc.), il reste un nombre important de problèmes à résoudre dont celui du routage. Pour cela, les algorithmes et les protocoles de communication pour les réseaux Ad hoc doivent optimiser l'énergie.

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés au problème du routage et de gestion de l'énergie dans les réseaux Ad hoc. Nous avons proposé une solution permettant d'offrir une meilleure prise en compte des ressources énergétiques du réseau. Nous avons présenté un état de l'art sur les réseaux Ad hoc et les principaux protocoles de routage.

Afin de proposer une nouvelle approche efficace en termes de conservation d'énergie, les routes sélectionnées doivent être les nœuds qui ont plus d'énergie.

Nous avons utilisé l'algorithme de Dijkstra pour créer un routage efficace en termes de plus court chemin et la durée de vie dans les réseaux Ad hoc.

Enfin, notre approche est validée à l'aide du simulateur sous JAVA. Les résultats des simulations ont bien illustré, pour les deux algorithmes, que l'approche proposée améliore sensiblement les performances du routage et garantissent un prolongement de la durée de vie du réseau.

Dans ce travail, nous avons considéré que les tables de routage sont déjà construit. Il sera intéressant de faire cette construction en utilisant les agents intelligents pour ne pas saturer la bande passante.

# Bibliographie

- [1] [http://www.memoireonline.com/05/12/5873/m\\_Etude-sur-les-protocoles-de-routage-dun-reseau-sans-fil-en-mode-Ad-Hoc.html](http://www.memoireonline.com/05/12/5873/m_Etude-sur-les-protocoles-de-routage-dun-reseau-sans-fil-en-mode-Ad-Hoc.html), (Consulté le 01 Janvier 2018).
- [2] <http://https://rmdiscala.developpez.com/cours/LesChapitres.html/Java/Cours2/Chap2.4.htm>, (Consulté le 8 Jun 2018).
- [3] <https://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=517>, (Consulté le 8 Mai 2018).
- [4] S. Ade and P.Tijare. Performance comparison of aodv, dsdv, olsr and dsr routing protocols in mobile ad hoc networks. *International Journal of Information Technology and Knowledge Management*, 2(2) :545–548, 2010.
- [5] N. Badache. *Cours sur les réseaux mobiles ad hoc et les protocoles de routages*. USTHB d’Alger, Livre, September 2011.
- [6] R. Bedouhene and M. Benmedour. Protocole de connexion des réseaux ad hoc à internet. Mémoire de fin d’études, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, 2004.
- [7] N. Beijar. Zone routing protocol (zrp). *Networking Laboratory, Helsinki University of Technology*, 2002.
- [8] R. Bellman. On a routing problem. *Quarterly of Applied Mathematics*, 16, 1958.
- [9] M. Bhadwaj and A. Chandrakasan. Bounding the lifetime of sensor networks via optimal role assignments. *IEEE*, In INFOCOM Hong Cong, Chaina, March 2004.

- [10] N. Boukhecham. Routage dans les réseaux mobiles ad hoc. Thèse de magister, Université de Constantine, 2008.
- [11] T. Chen and M. Gerla. Global state routing : a new routing scheme for ad-hoc wireless networks. *Proceedings of IEEE ICC*, 1 :171–175, June 1998.
- [12] T. Clausen and P. Jacquet. Optimized link state routing protocol (olsr). October 2003.
- [13] C.Toh. Associativity-based routing for ad-hoc mobile networks, special issue on mobile networking and computing systems. *Wireless Personal Communications Journal*, 4 (2) :103–139, 1997.
- [14] E.W. Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerishe Matematik*, pages 269–271, 1959.
- [15] M. Frikha. *Les réseau ad hoc : Routage qualité de service et optimisation*, volume 263. Lermes Science, Paris, lavoisier edition, 2010.
- [16] J. Garcia and C. Spohn. Source-tree routing in wireless networks. *Proceedings of the Seventh Annual International Conference on Network Protocols Toronto*, page 273, Canada, October 1999.
- [17] D. Gligor. A note on the denial-of-service problem. *In IEEE Symposium on Security and Privacy*, pages 139–149, 1983.
- [18] G.Malkin and F.Baker. *Cisco Systems*. Number RFC1724 in Inc. RIP Version 2 MIB Extension, xylogics edition, Livre, November 1994.
- [19] M. Gunes, U. Sorges, and I. Bouazizi. Ara : The ant-colony based routing algorithms for manets. *Proceedings of IEEE ICPP Workshop on Ad Hoc Networks (IWAHN)*, pages 79–85, August 2002.
- [20] A. Gupta, H. Sadawarti, and A. Verma. A review of routing protocols for mobile ad hoc networks, seas transactions on communications. 10(1109-2742) :331–340, November 2011.
- [21] A. Gupta, H. Sadawarti, and A. K. Verma. Performance analysis of aodv, dsr and tora routing protocols. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, 2, April 2010.

- 
- [22] Z. Haas and M. Pearlman. Zrp : A hybrid framework for routing in ad hoc networks. pages 221–253, 2001.
- [23] Holmes.D, Gosling.J, and K. Arnold. *Le langage Java*. O’Reilly, 2002.
- [24] I. Welch J. Mulert and W.Seah. security threats and solutions in manets : A case study using aodv and saodv. *Journal of Network and Computer Applications*, 35(4) :1249–1259, 2012.
- [25] D. Johnson, D. Maltz, and Y. Hu. The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks (dsr). *Internet-Draft*, 16 April 2003.
- [26] D.B. Johnson and D.A. Maltz. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. *Mobile Computing*, pages 153–181, 1996.
- [27] J. Jubin and J. Tornow. The darpa packet radio network protocols. *IEEE*, 1987.
- [28] K. Windt M. Hülsmann and Eds. Understanding autonomous cooperation and control in logistics the impact on management, information and communication and material flow. *Springer*, 2007.
- [29] Ba. Mandicou. Vers une structuration auto-stabilisante ad hoc : Cas des réseaux de capteurs sans fil. Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne Ardenne, Laboratoire CReSTIC, France, May 2014.
- [30] V. Mhatre, C. Rosenberg, D. Kofman, R. Mazumdar, and N.Shroff. Design of surveillance sensor grids with a lifetime constraint. *In European Workshop on Wireless Sensor Networks(EWSN)*, January 2004.
- [31] S. Nuon. Analyse de la disponibilité dans les réseaux ad hoc. 1 février 2006.
- [32] P. Papadimitratos and Z.Haas. Secure routing for mobile ad hoc networks, scs communication networks and distributed systems modeling and simulation conference. Janury 2002.
- [33] G. Pei, M. Gerla, and T. Chen. Fisheye state routing in mobile ad hoc networks. *Proceedings of IEEE ICDCS Workshop on Wireless Networks and Mobile Computing*, pages D71–D78, April 2000.
- [34] C. Perkins and P. Bhagwat. Dsdv : Highly dynamic destination-sequenced distance vector routing for mobile computers. pages 234–244, October 1994.

- 
- [35] C. Perkins and E. Royer. Ad hoc on-demand distance vector routing. *Proceedings of the Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, pages 99–100, 1999.
- [36] E. Royer and C. Toh. A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks.
- [37] P. Samar, M. R. Pearlman, and Z. J. Haas. Independent zone routing : An adaptive hybrid routing framework for ad hoc wireless networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 12 :595–608, 2004.
- [38] D. Tian and N. Georganas. Connectivity maintenance and coverage preservation in wireless sensor networks. *Ad hoc Networks Journal (Elsevier Science)*, pages 744–761, 2005.
- [39] Ta. Wysocki, A. Dadej, and B. Wysocki. Secure routing protocols for mobile ad-hoc wireless networks, in advanced wired and wireless networks. *Springer*, 2004.
- [40] M. Yassine. Routage dans les réseaux véhiculaires (vanet) cas d’un environnement type ville. Mémoire magister en génie électrique, Université M’Hamed Bougara-Boumerdes, 2011.
- [41] M. Zapata and N. Asokan. Securing ad hoc routing protocols. *WiSe’02, ACM 1-5813-585-8*, pages 1–10, 28 September 2002.

## RÉSUMÉ

Le but de ce mémoire est étudier les différents techniques de routages existant dans un contexte sans fil multi-saut afin d'obtenir de meilleures performances. Nous portons notre étude sur les protocoles de routages les plus connus afin de proposer dans une deuxième partie un nouveau protocole de routage permettant d'optimiser la consommation d'énergie dans les réseaux Ad hoc, en gardant une qualité de service optimales.

**Mots clés :** Réseaux Ad hoc, optimisation de l'énergie, Java, Protocole de routage

## ABSTRACT

The purpose of this thesis is to study the different routing techniques existing in a multi-hop wireless context in order to obtain better performances. We carry our study on the most well-known routing protocols in order to propose in a second part a new routing protocol allowing to optimize the energy consumption in ad hoc networks, while maintaining an optimal quality of service.

**Key words :** Ad Hoc Networks, Energy Optimization, Java, Routing Protocol