

# Minimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux ad hoc

Sidi-Mohammed SENOUCI\*, Guy PUJOLLE\*

## Résumé

*Un réseau ad hoc est une collection de terminaux mobiles interconnectés par une technologie sans fil formant un réseau temporaire sans aucune administration ou infrastructure fixe. Les atouts majeurs de cette nouvelle génération de réseaux mobiles sont la flexibilité et leur faible coût. L'un des objectifs majeurs pour ces réseaux consiste à ce que les terminaux mobiles soient utilisés au maximum « n'importe où et n'importe quand ». Cependant, l'une des grandes limitations de cet objectif concerne le support énergétique. En effet, la principale contrainte dans les communications sans fil est la durée de vie limitée des terminaux mobiles dont le support énergétique représente souvent une batterie dont la capacité est limitée. Cette contrainte est beaucoup plus importante dans les réseaux ad hoc, où les terminaux consomment leur propre énergie en routant des données pour d'autres terminaux. Ainsi, la consommation d'énergie devrait être une question cruciale lors de la conception de nouveaux protocoles de communication et plus spécialement les protocoles de routage ad hoc. Nous proposons, dans ce papier, des extensions de l'un des plus importants protocoles de routage actuels qui est AODV (Ad hoc On demand Distance Vector). Ces extensions prennent en compte une métrique basée sur la consommation d'énergie lors de découverte de route, permettant ainsi d'augmenter la durée de vie du réseau; c'est probablement le facteur principal pour pouvoir communiquer. Ils réalisent cet objectif avec des surcharges minimales, et sans avoir à affecter les autres couches protocolaires.*

**Mots clés :** Routage ad hoc, consommation d'énergie, survivabilité du réseau, AODV.

---

## MINIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTION IN AD HOC NETWORKS

---

### Abstract

*An ad hoc network is a collection of wireless devices forming a temporary network independently of any administration or fixed infrastructure. The main benefits of this new generation of mobile networks are flexibility and their low cost. Wireless devices have maximum utility when they can be used "anywhere at anytime". However, one of the greatest limitations to that goal is the finite power supplies. Since batteries provide limited power, a general constraint of wireless communication is the short continuous operation time of mobile terminals. This constraint is more important for the ad hoc networks, since every terminal has to*

---

\* Laboratoire LIP6, Université de Paris VI; 8, rue du Capitaine Scott, 75015 Paris – France; {senouci, pujolle}@rp.lip6.fr

*perform the functions of a router. Therefore, energy consumption should be a crucial issue while designing new communication protocols and particularly ad hoc routing protocols. We propose, in this paper, some extensions to the most important on-demand routing algorithm, AODV (Ad hoc On demand Distance Vector). The discovery mechanism in these extensions uses energy as a routing metric. These algorithms improve the network survivability by maintaining the network connectivity, which is the strong requirement for a high-quality communication. They carry out this objective with low message overhead for computing routes and without affecting the other network protocol layers.*

**Keywords:** Ad hoc routing, energy consumption, network survivability, AODV.

## Sommaire

- |  |                                |
|--|--------------------------------|
| I. Introduction  | V. Résultats expérimentaux     |
| II. Routage ad hoc : vue d'ensemble                            | VI. Conclusion et perspectives |
| III. Consommation d'énergie dans les réseaux ad hoc            | Bibliographie (37 réf.)        |
| IV. Protocoles de routage minimisant la consommation d'énergie |                                |

## I. INTRODUCTION

L'ambition vouée des réseaux ad hoc consiste à étendre les notions de mobilité pour permettre l'accès à l'information et à la communication « n'importe où et n'importe quand ». Ce sont des réseaux ne nécessitant ni administration centralisée, ni infrastructure matérielle fixe. L'activité du groupe MANET (MOBILE Ad hoc NETWORK) [1] de l'IETF (Internet Engineering Task Force) montre que le développement de ces réseaux sans fil et sans infrastructure est en plein essor. Les industriels imaginent déjà toutes sortes d'applications. Militaires bien sûr pour la création de réseaux tactiques mobiles, mais aussi civiles pour les interventions d'urgence, les communications avec les automobiles, la reconfiguration de réseaux sans câblage dans les entreprises ou bien la création de réseaux temporaires autour d'événement. Sans conteste, les atouts majeurs de cette nouvelle génération de réseaux mobiles sont la flexibilité et leur faible coût.

Un des grands challenges pour ce type de réseaux réside dans l'autonomie restreinte des stations mobiles le constituant. Effectivement, une des principales contraintes dans les communications sans fil est la durée de vie limitée des terminaux mobiles dont le support énergétique représente souvent une batterie dont la capacité est limitée. Cette contrainte devient davantage considérable pour les réseaux ad hoc, où les stations ont de surcroît la fonction de routage. En effet, relayer des paquets au nom d'autres nœuds, consomme l'énergie propre au nœud.

Nous avons constaté que la totalité des protocoles de routage actuels, proposés au sein du groupe MANET de l'IETF, utilisent la même métrique (nombre de sauts ou temps de transmission minimum). Constatant également que le choix du protocole de routage influe réellement sur la consommation d'énergie dans les réseaux ad hoc [2, 3], nous proposons de nouveaux protocoles de routage utilisant des métriques basées sur l'énergie. Ces métriques vont permettre de rallonger la durée de vie des batteries, et par conséquent la durée de vie du réseau

ad hoc (survivabilité du réseau). Ces nouveaux protocoles permettent, d'assurer que la connectivité du réseau soit maintenue aussi longtemps que possible, tout en évitant de le partitionner en sous-réseaux disjoints. Les protocoles que nous avons développés (LEAR-AODV, PAR-AODV, LPR-AODV et Q-AOMDV) sont des protocoles réactifs et sont basés sur l'un des plus importants protocoles de routage actuels : AODV (Ad hoc On demand Distance Vector) [4].

Le reste de l'article est organisé comme suit. La section II donne un aperçu sur les réseaux ad hoc et sur les principaux algorithmes de routage existants. Nous abordons, dans la section III, quelques propositions parmi les plus intéressantes, permettant de réduire la consommation d'énergie pour chacune des couches du modèle de référence. Dans la section IV, nous présentons les nouveaux protocoles à la demande (LEAR-AODV, PAR-AODV, LPR-AODV et Q-AOMDV). L'évaluation des performances et les résultats de simulation sont présentés dans la section V. Finalement, la section 6 récapitule les principales contributions de ce travail et conclut le papier.

## II. ROUTAGE AD HOC : VUE D'ENSEMBLE

La spécificité des réseaux ad hoc est que chaque station peut être mise à contribution par d'autres stations pour effectuer le routage de données. De ce fait, lorsqu'une station émettrice est hors de portée de la station destinataire, la connectivité du réseau est maintenue par les stations intermédiaires (cf. Figure 1).

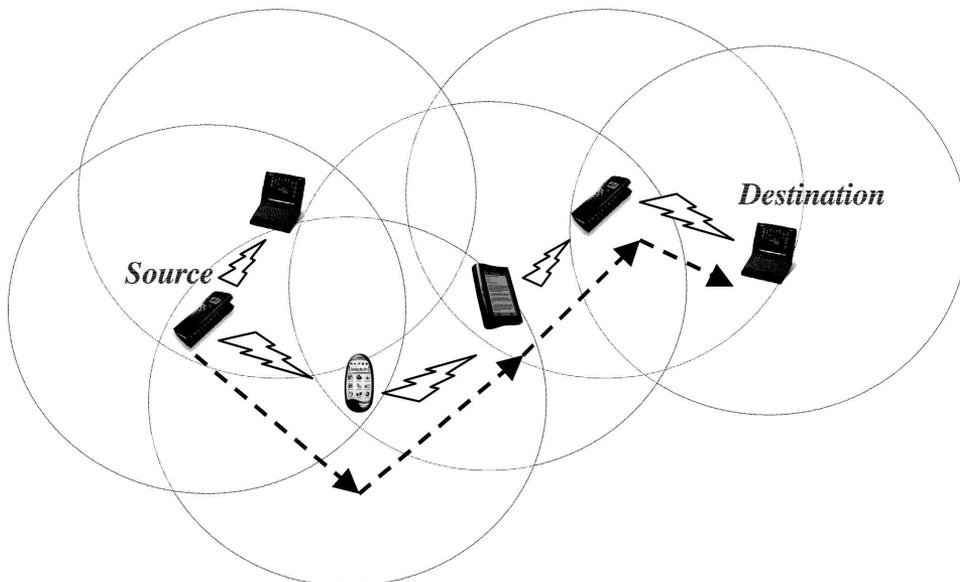


FIG. 1 – Exemple de réseau ad hoc (les cercles représentent la portée radio de chaque nœud ad hoc).

*A typical ad hoc network (the circles represent the radio range of each ad hoc node).*

Globalement, on distingue deux familles de protocoles de routage ad hoc : les protocoles de routage dits « proactifs », qui anticipent la demande d'acheminement de paquets et les protocoles de routage « réactifs » qui réagissent à la demande. Nous donnons, ci-après, une vue globale de ces protocoles et de leurs caractéristiques essentielles. Dans [2, 3], les auteurs comparent ces deux familles de protocoles et constatent que les protocoles réactifs consomment moins d'énergie que les protocoles proactifs dans différentes conditions de simulation.

## II.1. Protocoles proactifs

Les protocoles de routage proactifs exigent une mise à jour périodique des données de routage qui doit être diffusée par les différents nœuds de routage du réseau. Les protocoles les plus importants de cette classe sont DSDV (Dynamic destination-Sequenced Distance Vector) [5], OLSR (Optimized Link State Routing) [6] et TBRPF (Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding) [7].

## II.2. Protocoles réactifs

Les protocoles de routage appartenant à cette catégorie, créent et maintiennent les routes selon les besoins. Lorsque le réseau a besoin d'une route, une procédure de découverte de routes est lancée. Les protocoles les plus importants de cette classe sont DSR (Dynamic Source Routing) [8] et AODV (Ad hoc On demand Distance Vector) [3]. Nous nous intéressons particulièrement, au protocole AODV puisqu'il fait l'objet d'un ensemble d'extensions abordé dans ce papier. Nous présentons également un protocole réactif multi-chemins appelé AOMDV (Ad hoc On demand Multipath Distance Vector) [9], utilisé comme base de l'une de nos propositions.

### II.2.1. Le protocole AODV

AODV [3] est un protocole de routage réactif, utilisant un mécanisme de découverte de route inspiré de DSR et DSDV. Une fois la route tracée, les nœuds qui ne se trouvent pas sur le chemin actif ne maintiennent aucune information de routage et ne participent à aucun échange de mise à jour. AODV utilise en outre un numéro de séquence pour comparer les chemins les plus récents, afin de forcer les mises à jour si nécessaires et d'éviter la formation de boucles de routage. La découverte et le maintien de la route dans AODV sont détaillés ci-dessous.

#### II.2.1.1. Découverte de route

Lorsqu'un nœud source désire établir une route vers une destination pour laquelle il ne possède pas encore de route, il diffuse un paquet RREQ (Route Request) à travers le réseau. Les nœuds recevant le paquet établissent des pointeurs de retour vers la source dans les tables de routage. Un nœud recevant un RREQ émettra (en unicast) un paquet RREP (Route

Response) soit s'il est la destination, soit s'il possède une route vers la destination avec un numéro de séquence supérieur ou égal à celui repris dans le RREQ. Sinon, il rediffuse le RREQ. Alors que les paquets de réponses RREP reviennent vers la source, les nœuds intermédiaires construisent des pointeurs vers la destination dans leurs tables de routage. Une fois que la source a reçu le RREP, elle peut commencer à émettre des paquets de données vers la destination. Si ultérieurement, la source reçoit un RREP contenant un numéro de séquence supérieur ou le même mais avec un nombre de sauts plus petit, elle mettra à jour son information de routage vers cette destination et commencera à utiliser la nouvelle route.

#### II.2.1.2. Maintien de la route

Une route est maintenue aussi longtemps qu'elle continue d'être active. Si un lien est rompu alors qu'une route est active, le nœud extrémité du lien rompu émet un paquet d'erreur RERR (Route Error) vers le nœud source, pour lui notifier que la destination est désormais injoignable. Après réception du RERR, la source peut re-initier un processus de découverte de route dans le cas où elle souhaite toujours émettre.

### II.2.2. Le protocole AOMDV

L'objectif primaire du protocole réactif AOMDV [9] est de fournir une tolérance efficace aux fautes, dans le sens où le rétablissement en cas d'échec d'une route est plus rapide. Pour réaliser cet objectif, AOMDV construit plusieurs routes sans boucles de routage au niveau des sources de trafic et des nœuds intermédiaires ; contrairement à AODV qui construit et maintient une seule route seulement pour chaque couple (source, destination). Une nouvelle découverte de route n'est nécessaire, que si toutes les routes deviennent non valides. Ceci réduit considérablement les latences et la surcharge de la procédure de découverte. Dans ce qui suit, nous allons décrire la découverte et le maintien de la route dans AOMDV.

#### II.2.2.1. Découverte de route

Dans AODV, chaque requête (respectivement réponse) reçue par un nœud pendant le processus de découverte de route définit potentiellement une route alternative vers la source (respectivement destination). Par exemple, chaque copie du paquet de requête RREQ arrivant à un nœud définit une route alternative vers la source. Cependant, accepter naïvement toutes ces copies va mener à la formation de boucles dans les routes. Afin d'éliminer la possibilité de formation de boucles, AOMDV utilise la même condition que pour AODV, et qui consiste à n'accepter une nouvelle requête que si : (i) le nombre de sauts est inférieur ou que (ii) le numéro de séquence est supérieur.

#### II.2.2.2. Maintien de la route

Une nouvelle découverte de route est nécessaire uniquement lorsqu'aucune des routes précédemment établies n'est valide. Dans ce cas, le nœud envoie un paquet d'erreur RERR à tous ses voisins qui utilisent ce nœud comme prochain saut dans la route vers cette destination. Ces routes sont effacées des tables de routage des nœuds récepteurs de ce paquet d'erreur. En revanche, contrairement au protocole AODV, ces paquets d'erreur ne sont pas relayés jusqu'à la source. Si la source de trafic reçoit un paquet RERR, elle lance une nouvelle découverte de route dans le cas où elle souhaite toujours émettre.

### III. CONSOMMATION D'ÉNERGIE DANS LES RÉSEAUX AD HOC

Plusieurs études [10, 11, 12, 13] ont montré que les plus grands facteurs consommant la batterie d'un ordinateur portable sont le microprocesseur (CPU), l'écran à cristaux liquides, le disque dur, le lecteur de CD, le lecteur de disquette, le système d'E/S et la carte réseau sans fil. La conservation d'énergie a donc, été pendant longtemps traitée au niveau de la couche physique. Il existe cependant d'autres facteurs, en dehors de la couche physique, pouvant affecter la consommation d'énergie des batteries. Chacune des couches du modèle de référence a fait l'objet de propositions pour réduire la consommation des batteries selon différentes approches [14]. Nous allons exposer ici quelques propositions parmi les plus intéressantes concernant ces différentes couches.

#### III.1. Couche Physique

Dans le passé, les recherches sur la consommation d'énergie se sont concentrées sur la couche physique étant donné que la consommation d'énergie dans un ordinateur portable était considérée comme origine directe du matériel utilisé. En effet, pour un ordinateur portable tel que Toshiba 410 CDT, 36 % de l'énergie totale est consommée par l'écran, 21 % par le CPU/mémoire, 18 % par l'interface sans fil et 18 % par le disque dur [14]. De ce fait, quelques travaux tentaient d'améliorer ce matériel utilisé en augmentant la capacité des batteries, en utilisant une fréquence d'horloge variable pour le CPU, en utilisant des mémoires flash, etc. De nombreuses techniques permettant de minimiser cette consommation au niveau physique sont discutées dans [13].

#### III.2. Sous-couche MAC

La couche MAC (Medium Access Control) est une sous-couche de la couche liaison de données. Cette couche fait l'interface avec la couche physique et comprend des protocoles définissant la manière d'allouer les canaux radios partagés entre l'ensemble des nœuds mobiles. L'objectif de la couche MAC consiste à éliminer, autant que possible, les collisions puisque les collisions provoquent des retransmissions, et les retransmissions mènent à une consommation inutile d'énergie. Notons que, dans un réseau sans fil, les retransmissions ne peuvent pas être complètement évitées à cause du taux d'erreurs très élevé et de la mobilité des nœuds.

Il existe plusieurs protocoles MAC dont IEEE 802.11, Hiperlan, PRMA (Packet Reservation Multiple Access) [15], DQRUMA (Distributed Queuing Request Update Multiple Access) [16], E\_MAC (Energy Efficient MAC) [17], EC-MAC (Energy Conserving MAC) [18], PAMAS (Power Aware Multi-Access Protocol with Signalling) [19], etc. Le standard IEEE 802.11 [20], par exemple, prend en charge deux modes de gestion de l'alimentation, les modes CAM (Continuous Aware Mode) et PSPM (Power Save Polling Mode). Le premier mode correspond au

mode de fonctionnement par défaut : la station est tout le temps allumée et écoute constamment le support. Le second correspond au mode d'économie d'énergie. Dans ce mode, le point d'accès tient à jour un enregistrement de toutes les stations qui sont en mode d'économie d'énergie et stocke toutes les données qui leur sont adressées. Les stations qui sont en veille s'activent à des périodes de temps régulier pour recevoir une trame TIM (Traffic Information Map) envoyée par le point d'accès. Entre les trames TIM, les stations retournent en mode veille. Toutes les stations partagent le même intervalle de temps pour recevoir les trames TIM ainsi elles s'activent toutes au même moment pour la recevoir. La trame TIM informe les stations si elles ont ou non des données qui sont stockées dans le point d'accès. Lorsqu'une station s'active pour recevoir la trame TIM et qu'elle s'aperçoit que le point d'accès contient des données qui lui sont destinés, elle envoie au point d'accès une trame de requête appelée Polling Request Frame pour mettre en place le transfert des données. Une fois le transfert terminé, la station retourne en mode veille jusqu'à la réception de la prochaine trame TIM. Pour des trafics de type broadcast ou multicast, le système est le même mais cette fois-ci l'AP envoie aux stations une trame DTIM (Delivery Traffic Information Map).

### III.3. Sous-couche LLC

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons aux fonctionnalités de contrôle d'erreur de la sous-couche de la couche liaison de données : LLC (Logical Link Control). Les deux techniques les plus utilisées pour le contrôle d'erreur, dans un environnement filaire, sont ARQ (Automatic Repeat Request) et FEC (Forward Error Correction). Ces méthodes consomment beaucoup d'énergie en raison des retransmissions et de la surcharge nécessaires pour la correction d'erreurs. Utiliser ce genre de protocoles, dans un environnement sans fil, nécessite une grande adaptation vu le taux d'erreur qui est plus élevé (bruit, évanouissement du signal, mobilité, etc.). Quelques travaux ont proposé des algorithmes d'adaptation de ces méthodes de contrôle d'erreurs permettant également de réduire la consommation d'énergie [21, 22]. Dans [21] par exemple, les auteurs proposent d'incorporer un protocole de sondage (probing) permettant de ralentir la transmission des données dès lors que l'état du canal est dégradé. Ce mode de sondage utilise un paquet de sondage contenant seulement un en-tête avec peu ou pas de charge utile et consomme donc peu d'énergie.

### III.4. Couche réseau

Les protocoles de couche réseau composent la plus grande classe de protocoles d'économie d'énergie. Ils diffèrent selon le type du trafic : (i) trafic de diffusion et (ii) trafic en unicast. Il existe plusieurs solutions montrant l'intérêt de diminuer les diffusions dans un réseau ad hoc [9, 23]. En effet, les diffusions chargent considérablement le réseau en plus d'accroître les collisions, qui entraînent ensuite des rediffusions. C'est une source de consommation des batteries qui peut vite être importante. En ce qui concerne le trafic en unicast, les protocoles de routage spécifiquement développés pour réduire la consommation des batteries

ne fournissent pas de nouveaux algorithmes de routage mais proposent des améliorations à ceux déjà existants. L'idée fondamentale de ces protocoles est de router les paquets en fonction de la minimisation d'un critère relatif à la consommation des batteries [24, 25, 26, 27, 28, 29].

### III.5. Couche Transport

La couche transport fournit un service de transport de données de bout en bout. Le protocole de transport le plus généralement utilisé pour les réseaux fixes, où les liens physiques sont assez fiables, est le protocole TCP (Transmission Control Protocol). Cependant, en raison des propriétés du lien sans fil, les performances de TCP se dégradent significativement. TCP fait appel à un grand nombre de retransmissions et à des mesures de contrôle de congestion lors d'erreur sur le lien sans fil ou de pertes dues aux handoffs. Cependant, et comme indiqué auparavant, les retransmissions consomment inutilement l'énergie des batteries. Des propositions de protocoles [30], ont été faites dans l'unique but de concevoir des protocoles de transport dans un environnement sans fil. Bien que ces protocoles aient mené, ou non, à une plus grande efficacité énergétique, ils n'ont pas directement étudié l'idée de réduire la consommation d'énergie au niveau de la couche transport.

### III.6. Couche Application

L'efficacité énergétique dans la couche application est devenue un important domaine pour les industriels ainsi que pour les chercheurs. En industrie, des API ont été développées [31] afin d'aider les réalisateurs de logiciel à créer des programmes qui sont moins consommateurs d'énergie. En recherche, les auteurs dans [32] proposent une technique de transmission de vidéo encodée permettant de réduire la consommation des batteries. L'idée fondamentale de ce travail consiste à diminuer le nombre de bits transmis sur le lien sans fil afin de réduire la consommation d'énergie tout en préservant une qualité visuelle acceptable de la vidéo.

## IV. PROTOCOLES DE ROUTAGE MINIMISANT LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE

Nous proposons, dans cette section, des extensions de l'un des plus importants protocoles de routage réactifs actuels qui est AODV. Ces nouvelles extensions (LEAR-AODV, PAR-AODV, LPR-AODV et Q-AOMDV) prennent en compte une métrique basée sur la consommation d'énergie lors de la découverte de route. Ils permettent ainsi d'augmenter la durée de vie du réseau « *survivabilité* » ; c'est probablement le facteur principal pour pouvoir communiquer.

## IV.1. Le protocole LEAR-AODV

Nous proposons, dans cette partie, un nouveau protocole de routage, appelé LEAR-AODV (Local Energy-Aware Routing based on AODV), permettant d'équilibrer la consommation d'énergie entre tous les nœuds du réseau. L'objectif est de réduire tant que possible le problème de la station cible, dans lequel un terminal n'aura pas servi à son utilisateur, mais uniquement en tant que routeur pour les besoins des autres utilisateurs. Nous utilisons le même mécanisme que celui proposé dans [25]. Les auteurs proposent d'étendre le protocole DSR, en introduisant un nouveau mécanisme dans lequel un nœud affamé peut conserver sa batterie en refusant de relayer des paquets qui ne lui sont pas destinés. La prise de décision dans LEAR-AODV est distribuée sur tous les nœuds, et ne requiert pas d'informations globales sur le réseau. La découverte et le maintien de la route dans LEAR-AODV sont décrits ci-dessous.

### IV.1.1. Découverte de route

Dans le protocole AODV, le nœud mobile n'a pas vraiment le choix, et a l'obligation de relayer des paquets pour d'autres nœuds. L'idée fondamentale du protocole LEAR-AODV est de mettre en cause cette « bonne volonté » de chaque nœud mobile à participer au processus de sélection de route, et de relayer des paquets de données au nom d'autres nœuds. Chaque nœud détermine à partir de son énergie résiduelle  $E_r$ , s'il va accepter et donc relayer le paquet de requête RREQ ou bien le rejeter. Si cette valeur est supérieure à un certain seuil  $\theta$  ( $E_r > \theta$ ), le paquet de requête RREQ est retransmis, mais dans le cas contraire, le paquet est simplement rejeté. La destination recevra un paquet de requête seulement lorsque tous les nœuds intermédiaires au long de la route auront de bons niveaux de batterie. Ainsi, le premier message à arriver est considéré comme empruntant une route raisonnablement courte, et essentiellement avec une énergie suffisante.

### IV.1.2. Maintien de la route

Le maintien de la route est nécessaire soit lorsque les liaisons entre deux ou plusieurs nœuds sur la route sont perdues à cause de leurs mouvements (mobilité des nœuds), soit lorsque les ressources énergétiques de certains nœuds sur la route sont épuisées trop rapidement. Dans le premier cas, et tout comme dans AODV, un nouveau paquet d'erreur RERR est renvoyé, et l'entrée de la table de routage correspondant au nœud qui s'est déplacé hors de portée est supprimée. Dans le deuxième cas, le nœud envoie un paquet d'erreur même lorsque son énergie résiduelle,  $E_r$ , est inférieure au seuil  $\theta$ .

Cependant, le problème se pose dans le cas où tous les nœuds ont une énergie inférieure au seuil  $\theta$ . La source ne va recevoir, par conséquent, aucun paquet de réponse RREP, même si le chemin entre la source et la destination existe. Pour éviter ce problème, la source renvoie la même requête, mais avec un numéro de séquence incrémenté, et quand un nœud intermédiaire reçoit la requête, il diminue son seuil afin de permettre la transmission. Nous introduisons également, un nouveau message de contrôle *Ajuster\_Seuil*: Quand un nœud  $A$  rejette une requête RREQ, il diffuse ce message *Ajuster\_Seuil*, et chaque nœud qui le reçoit saura qu'un paquet RREQ a été rejeté, et donc diminue son seuil quand il reçoit un deuxième paquet de requête RREQ généré par la source. Dès qu'une destination reçoit un paquet de requête RREQ, elle émet un paquet de réponse (RREP) vers la source. Le traitement des paquets de réponse par la source est identique à celui de AODV.

## IV.2. Le protocole PAR-AODV

Le protocole PAR-AODV (Power-Aware Routing based on AODV) est un protocole de routage à la demande basé sur AODV. Le principe de fonctionnement de ce protocole consiste à résoudre le problème de la recherche d'une route,  $p$ , à un instant de découverte de route,  $t$ , de telle sorte que la fonction coût suivante [24] soit réduite au minimum :

$$(1) \quad C(\pi, t) = \sum_{i \in \pi} C_i(t)$$

où

$$(2) \quad C_i(t) = \rho_i \left( \frac{F_i}{E_{r,i}(t)} \right)^\alpha$$

$\rho_i$ : puissance de transmission du nœud  $i$ ;

$F_i$ : capacité totale de la batterie du nœud  $i$ ;

$E_{r,i}(t)$ : capacité résiduelle de la batterie du nœud  $i$  à l'instant  $t$ ;

$\alpha$ : facteur de pondération.

La découverte et le maintien de la route dans PAR-AODV sont décrits en détail ci-après.

### IV.2.1. Découverte de route

Dans PAR-AODV, l'activité commence par une diffusion de paquets de requête RREQ, par la source, quand elle a des données à envoyer. Tous les nœuds, à l'exception du nœud source et du nœud destination, calculent leur coût  $C_i$  en utilisant la formule (2) et l'ajoutent au coût de la route dans l'en-tête du paquet RREQ (cf. formule (1)). Quand le nœud destination reçoit un paquet de requête, il envoie un paquet de réponse RREP vers la source par l'intermédiaire du chemin inverse. Ce message de réponse contient le coût du chemin choisi. Le nœud source choisira la route avec le coût minimum.

### IV.2.2. Maintien de la route

Le maintien de la route dans PAR-AODV est identique à celui de l'algorithme LEAR-AODV décrit ci-dessus.

## IV.3. Le protocole LPR-AODV

Le routage LPR-AODV (Lifetime Prediction Routing based on AODV) est un protocole de routage à la demande, qui utilise une nouvelle métrique consistant à prédire la durée de vie des batteries. Ce protocole favorise la route dont la durée de vie est maximum : nous entendons par là, que la route ne contient pas de nœuds dont la durée de vie est faible. Le principe du routage LPR-AODV consiste à résoudre le problème de la recherche d'une route,  $\pi$ , à un instant de découverte de route,  $t$ , de telle sorte que la fonction coût suivante [26] soit maximisée :

$$(3) \quad \underset{\pi}{\text{Max}} (T_{\pi}(t)) = \underset{\pi}{\text{Max}} \left( \underset{i \in \pi}{\text{Min}} (T_i(t)) \right)$$

où :  $T_{\pi}(t)$ , durée de vie de la route  $\pi$ ;

$T_i(t)$ , durée de vie prévue du nœud  $i$  dans la route  $\pi$ .

Dans LPR-AODV, chaque nœud,  $i$ , tente d'estimer la durée de vie de sa batterie,  $T_i$ , en se basant sur son ancienne activité. Ceci est réalisé grâce à un récent historique sur l'activité du nœud. Cette approche est une approche distribuée permettant d'équilibrer la charge sur l'ensemble des nœuds, en choisissant les routes les moins chargées. La découverte et le maintien de la route dans LPR-AODV sont décrits ci-dessous.

#### IV.3.1. Découverte de route

Dans LPR-AODV, tous les nœuds à l'exception du nœud source et du nœud destination calculent leur durée de vie prévue,  $T_i$ , en utilisant la formule (4). Chaque requête est munie d'un champ supplémentaire représentant la durée de vie minimum de la route. Un nœud,  $i$ , dans la route, remplace la valeur de cette durée de vie minimum par sa propre durée de vie,  $T_i$ , dans le cas où  $T_i$  est inférieur à cette valeur.

$$(4) \quad T_i(t) = \frac{E_i(t)}{\text{Vitesse\_décharge}_i(t)}$$

où  $\text{Vitesse\_décharge}_i(t) = \frac{E_i(t') - E_i(t)}{t - t'}$

$E_i(t)$  : est l'énergie résiduelle à l'instant  $t$  ;

$t$  : temps courant correspondant au moment où le nœud envoie/relaie le paquet courant ;

$t'$  : valeur du temps enregistré dans le nœud correspondant au moment où le nœud avait envoyé/relayé le  $N^{\text{ème}}$  « prédécesseur » du paquet courant.

Quand la destination reçoit un paquet de requête, elle renvoie un paquet de réponse RREP à la source par l'intermédiaire du chemin inverse. Ce message contient la durée de vie de la route. Le nœud source choisira la route dont la durée de vie est la plus grande.

#### IV.3.2. Maintien de la route

Le maintien de la route est nécessaire dans le cas où un nœud devient hors de portée d'un nœud émetteur, ou dans le cas où il détecte un changement dans sa durée de vie prévue. Dans le premier cas (mobilité des nœuds), le mécanisme est le même que dans AODV. Dans le second cas, le nœud envoie un paquet d'erreur même lorsque sa durée de vie prévue,  $T_i$ , est inférieure à un certain seuil  $\delta$ . Ce message d'erreur de route force la source à lancer une nouvelle découverte de route. Cette décision dépend uniquement de la capacité résiduelle de la batterie ainsi que de la vitesse de décharge de celle-ci. Par conséquent c'est une décision totalement locale. Cependant, lorsque tous les nœuds ont une durée de vie inférieure au seuil  $\delta$ , la source ne va donc recevoir aucun paquet de réponse RREP, même si le chemin entre la source et la destination existe. Pour remédier à ce problème nous utilisons le même mécanisme utilisé dans LEAR-AODV et décrit plus haut.

### IV.3.3. Le protocole Q-AOMDV

Nous avons développé un protocole de routage à la demande multi-roues basé sur AOMDV<sup>1</sup>. Nous l'avons appelé Q-AOMDV (Q-routing for Ad hoc on-demand Multipath Distance Vector). Le principal objectif de l'algorithme consiste à équilibrer la consommation d'énergie à travers tous les nœuds mobiles du réseau, en envoyant les paquets de données sur les différentes routes calculées en utilisant AOMDV. Pour réaliser cet objectif, Q-AOMDV choisit l'une des routes disponibles, en se basant sur l'algorithme Q-routing [35]. Ce dernier permet de trouver la route optimale que le nœud source devrait prendre, afin d'atteindre la destination avec un coût minimal. Dans ce qui suit, nous allons décrire la découverte, et le maintien de la route dans Q-AOMDV.

### IV.3.4. Découverte de route

La découverte de route dans Q-AOMDV utilise le même mécanisme de découverte de route que celui du protocole AOMDV, détaillé dans la section II. Ce mécanisme consiste à calculer différentes routes, allant de la source de trafic jusqu'à la destination, tout en évitant la formation de boucles de routage. Après un calcul des différentes routes, la source peut maintenant commencer à transmettre les données. Dans Q-AOMDV, la source (et par la suite chaque nœud intermédiaire) choisit une de ces différentes routes valides en se basant sur l'algorithme Q-routing. Cet algorithme essaie de trouver la route optimale que le nœud source ou le nœud intermédiaire devrait choisir, afin d'atteindre la destination avec un coût associé minimal<sup>2</sup>. Grâce à l'algorithme du Q-routing, chaque nœud dans le réseau ad hoc tente d'apprendre une fonction de routage de bout en bout, appelée Q-fonction, qui soit adaptative et qui prolonge la survivabilité du réseau.

### IV.3.5. Maintien de la route

Le maintien de la route dans Q-AOMDV utilise le même mécanisme de maintien de la route que celui du protocole AOMDV. Ce mécanisme consiste à ne lancer une procédure de maintien de la route que lorsqu'aucune des routes pré-établies par Q-AOMDV n'est valide.

## V. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

L'étude de performances des différents algorithmes présentés dans cette section ont été réalisées grâce à l'environnement de simulation GloMoSim 2.0 [34]. GloMoSim implémente une couche physique qui inclut un modèle de propagation radio, des interfaces radio, et utilise DCF (Distributed Coordination Function)<sup>3</sup> comme méthode d'accès au médium. Le modèle radio prend en compte les collisions, les délais de propagation et l'atténuation du signal. La bande passante totale considérée est de 2 Mbps et la portée radio de chaque nœud est de 250 mètres.

1. Le protocole AOMDV est présenté dans la section 2.

2. Contrairement à [35] nous ne considérons pas le délai de transmission comme coût, mais plutôt la survivabilité du réseau.

3. DCF est une méthode d'accès au médium définie par le groupe IEEE 802.11 pour sa norme de réseaux locaux sans fil.

Nous simulons un réseau ad hoc composé de 36 nœuds répartis sur une surface de  $(800 \times 800)$  m<sub>2</sub>. Une quarantaine de connexions aléatoires sont établies entre les différents nœuds. Ces connexions sont du type CBR (Constant Bit Rate) à 4 paquets/seconde et la taille des paquets IP est de 1024 octets. La capacité initiale de la batterie de chaque nœud est fixée à 10 unités. Cette énergie initiale est réduite au fur et à mesure par la transmission et la réception de données. Quand elle atteint le niveau zéro, le nœud correspondant ne peut plus participer à la communication et est considéré comme « décédé » ou « mort ». Nous considérons le cas simple où la puissance de transmission est fixe. Dans ce cas-là, chaque paquet transmis ou relayé consomme une quantité fixe d'énergie. Le cas où la puissance de transmission est variable en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur est traité dans [29].

Selon les spécifications des cartes de Lucent utilisant la norme IEEE 802.11 [33], la puissance de transmission varie entre 0.045 Watts en mode sommeil et 1.25~1.50 Watts en mode réception/transmission, respectivement. Pour obtenir l'énergie consommée instantanée, la puissance d'émission est multipliée par le temps de transmission. Par exemple, la transmission d'un paquet de données de 1024 octets consomme  $6.14 \times 10^{-3}$  Joules (1.50 Watts  $\times$   $1024 \times 8$  bits / 2000000 bps).

Pour une meilleure lisibilité des résultats, nous n'avons calculé que l'énergie consommée par le routage des paquets de données/contrôle. En fait, le problème est qu'un nœud ad hoc doit toujours pouvoir être à l'écoute d'un éventuel émetteur qui chercherait à le contacter, et que cette écoute est coûteuse en terme d'énergie. Cette écoute reste souvent inutilisée, et est donc purement « parasite ». Elle peut toujours être réduite par des protocoles tels que PAMAS [19]. Ainsi, nous ne la considérons pas dans le calcul de l'énergie consommée. Pour la même raison, nous ne rajoutons pas l'énergie consommée pendant la mise en veille des nœuds. Sans ces considérations, la consommation d'énergie est dominée par une réception ou écoute abusive, et l'effet des algorithmes proposés devient non lisible.

La principale métrique de performances dans cette étude est la durée de vie du réseau : survivabilité. Nous avons défini cette métrique comme étant le temps nécessaire pour le décès de  $K$  ( $K > 1$ ) nœuds dans le réseau<sup>4</sup>. Afin de découvrir la connexité du réseau, nous représentons en 3D le niveau des batteries de tous les nœuds du réseau ad hoc.

La durée de vie du réseau pour les algorithmes proposés est comparée pour différents scénarios : (i) les nœuds sont fixes et donc ont une mobilité nulle, et (ii) les nœuds sont mobiles et se déplacent sur la surface de simulation avec différentes vitesses de déplacement.

## V.1. Nœuds fixes

La Figure 2 montre les moments auxquels un certain nombre de nœuds décèdent à cause de l'épuisement de leurs batteries, dans le cas où tous les nœuds du réseau ad hoc sont fixes. Nous choisissons la valeur du nombre de premiers nœuds décédés,  $K$ , entre 1 et 7. Pour Q-AOMDV, nous ne représentons que le temps de décès des deux premiers nœuds, puisqu'à la fin de la simulation (8000 secondes) seuls deux nœuds ont un niveau de batterie nulle. Nous

4. Cette notion de survivabilité ne tient malheureusement pas compte du phénomène de partitionnement du réseau. Il aurait été plus juste de prendre en compte la connexité du graphe formé par les nœuds du réseau ad hoc. Tant que le graphe contient une unique composante connexe, le réseau a une utilité. Ceci amène à prendre en compte, au niveau des heuristiques de routage, le degré d'un nœud puisque le décès d'un nœud de fort degré risque plus de rompre la connexité dans le graphe que le décès d'un nœud de degré faible.

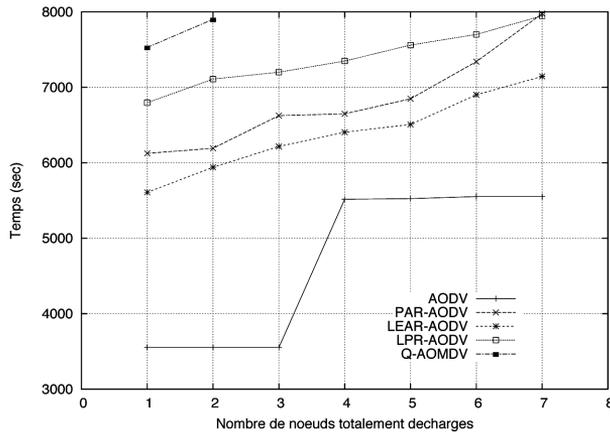


FIG. 2 – Le nombre de nœuds morts/temps.

*The number of dead nodes/time.*

constatons que pour AODV, le premier nœud meurt environ 2056 secondes plus tôt que dans LEAR-AODV, 2572 secondes plus tôt que dans PAR-AODV, 3244 secondes plus tôt que dans LPR-AODV, et 3976 secondes plus tôt que dans Q-AOMDV. Pareil, que pour 4 nœuds, ceux-ci décèdent environ 888 secondes plus tôt que dans LEAR-AODV, 1132 secondes plus tôt que dans PAR-AODV, et 1832 plus tôt que dans LPR-AODV.

Nous remarquons que LPR-AODV donne de meilleures performances que PAR-AODV. En effet, LPR-AODV prend en compte non seulement la capacité résiduelle de la batterie mais également sa vitesse de décharge. D'un autre côté, l'algorithme PAR-AODV n'utilise pas la « prévision » et utilise seulement la capacité résiduelle de la batterie. Cette différence rend la fonction coût dans LPR-AODV plus précise. Effectivement, la fonction coût dans LPR-AODV utilise une prévision sur le temps de vie restant pour le nœud. Cette prévision est basée sur un récent historique de la quantité du trafic passant par ce nœud. Cet historique utilisé par LPR-AODV est un bon indicateur du trafic passant par le nœud. Nous avons soigneusement<sup>5</sup> fixé la taille de l'historique  $N$  à 5.

Afin d'améliorer la survivabilité du réseau, la variance des énergies résiduelles entre tous les nœuds devrait être réduite au minimum. La Figure 3 donne le niveau des batteries de tous les nœuds du réseau ad hoc après un temps de simulation de 1000 secondes. Nous considérons, pour cette expérience, que les nœuds sont fixes. Nous représentons uniquement les résultats de Q-AOMDV, comparés à ceux de AODV. Nous avons fait ce choix car nous avons remarqué que c'est Q-AOMDV qui fournit les meilleurs résultats par rapport aux autres. Dans Q-AOMDV (cf. Figure 3(b)), les nœuds consomment l'énergie plus équitablement. Ainsi, les nœuds au centre du réseau continuent à fournir la connectivité plus longtemps, et le réseau n'est pas rapidement partitionné. Ceci va mener à une dégradation plus « gracieuse » du réseau : c'est l'idée de la survivabilité du réseau. En revanche, pour AODV (cf. Figure 3(a)) le niveau d'énergie pour les nœuds du centre est largement inférieur à la moitié du niveau initial.

5. Nous avons testé plusieurs valeurs pour  $N$ , et c'est la valeur 5 qui donne les meilleurs résultats.

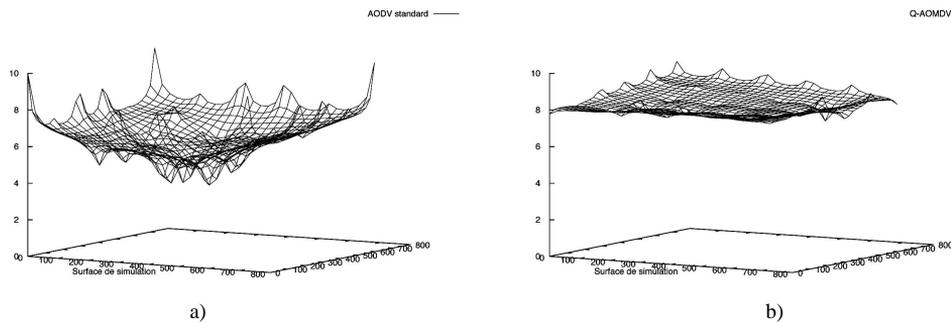


FIG. 3 – Niveau des batteries de tous les nœuds dans le réseau ad hoc en utilisant  
(a) AODV (b) Q-AOMDV (temps de simulation de 1000 secondes).

*Contours of remaining battery powers of all the ad hoc nodes using  
(a) AODV (b) Q-AOMDV (simulation time set to 1000 seconds).*

## V.2. Nœuds mobiles

Nous considérons maintenant les nœuds comme étant mobiles et se déplaçant selon le modèle de mobilité « *Random Waypoint* » [36, 37]. Dans ce modèle, les mobiles choisissent une destination aléatoire, s'y rendent à une vitesse aléatoire, y demeurent un temps aléatoire puis recommencent. La vitesse des mobiles est aléatoire avec un maximum de 1 m/s, 4 m/s et 8 m/s.

L'effet de la mobilité est présenté par la Figure 4. Nous avons comparé les performances des trois algorithmes LEAR-AODV, PAR-AODV et LPR-AODV par rapport à AODV. L'algorithme Q-AOMDV n'a pas été testé pour le cas où les nœuds sont mobiles. Parce qu'à chaque déplacement d'un nœud, l'algorithme re-initialise sa table de routage et par conséquent, il re-initialise la Q-fonction correspondante déjà apprise. Il recommence alors de nouveau, à apprendre une nouvelle table qui risque d'être re-initialisée si un autre nœud se déplace aussi. Ainsi, malheureusement l'algorithme Q-AOMDV reste inadéquat pour des réseaux ad hoc de forte mobilité.

Comme nous pouvons le constater dans la Figure 4, nos algorithmes sont toujours meilleurs par rapport à AODV en termes de nombre de nœuds décédés. Nous constatons que pour AODV, et pour une vitesse des nœuds égale à 4 mètres/seconde par exemple, le premier nœud meurt environ 793 secondes plus tôt que dans LEAR-AODV, 1 125 secondes plus tôt que dans PAR-AODV, et 1 182 secondes plus tôt que dans LPR-AODV. Cette diminution de performances, par rapport au cas où les nœuds sont fixes, est tout à fait légitime. À mesure que la vitesse de déplacement des nœuds augmente, le taux de consommation d'énergie dans le réseau augmente aussi. Ceci est normal puisqu'une vitesse de déplacement plus élevée implique plus de découvertes de route, et par conséquent une consommation d'énergie plus élevée dans le réseau. En outre, à mesure que la mobilité des nœuds augmente, la différence entre AODV et nos algorithmes devient moins importante.

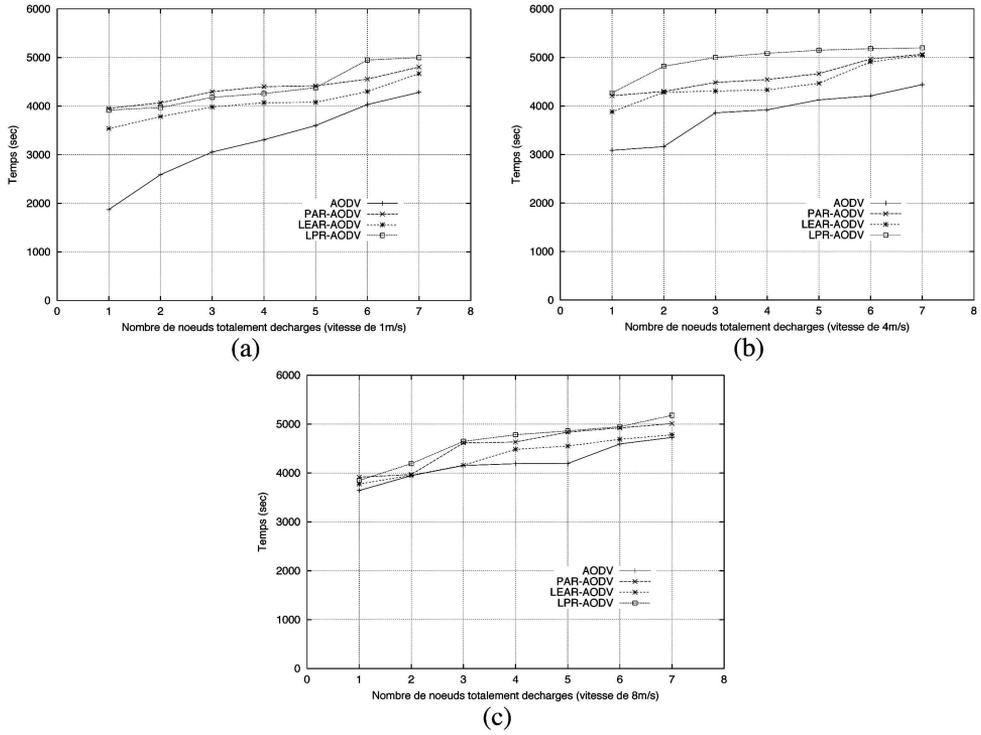


FIG. 4 – Nombre de nœuds morts avec une vitesse de (a) 1 m/s (b) 4 m/s (c) 8 m/s.  
 Number of dead nodes for a node velocity set to (a) 1 m/s (b) 4 m/s (c) 8 m/s.

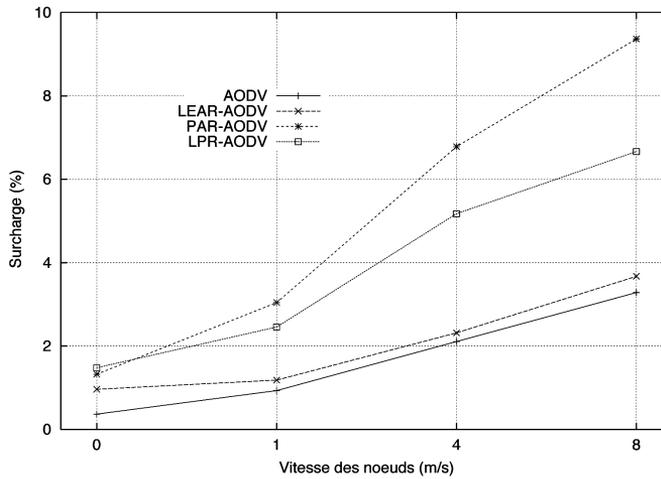


FIG. 5 – Surcharge de signalisation en fonction de la vitesse des nœuds.  
 The overhead vs. velocity of node movement.

Afin de trouver la meilleure route disponible, les algorithmes que nous avons proposés ont besoin, lors des processus de découverte/maintien de route, de propager davantage de paquets de contrôle dans le réseau. Pour mesurer cette surcharge de signalisation, nous avons calculé le rapport entre la quantité de paquets de contrôle (en octets) et la quantité de paquets données (en octets) transmis dans le réseau pendant un temps de simulation de 6000 secondes. Nous pouvons voir, dans la Figure 5, les valeurs de la surcharge en fonction de la vitesse de déplacement des nœuds dans le réseau. La différence entre AODV et nos algorithmes (LEAR-AODV, PAR-AODV et LPR-AODV) croît avec la vitesse des nœuds. Ceci est dû au fait qu'en plus des mécanismes introduits dans nos algorithmes pour maintenir les routes, s'ajoute le fait que les routes deviennent invalides avec des vitesses de déplacement plus grandes.

## VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les réseaux ad hoc représentent une sorte « d'architecture molle », évolutive et automatique. À la clef : souplesse et autonomie. Ces réseaux reposent avant tout sur les développements logiciels de nouveaux protocoles de routage « intelligents », qui prennent en compte les spécificités de ces réseaux (mobilité des terminaux, capacité limitée des batteries, etc.). Effectivement, en raison de la capacité limitée des batteries des terminaux, la consommation d'énergie devrait être un critère fondamental lors de la conception de tels algorithmes de routage. Le routage est l'un des principaux facteurs agissant sur le taux de consommation d'énergie dans ces réseaux. Il est à noter que les protocoles de routage actuels, normalisés dans le groupe MANET de l'IETF, ne prennent pas en compte la métrique consommation d'énergie pendant le processus de découverte de route. Ils s'intéressent, en revanche, à découvrir le plus court chemin. La métrique consommation d'énergie peut s'avérer plus efficace, puisqu'elle permettrait d'augmenter la durée de vie du réseau ; c'est probablement le facteur principal pour pouvoir communiquer.

Dans ce papier, nous nous sommes intéressés à la manière d'étendre les protocoles de routage actuels en prenant comme objectif de rallonger la durée de vie des batteries, et par conséquent la survivabilité du réseau. Pour ce faire, nous avons proposé quatre nouveaux algorithmes de routage (LEAR-AODV, PAR-AODV, LPR-AODV et Q-AOMDV) basés sur l'un des plus importants protocoles de routage actuels qui est AODV. Ce dernier, ne considère pas la contrainte de l'énergie pour optimiser le routage, mais cherche plutôt, le chemin le plus court en terme de sauts.

Le premier algorithme proposé, LEAR-AODV, équilibre la consommation d'énergie dans un réseau en se basant seulement sur des informations locales. Effectivement, la prise de décision dans LEAR-AODV est distribuée sur tous les nœuds, et ne nécessite pas d'informations globales sur le réseau (elle n'a besoin que du niveau d'énergie du nœud). Un autre avantage réside dans sa simplicité et dans sa facilité à être intégré dans tous les algorithmes de routage ad hoc existants (réactifs ou proactifs). L'objectif pour le second algorithme, PAR-AODV, est de rechercher le meilleur chemin lors d'une découverte de route. Pour cela, PAR-AODV utilise uniquement la capacité résiduelle de chaque nœud. En revanche, pour le troisième algorithme LPR-AODV, il considère également la vitesse de décharge des nœuds, lors d'une découverte de route. Le dernier algorithme proposé, Q-AOMDV, calcule plusieurs routes allant de la

source de trafic jusqu'à la destination. Il équilibre la consommation d'énergie à travers tous les nœuds mobiles du réseau en envoyant les paquets de données sur des routes différentes. Il réduit ainsi, au minimum la variance dans les énergies résiduelles de tous les nœuds. Cet algorithme est malheureusement inadapté aux réseaux ad hoc où les nœuds sont mobiles. En revanche, il donne des résultats remarquables pour un réseau ad hoc avec des nœuds fixes.

Ces solutions d'extensions de AODV, sont des solutions simples, et l'ensemble des résultats de simulations démontre clairement, qu'elles améliorent considérablement ses performances en améliorant la survivabilité du réseau. Elles réalisent cet objectif avec des surcharges minimales, et sans avoir à affecter les autres couches protocolaires. Ces algorithmes équilibrent la consommation d'énergie sur la totalité du réseau.

Une des perspectives de ce travail sera de simuler ces algorithmes au-dessus de PAMAS au lieu de l'IEEE 802.11 pour une meilleure gestion de l'énergie. Il nous semble également important d'étudier la minimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux ad hoc utilisant des protocoles de routage proactifs ou hybrides. Une expérience basée sur une implémentation de ces propositions dans un réseau ad hoc réel reste le meilleur moyen de tester leurs performances. Enfin, étant donné le succès phénoménal des réseaux de capteurs (sensor networks), il nous paraît important d'adapter les algorithmes de routage ad hoc, proposés dans ce papier, sur ce genre de réseaux. Ceci demandera sans doute des modifications profondes, dans la mesure où la métrique de survivabilité doit être adaptée. En effet, la mort d'un nœud ne pose pas de problème dans le réseau de capteurs tant que les autres capteurs actifs peuvent encore émettre vers le collecteur d'informations.

*Manuscrit reçu le 20 février 2004*

*Accepté le 8 novembre 2004*

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] IETF MANET WG (Mobile Ad hoc NETWORK), <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>.
- [2] CANO (J.-C.), MANZONI (P.), "A performance comparison of energy consumption for mobile Ad hoc network routing protocols", *IEEE/ACM Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems MASCOTS'00*, San Francisco, CA, pp. 57-64, August 2000.
- [3] OUKIL (L.), SENOUCI (S.-M.), PUJOLLE (G.), "Performance Comparison of Ad Hoc Routing Protocols Based on Energy Consumption", *Ambience Workshop'02*, pp. 24-25, Torino, Italy, September 2002.
- [4] PERKINS (C. E.), BELDING-ROYER (E. M.), DAS (S. R.), "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing", *IETF Internet Draft*, draft-ietf-manet-aodv-13.txt.
- [5] PERKINS (C. E.), BHAGWAT (P.), "Highly dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing for mobile computers", *ACM SIGCOMM'94*, pp.234-244, October 1994.
- [6] CLAUSEN (T.), JACQUET (P.), "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)", *IETF Internet Draft*, draft-ietf-manet-olsr-11.txt.
- [7] OGIER (R.), TEMPLIN (F.), LEWIS (M.), "Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF)", *IETF Internet Draft*, draft-ietf-manet-tbrpf-10.txt.
- [8] JOHNSON (D. B.), MALTZ (D. A.), HU (Y.-C.), "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)", *IETF Internet Draft*, draft-ietf-manet-dsr-09.txt.
- [9] MARINA (M. K.), DAS (S. R.), "Ad hoc on-demand multipath distance vector routing", *ACM SIGMOBILE*, **6**, n° 3, pp. 92-93, July 2002.
- [10] STEMM (M.), KATZ (R.H.), "Measuring and reducing energy consumption of network interfaces in hand-held devices", *IEICE Transactions on Communications*, **E80-B**, n° 8, pp. 1125-1131, August 1997.
- [11] UDANI (S.), SMITH (J.), "Power management in mobile computing (a survey)", University of Pennsylvania (1996), <http://www.cis.upenn.edu/~udani/papers.html>.

- [12] LETTIERI (P.), SRIVASTAVA (M.), "Advances in wireless terminals", *IEEE Personal Communications*, **6**, n° 1, pp. 6-18, February 1999.
- [13] CHANDRAKASAN (A.), BRODERSEN (R.W.), "Low Power Digital CMOS Design", *Kluwer Academic Publishers*, Norwell, MA, 1995.
- [14] JONES (C.E.), SIVALINGAM (K. M.), AGRAWAL (P.), CHEN (J.-C.), "A survey of energy efficient network protocols for wireless Networks", *ACM/Baltzer Journal on Wireless Networks*, **7**, n° 4, pp. 343-358, July 2001.
- [15] GOODMAN (D.), VALENZUELA (R.), GAYLIARD (K.), RAMAMURTHI (B.), "Packet reservation multiple access for local wireless communication", *IEEE Transactions on Communications*, **37**, n° 8, pp. 885-890, August 1989.
- [16] KAROL (M.J.), ZHAO (L.), ENG (K.Y.), "Distributed-queueing request update multiple access (DQRUMA) for wireless packet (ATM) networks", *IEEE International Conference on Communications (ICC 95)*, Seattle, USA, pp. 1224-1231, June 1995.
- [17] JUNG (E.), VAIDYA (N.), "An Energy-Efficient MAC Protocol for wireless LANS", *IEEE INFOCOM'02*, New York, USA, pp. 1756-1764., June 2002.
- [18] SIVALINGAM (K. M.), CHEN (J.-C.), AGRAWAL (P.), SIVASTAVA (M.), "Design and analysis of lower-power access protocols for wireless and mobile ATM networks", *ACM/Blatzer Wierless Networks*, **6**, n° 1, pp. 73-87, February 2000.
- [19] SINGH (S.), RAGHAVENDRA (C.S.), "PAMAS – power aware multi-access protocol with signalling for ad hoc networks", *ACM Computer Communication Review*, **28**, n° 3, pp. 5-26, July 1998.
- [20] WOESNER (H.), EBERT (J.-P.), SCHLAGER (M.), WOLISZ (A.), "Power-saving mechanisms in emerging standards for wireless LANS: The MAC Level Perspective", *IEEE Personal Communications*, **5**, n° 3, pp. 40-48, June 1998.
- [21] ZORZI (M.), RAO (R.R.), "Error control and energy consumption in communications for nomadic computing", *IEEE Transactions on Computers*, **46**, n° 3, pp. 279-289, March 1997.
- [22] LETTIERI (P.), FRAGOULI (C.), SRIVASTAVA (M.B.), "Low power error control for wireless links", *ACM/IEEE MOBI-COM'97*, Budapest, Hungary, pp. 139-150, September 1997.
- [23] NI (S.), TSENG (Y.), CHEN (Y.), CHEN (J.), "The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network", *ACM/IEEE MOBICOM'99*, Seattle, Washington, pp. 152-162, August 1999.
- [24] MALEKI (M.), DANTU (K.), PEDRAM (M.), "Power-aware source routing in mobile ad hoc networks", *International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED'02)*, Monterey, CA, pp. 72-75, August 2002.
- [25] WOO (K.), YU (C.), LEE (D.), YOUN (H. Y.), LEE (B.), "Non-blocking, localized routing algorithm for balanced energy consumption in mobile ad hoc networks", *IEEE/ACM Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS'01)*, Cincinnati, Ohio, pp. 117-124, August 2001.
- [26] MALEKI (M.), DANTU (K.), PEDRAM (M.), "Lifetime prediction routing in mobile ad hoc networks", *IEEE Wireless Communication and Networking (WCNC)*, **4**, n° 1, pp. 1185-1190, March 2003.
- [27] WATTENHOFER (R.), LI (L.), BAHL (P.), WANG (Y.-M.), "Distributed topology control for power efficient operation in multihop wireless ad hoc networks", *IEEE INFOCOM'01*, Anchorage, AK, pp. 1388-1397, April 2001.
- [28] RAMANATHAN (R.), ROSALES-HAIN (R.), "Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment", *IEEE INFOCOM'00*, Tel Aviv, Israel, pp. 404-413, March 2000.
- [29] STOJIMENOVIC (I.), LIN (X.), "Power-aware localized routing in wireless networks", *IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'00)*, Cancun, Mexico, pp. 371-376, May 2000.
- [30] ZORZI (M.), RAO (R.R.), "Energy efficiency of TCP in a local wireless environment", *ACM Mobile Networks and Applications*, **6**, n° 3, pp. 265-278, June 2001.
- [31] Intel Corporation, Microsoft and Toshiba Corporation, Advanced Configuration and Power Interface: <http://www.teleport.com/~api>.
- [32] AGRAWAL (P.), CHEN (J.-C.), KISHORE (S.), RAMANATHAN (P.), SIVA-LINGAM (K.M.), "Battery power sensitive video processing in wireless networking", *IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'98)*, Boston, MA, pp. 116-120, September 1998.
- [33] KAMERMAN (A.), MONTEBAN (L.), "waveLAN-II: A high-performance wireless LAN for the unlicensed band", *Bell Labs Technical Journal*, **2**, n° 3, pp. 118-133, Summer 1997.
- [34] ZENG (X.), BAGRODIA (R.), GERLA (M.), "GloMoSim: a library for parallel simulation of large-scale wireless networks", *Parallel and Distributed Simulations Workshop (PADS'98)*, Banff, Alberta, Canada, pp. 154-161, May 1998.
- [35] BOYAN (J.A.), LITTMAN (M.L.), "Packet routing in dynamically changing networks: A reinforcement approach", *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS'94)*, San Mateo, CA, **6**, pp. 671-678, January 1994.
- [36] NAVIDI (W.), CAMP (T.), BAUER (N.), "Improving the accuracy of random waypoint simulations through steady-state initialization", *International Conference on Modelling and Simulation (MS'04)*, Marina del Rey, CA, pp. 319-326, March 2004.
- [37] YOON (J.), LIU (M.), NOBLE (B.), "Random waypoint considered harmful", *IEEE INFOCOM'03*, San Francisco, CA, pp. 1312-1321, April 2003.