

CHAPITRE 6

LES PROTOCOLES DE ROUTAGE EN PRÉSENCE D'UNE DORSALE

6.1 Introduction

Les réseaux *ad hoc* que nous considérons sont multi saut. Le trafic de donnée envoyé par la source vers une destination doit être relayé par les nœuds intermédiaires. Dans un réseau *ad hoc* tous les nœuds doivent collaborer pour acheminer le trafic. Les paquets de données vont alors être transmis de proche en proche jusqu'à la destination. Même si aucune technologie sans fil n'a été conçue spécifiquement pour les réseaux *ad hoc*, dans le sens où elle est conçue pour les réseaux filaires, il est possible d'utiliser les technologies sans fil actuelles en leur ajoutant les protocoles adéquats pour faire fonctionner un réseau *ad hoc*. Par exemple, on peut ajouter le standard 802.11, qui ne permet que la communication entre mobiles dans la portée de communication, un protocole de routage adéquat qui rendra la communication possible entre les mobiles dans le réseau.

L'absence d'infrastructure et la dynamique des terminaux dans un réseau *ad hoc* rendent la tâche moins facile pour un protocole de routage afin de trouver un chemin entre source et destination. Les protocoles de routage élaborés et utilisés dans les réseaux filaires ne sont plus compatibles et ne peuvent pas être utilisés par la suite dans les réseaux *ad hoc*. De nombreux protocoles de routage ont donc été proposés pour réaliser les communications multi saut et la rendre plus efficace (moins de retransmissions, chemins plus courts, etc.).

Dans le chapitre 2, nous avons présenté, quelques protocoles de routage développés dans le cadre du groupe de travail MANET de l'IETF. Ces protocoles sont définis au niveau IP et sont donc indépendants des couches physiques et MAC. Le routage IP permet en particulier une interconnectivité aisée avec toutes sortes d'autres réseaux ou de matériel. Les protocoles présentés sont parmi les représentatifs des diverses techniques utilisées pour le routage *ad hoc*. La première partie de ce chapitre est consacrée à la comparaison de quatre protocoles de routage; un protocole proactif (OLSR) et trois protocoles réactifs (AODV, DSR et TORA) sans l'utilisation d'une dorsale. Nous voudrions étudier leurs comportements face à la mobilité. Pour réaliser cette comparaison, nous avons défini cinq métriques : le taux de paquets délivrés, le nombre moyen de sauts, le nombre de paquets transmis par le nombre de paquets de données délivrés, le nombre d'octets utilisés pour le trafic de contrôle et le délai de bout en bout. Dans la deuxième partie, nous présenterons les changements apportés aux protocoles AODV, DSR et TORA pour qu'ils puissent être opérationnels avec une dorsale virtuelle. Nous évaluerons ainsi l'amélioration de leurs performances en présence de la dorsale.

6.2 Protocoles de routage sans dorsale

Dans cette section, nous allons évaluer l'effet de la mobilité sur certains protocoles et comparer leur performance. Nous nous sommes limités dans cette comparaison aux protocoles implémentés dans OPNET (DSR, AODV, TORA et OLSR). Pour le modèle de mobilité, nous avons utilisé le modèle *Random Waypoint Model* (RWP) modifié. Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre précédent, le modèle original présente des faiblesses. Nous avons alors tenu compte des recommandations données par [Bettstetter et al. (2003)].

Nous considérons un réseau d'une taille de 50 nœuds, uniformément placés dans une zone carrée ($1,5 \text{ km} \times 1,5 \text{ km}$). Tous les nœuds ont une portée radio de 300m. Une quarantaine de sessions (sources, destinations) sont considérées pour effectuer une moyenne empirique. Le trafic est différent pour chaque paire (Source, Destination). Un

taux de transmission de paquets constant (CBR) est choisi avec les paramètres suivants : chaque source transmet les paquets de données à un taux variant de 1 à 8 paquets/s. La taille des paquets de données est fixe et égale à 512 octets. Le choix des paquets de petite taille est une façon de pénaliser le protocole [Johansson *et al.* (1999)]. Le temps d'arrivée des paquets est une variable aléatoire suivant une distribution exponentielle en moyenne de 300 *ms*. Les résultats de simulation sont obtenus en utilisant une couche MAC et physique IEEE 802.11b, qui est le standard implémenté dans le simulateur OPNET.

Nous avons également défini un certain nombre de métriques utilisées dans le but de comparer le comportement de chacun des protocoles. Quelques-unes de ces métriques ont été proposées par le groupe de travail MANET de l'IETF dans l'objectif d'évaluer les protocoles de routage :

- **Taux de paquets délivrés** : il est défini comme étant le rapport (en pourcentage) du nombre total des paquets de données délivrés aux destinations par le nombre total de paquets générés par les sources. En d'autres termes, vis-à-vis de la stabilité des chemins, cette métrique reflète en quelque sorte l'efficacité du protocole de routage.
- **Nombre de sauts** : c'est le nombre moyen de sauts que les paquets de données effectueront pour atteindre la destination. Un nombre réduit de saut indique l'efficacité de la procédure de sélection de route. Pour deux protocoles ayant un taux de livraison comparable, ils seront alors comparés par le nombre moyen de sauts. Cependant, si les protocoles ont des taux de livraison différents (spécifiquement dans les réseaux avec taux de mobilité élevé où les liens changent fréquemment), le nombre de sauts est relié au taux de livraison des paquets, c'est-à-dire, plus le taux de livraison augmente plus le nombre de sauts augmente. Puisque, seuls les paquets de données qui arrivent à destination sont considérés, un nombre de saut minimum implique que tous les paquets de données délivrés sont destinés aux nœuds à proximité et les paquets envoyés aux

nœuds éloignés seront abandonnés. Ainsi, la mesure du nombre de sauts fournit de l'information sur la capacité de survie du protocole.

- **Nombre de paquet de données transmis par rapport au nombre de paquets de données délivrés** : le nombre de paquets transmis, du point de vue réseau, prend en considération chaque retransmission de paquet de données pour chaque nœud. Il inclut la transmission des paquets qui ont été éventuellement abandonnés et retransmis par les nœuds intermédiaires. Plus ce rapport augmente plus le nombre de paquets de données redondants dans le réseau augmente. Alors, il est préférable d'avoir un rapport qui est de l'ordre du nombre de sauts.
- **Nombre d'octets utilisés pour le trafic de contrôle** : ce nombre inclus l'*overhead* dans les paquets de données (la séquence de route pour DSR par exemple) ainsi que tous les paquets de contrôle. Le nombre total d'octets envoyés durant la simulation sera comptabilisé. Seul l'*overhead* de la couche réseau (niveau IP) est pris en considération. Ce nombre peut être considéré comme étant l'efficacité du protocole de routage en terme d'utilisation de la bande passante [Corson et Macker (1999)].
- **Délai de bout en bout** : c'est le délai moyen, mesuré en milliseconde (*ms*), entre la génération d'un paquet de données par la source et la réception par la destination. Il inclut le temps d'acquisition d'une route, le temps de traitement, le délai dans la file d'attente à chaque nœud intermédiaire entre source et destination, et le délai de propagation. Le délai de bout en bout est comptabilisé uniquement pour les paquets qui se rendent à la destination.

6.2.1 Taux de paquets délivrés

La figure 53 illustre le taux de paquets délivrés pour les quatre protocoles. Tous ces protocoles performant mieux quand la mobilité est faible. À une vitesse moyenne nulle le taux exède 95 %. Quand la mobilité croît, le taux de livraison des paquets décroît pour tous les protocoles. La mobilité des nœuds engendre directement un changement dans la

topologie du réseau et par la suite une recherche d'une nouvelle route est nécessaire. Le protocole performe alors suivant le mécanisme de maintenance de route utilisé.

En général, les protocoles réactifs (à la demande) DSR et TORA, à l'exception d'AODV, possèdent un taux de livraison de paquets assez important. Ils performent mieux comparés au protocole proactif (OLSR). TORA performe mieux que DSR. Pour DSR et dans la situation où la mobilité est élevée, les nœuds intermédiaires n'ont pas de mécanisme de récupération pour déterminer des routes alternatives. Quand une route se brise, un message d'erreur est envoyé jusqu'à la source, la source recommence alors une nouvelle recherche pour une autre route, des paquets sont alors perdus. Ainsi, nous trouverons que le délai pour découvrir une route joue un rôle important dans la dégradation des performances quand la mobilité est importante.

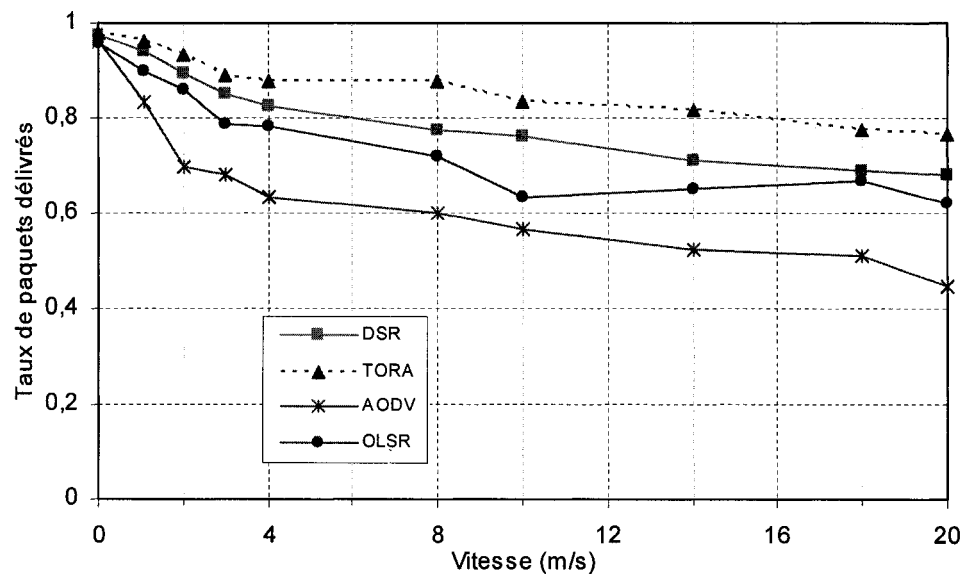


Figure 53 Taux de paquets délivrés en fonction de la mobilité

Le protocole AODV éprouve de la difficulté quand les nœuds se déplacent à une vitesse importante. Le routage basé sur la source (utilisé par DSR) révèle plus d'informations

dans la découverte d'une route que dans l'AODV. Par conséquent, pour une même période de temps, il y aura plus de routes qui sont découvertes et par la suite plus de paquets seront délivrés.

Le protocole OLSR est sensible à la mobilité, les messages de mise à jour sont échangés périodiquement et non à la suite d'un changement de situation. Les routes deviennent moins précises quand la mobilité augmente. Certaines informations sur l'état des liens maintenus dans les tables de routage sont imprécises. L'ajustement de la période de mise à jour pourra résoudre ce problème.

6.2.2 Nombre de sauts

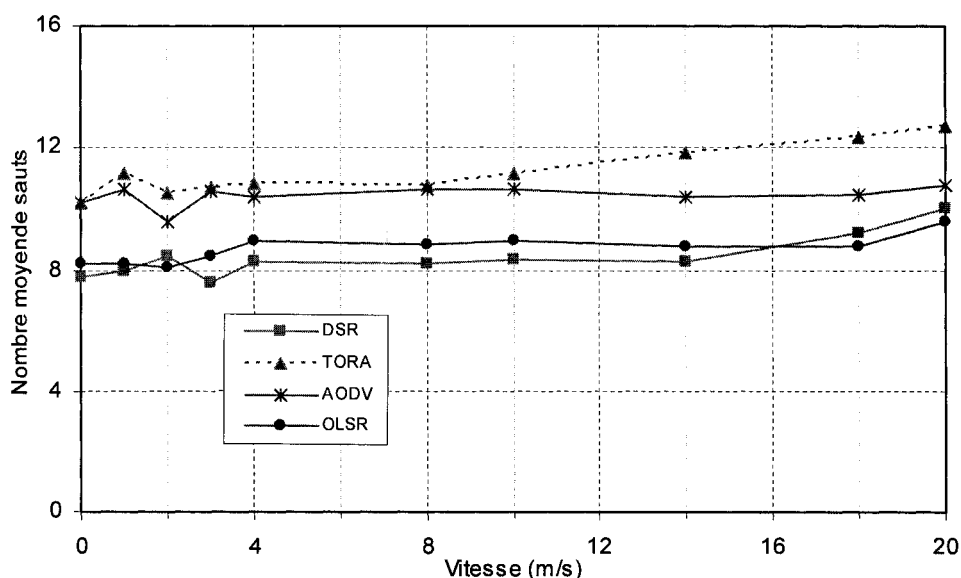


Figure 54 Nombre moyen de sauts en fonction de la mobilité

Comme nous l'avons mentionné, le nombre moyen de sauts ne concerne que les paquets délivrés avec succès jusqu'à destination. À l'exception du protocole TORA qui ne minimise pas le nombre de sauts pour choisir le meilleur chemin, la figure 54 révèle que les protocoles qui délivrent plus de paquets de données (comme indiqué à la figure 53) possèdent un nombre de sauts moins important. Ceci s'explique par le fait que si la

distance entre source et destination est importante, le nombre de nœuds intermédiaires que les paquets de données vont traverser augmente et par la suite la probabilité qu'un paquet soit abandonné devient plus importante. Le nombre de sauts dépend principalement de la manière dont le protocole de routage a implémenté son mécanisme de maintenance d'une route pour trouver une route alternative.

6.2.3 Nombre de paquets transmis par le nombre de paquets de données délivrés

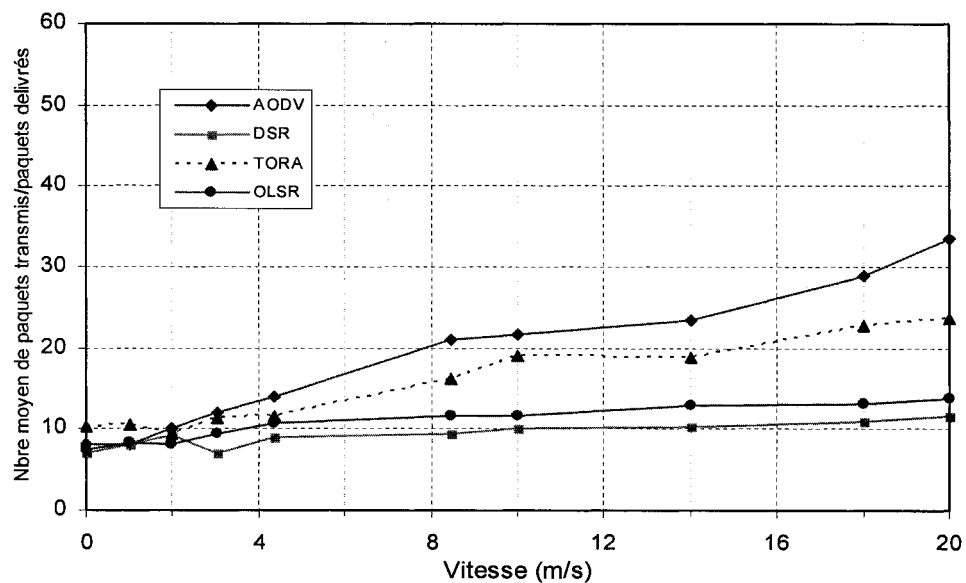


Figure 55 Nombre moyen de paquets transmis par paquets délivrés en fonction de la mobilité

Parmi les protocoles réactifs, DSR performe mieux en ce qui a trait au nombre de paquets de données transmis par le nombre de paquets de données délivrés (figure 55). En effet, DSR possède un dispositif de récupération (*salvation*) efficace où un nœud qui détecte une route brisée récupère les données et les envoie via une autre route vers la destination, une route connue et enregistrée dans la cache. Ainsi, les paquets sont abandonnés moins fréquemment comparé aux autres protocoles.

Le protocole OLSR présente des résultats comparables à ceux de DSR. La sélection des relais multipoint et l'échange périodique des tables de routage permettent de minimiser la retransmission des paquets de données dans le réseau. Pour TORA et AODV, le nombre de retransmissions croît en fonction de la mobilité. Le protocole AODV possède les pires résultats ce qui explique, en partie, la dégradation de son taux de paquets délivrés (figure 53).

6.2.4 Nombre d'octets utilisés pour le trafic de contrôle

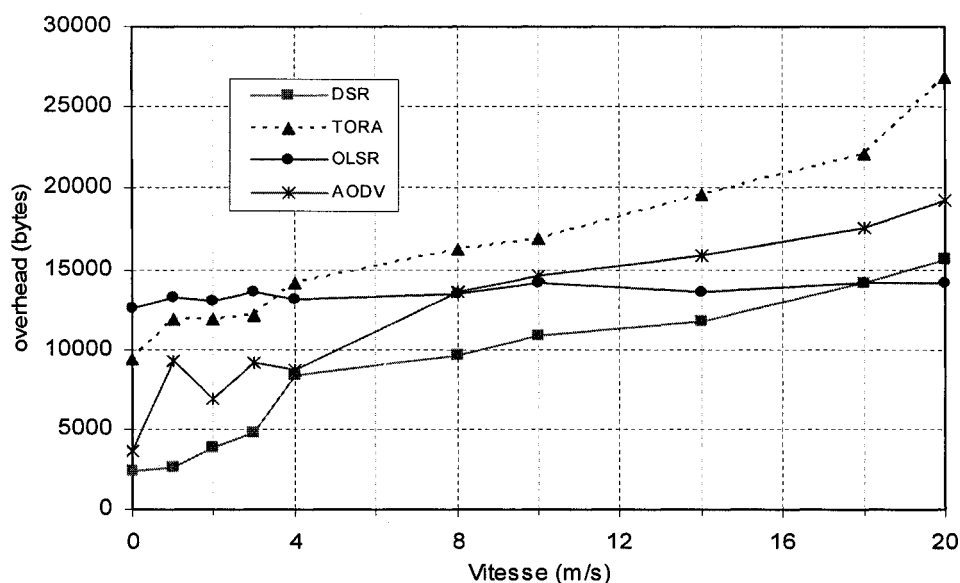


Figure 56 Nombre d'octets utilisés pour le trafic de contrôle en fonction de la mobilité

D'après les courbes de la figure 56, nous pourrions remarquer que, pour une mobilité réduite, les protocoles de routage réactifs (DSR, AODV et TORA) utilisent moins de trafic de contrôle comparé au protocole proactif (OLSR). Le trafic de contrôle utilisé par le protocole OLSR est quasiment constant et dépend peu de la mobilité; la mise à jour dans OLSR se fait de façon périodique et non pas à la suite d'un déplacement des nœuds. Pour un niveau de mobilité élevé, les protocoles de routage réactifs possèdent un trafic de contrôle important. Ceci est dû principalement aux procédures répétitives pour

déterminer une nouvelle route utilisées par les protocoles de routage. Le protocole DSR performe mieux que les autres protocoles réactifs. En effet, dès qu'il détecte qu'une route n'est plus valide. Dans DSR *l'overhead* provient principalement de la séquence des nœuds intermédiaires inscrite dans le paquet pour atteindre la destination.

6.2.5 Délai moyen de bout en bout

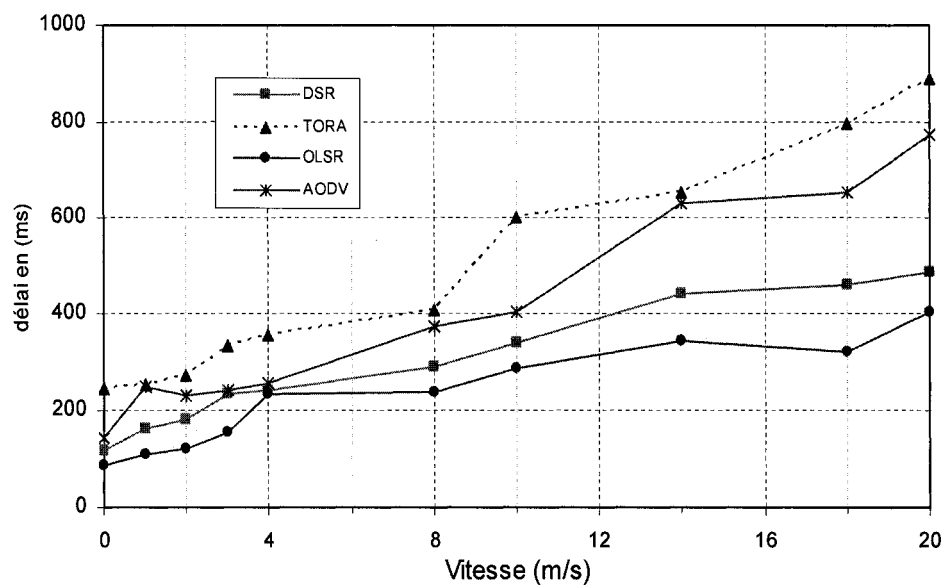


Figure 57 Délai moyen en fonction de la mobilité

La figure 57 illustre le délai moyen de bout en bout entre source et destination. Comme prévu, le protocole OLSR possède un délai plus faible comparé aux autres protocoles réactifs. OLSR est un protocole proactif : quand un paquet arrive à un nœud il sera retransmis immédiatement ou bien abandonné. Pour les protocoles réactifs, il n'existe pas de route vers une destination donnée, les paquets seront sauvegardés dans un tampon jusqu'à ce qu'une nouvelle route soit déterminée. De plus, nous remarquons que pour le protocole OLSR le délai ne varie pas beaucoup avec la mobilité.

Grâce à la manière dont le protocole DSR détecte la non-validité d'une route, il possède le plus faible délai parmi les protocoles réactifs. Avec DSR, la procédure d'acquisition

d'une route dans DSR permet de déterminer plus qu'une route et de la stocker dans la cache, alors que dans AODV, une seule route est déterminée par RREQ. Les protocoles TORA et AODV possèdent les pires résultats en termes de délai. Pour le protocole TORA, le délai est dû principalement par la perte des informations sur la distance au fur et à mesure qu'il a progression dans la route. Tandis que pour le protocole AODV, le délai est dû au fait que ce protocole maintient les routes dans un état mou (*soft state*), et elles expireront après un *time-out*. Ainsi, une nouvelle procédure de découverte de route est initiée. Dans un environnement où la mobilité est importante, les routes sélectionnées par les messages *RREQ* peuvent ne plus être valables quand la source commence l'envoi des paquets de données ou même quand les messages *RREP* sont retournés. Ainsi, le délai engendré par la procédure de découverte d'une route augmente.

6.2.6 Interprétation des résultats de simulation

D'après les résultats de simulation d'un protocole de routage réactif (OLSR) et trois protocoles de routages réactifs (AODV, DSR et TORA) nous pouvons déduire les remarques suivantes :

- La performance de ces protocoles se dégrade en présence de la mobilité. Quand la mobilité augmente, le taux de paquets délivrés diminue, le trafic de contrôle augmente, le délai augmente, etc. Toutefois, le protocole OLSR performe mieux que les autres dans un environnement dynamique en termes de trafic de contrôle et de délai. Le trafic du contrôle est presque constant pour OLSR alors qu'il augmente rapidement pour les autres protocoles. Pour OLSR, l'échange du trafic de contrôle se fait de façon périodique et ne dépend que de la taille de l'ensemble MPR qui dépend de la taille du réseau.
- Le délai croît avec la mobilité pour tous les protocoles. Cependant, pour OLSR cette croissance est moins rapide. La dynamique du réseau engendrée par le mouvement des nœuds fait en sorte que l'information dans la cache n'est pas valide. OLSR qui effectue un échange périodique aura une information plus

fraîche. La période de mise à jour peut améliorer encore le délai pour OLSR. Toutefois, le trafic de contrôle sera plus important.

- La mobilité des nœuds a un effet direct sur le taux de paquets délivrés à la destination. En effet, il décroît rapidement dès que le niveau de mobilité augmente (moins de 90% pour une vitesse moyenne de 2 *m/s*). Cependant, les protocoles réactifs TORA et DSR résistent mieux face à la mobilité et délivrent plus de paquets de données comparé à OLSR et AODV.

6.3 Protocoles de routage avec dorsale

Nous proposons dans cette section de vérifier au moyen des simulations comment l'utilisation d'une dorsale améliore les performances de certains protocoles. Nous limitons notre étude à trois protocoles c'est-à-dire DSR, AODV et TORA pour les raisons suivantes :

- ces trois protocoles sont déjà implémentés dans OPNET (version 11),
- le protocole OLSR utilise le principe de relais multipoint MPR.

Des travaux de recherche, menés par [Adjih *et al.* (2005)] et [Wu et Lou (2004)], ont été approfondis pour approximer l'ensemble de domination connexe à partir de l'ensemble des relais multipoints. De plus, les résultats de simulation du chapitre 4 illustrent que la diffusion qui utilise les relais multipoint et la dorsale est comparable dans certaines mesures. Nous résumons les principaux changements apportés aux protocoles de routage par rapport à leur version originale.

6.3.1 *DSR over Backbone (DSRoB)*

Comme dans la description du protocole DSR, DSRoB utilise les messages RREQ, RREP et RERR dans la découverte d'une route. Toutefois, la diffusion ne se fait que

dans les nœuds qui forment la dorsale jusqu'au nœud dominant voisin de la destination. En d'autres termes, les nœuds ordinaires n'auront pas à retransmettre ces messages même s'ils les reçoivent. Dans l'exemple de la figure 58, la diffusion du message RREQ se fait uniquement par les nœuds de la dorsale, la dorsale étant formée par l'ensemble des nœuds {1, 3, 5 et 8}. Rappelons qu'avec la dorsale, chaque nœud qui n'en est pas membre y possède au moins un voisin. La source, nœud 1, qui désire envoyer du trafic à la destination, nœud 9, lance la recherche d'une route par l'envoi du message RREQ au nœud de la dorsale 3. Le message RREQ va alors se propager dans la dorsale uniquement jusqu'à destination. Les autres nœuds {2, 4, 6 et 7} ne diffusent pas le message même s'ils le reçoivent.

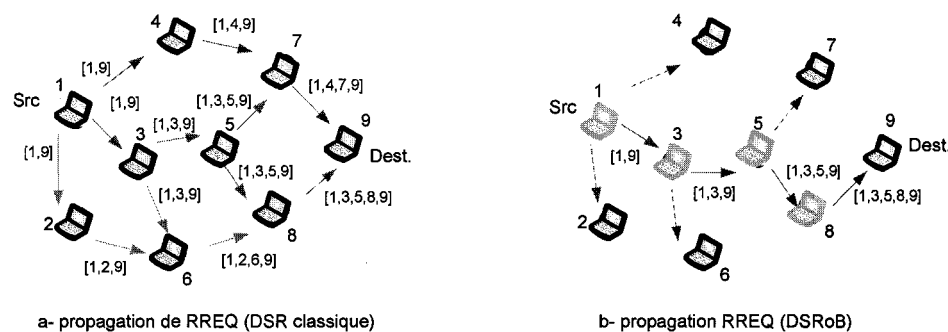


Figure 58 Propagation du message RREQ dans DSRoB

L'utilisation d'une dorsale avec le protocole DSR, permet de :

- minimiser les messages RREQ diffusés dans le réseau et par la suite minimiser les messages RREP dans le chemin de retour. Un seul chemin de retour sera envoyé, non pas comme dans le DSR classique où chaque nœud qui peut joindre la destination peut retourner au moins avec un chemin réalisable,
- éliminer la procédure *Ring Zero Search*. En effet avec les informations que possède chaque nœud de la dorsale cette procédure ne sera pas utile. La source va toujours envoyer sa demande au nœud dominant le plus proche et c'est le rôle de ce dernier de vérifier si la destination est voisine. En effet, le nœud de la dorsale possède l'information sur tous les nœuds qu'il peut desservir. Rappelons

que cette procédure consiste à envoyer le message RREQ à un saut afin de vérifier si la destination se retrouve au voisinage,

- améliorer la procédure de récupération de données (*salvation mechanism*) utilisée par DSR. Dans DSR, les paquets non délivrés sont récupérés aux nœuds intermédiaires en utilisant des routes alternatives qui existent dans la cache. En plus de ce mécanisme pour la récupération de données, DSRoB utilise aussi des informations obtenues lors de la maintenance de la dorsale. Un mécanisme simple pour réparer une route qui n'est plus disponible consiste à examiner la séquence de nœuds dans le paquet et à localiser un nœud que nous connaissons avec le chemin basé sur l'information lors d'une maintenance. La séquence de nœuds sera alors modifiée. Si le même nœud se retrouve deux fois dans la nouvelle séquence ceci indique qu'il y a une boucle et le paquet sera abandonné.

6.3.2 *AODV over Backbone (AODVoB)*

Comme présenté à la section 2.3.2.2, le protocole AODV repose sur trois principales composantes :

- l'initiation et la propagation des messages RREQ,
- l'initiation et la propagation des messages RREP,
- la maintenance de tables de vecteurs de distance.

Dans AODVoB, seule la propagation des messages RREQ est différente. En effet, la diffusion de RREQ se fait comme dans DSRoB. Quand une source envoie le message RREQ pour une route vers une destination, le message ne se propage que dans les nœuds qui forment la dorsale jusqu'au nœud dominant directement connecté à la destination. La destination répond alors par un message RREP. La propagation du message RREP est la même comme dans AODV, le RREP arrivant à la source avec une mise à jour du numéro de séquence de la source. Tous les nœuds intermédiaires recevant le message RREP mettent à jour leurs tables de routage avec le nouveau numéro de séquence de la

source. A contrario dans le protocole AODV, il y aura moins de RREP en retour étant donné que le nœud de destination possède un voisin direct dominant de la dorsale et la route passera par ce dominant.

L'utilisation d'une dorsale avec le protocole AODV permet de :

- minimiser l'*overhead* dans RREQ, la propagation des messages RREQ dans la dorsale réduit le calcul de l'*overhead* dans le message RREQ. Alors qu'AODV diffuse le message RREQ dans pratiquement tous les nœuds du réseau, AODVoB restreint cette diffusion dans la dorsale uniquement,
- éliminer la procédure *Ring Zero Search*, comme dans DSRoB. La source va toujours envoyer sa demande au nœud dominant le plus proche de la dorsale et c'est le rôle de ce nœud de vérifier si la destination est dans son voisinage,
- maintenir une route AODVoB utilise le même principe que DSRoB pour la maintenance d'une route, suite à un changement dans la topologie, à l'exception de la séquence des nœuds qui n'existent pas dans DSRoB. Dans AODVoB, la dorsale maintient des informations explicites pour trouver une nouvelle route quand l'ancienne route n'est plus valable. Quand le message RREP est retourné vers la source, chaque nœud intermédiaire de la dorsale qui reçoit ce message va ajouter l'identificateur du nœud prochain à la dorsale dans le chemin vers la destination. Quand une route n'est plus valable, le dominant en amont va tenter, avec l'information qu'il possède après la maintenance, de trouver le prochain nœud pour la destination.

6.3.3 **TORA over Backbone (TORAoB)**

Le protocole TORA a été conçu dans le but d'éliminer les boucles de routage en utilisant le principe des graphes acycliques orientés (DGA). Le même principe est utilisé dans TORAoB, cependant un DGA de taille plus petite sera formé ; seuls les membres de la

dorsale participent à la formation d'un DGA vers une destination donnée. Le nombre de messages QRY/UPD qui transitent dans le réseau sera alors minimisé. Par le même principe, les messages CLR utilisés lors d'une détection de défaillance ne seront pas diffusés dans tout le réseau.

La détermination des chemins optimaux ne fait pas partie des principales tâches du protocole TORA. Toutefois, ceci peut être amélioré en présence de la dorsale étant donné que les nœuds qui forment la dorsale sont connectés de façon minimale.

6.3.4 Évaluation des performances

Dans cette section, nous allons utiliser les mêmes critères de performances tels que définis dans la section 6.2. Autrement dit, nous allons examiner le taux de paquets délivrés, le nombre moyen de sauts, le nombre de paquets de données transmis par rapport au nombre de paquets de données délivrés, le nombre d'octets utilisés pour le trafic de contrôle et le délai moyen de bout en bout. D'autre part, nous allons également utiliser les mêmes paramètres de simulation définis dans la section précédente pour évaluer les performances des protocoles de routage en présence d'une dorsale (DSRoB, AODVoB et TORAoB) et en fonction de la mobilité.

En plus de la mobilité, nous allons prendre en considération la charge dans le réseau. A cet effet, nous allons examiner dans un premier temps la variation du taux de paquets délivrés et le délai de bout en bout en fonction de la charge exprimée en termes du nombre de communications simultanés (session).

Nous allons considérer un réseau de taille 50 nœuds et une vitesse moyenne des nœuds de 10 *m/s*. Les nœuds sont placés aléatoirement dans un plan de taille 1.5 *km* x 1.5 *km* et la durée de simulation est de 250*s*. Un trafic de type CBR est généré entre deux paires de nœuds (sources, destinations). Chaque source possède un taux de transmissions entre 1 à 8 paquets/s et la taille des paquets est égale à 512 octets. Afin de varier la charge dans le

réseau, nous allons varier le nombre de session de 10 à 100. Cette série de simulation est effectuée dans un réseau sans dorsale.

Les résultats de simulation, figure 59-a, nous montrent que le délai de bout en bout augmente graduellement avec la charge dans le réseau. La charge du réseau est exprimée en nombre de session simultanée. Il est important de voir que pour un nombre de session supérieure à 70, on arrive à une charge où le réseau commence à être congestionné. La figure 59-b confirme ce que nous venons de dire, en effet, avec un nombre de session élevé (>70), les trois protocoles n'arrivent pas à livrer plus que la moitié du trafic. Ceci est expliqué par le fait que le nombre *d'overhead* de contrôle généré augmente ce qui laisse moins de bande passante disponible pour le trafic de données et ce qui augmente la chance des paquets droppés dû à la collision et au débordement des files d'attente dans les nœuds.

Dans la suite, nous allons considérer deux niveaux de charge ; une charge moyenne (zone linéaire figure 59-a) réalisée par 40 sessions et un niveau de charge élevée (réseau congestionné) pour un nombre de session égale à 80.

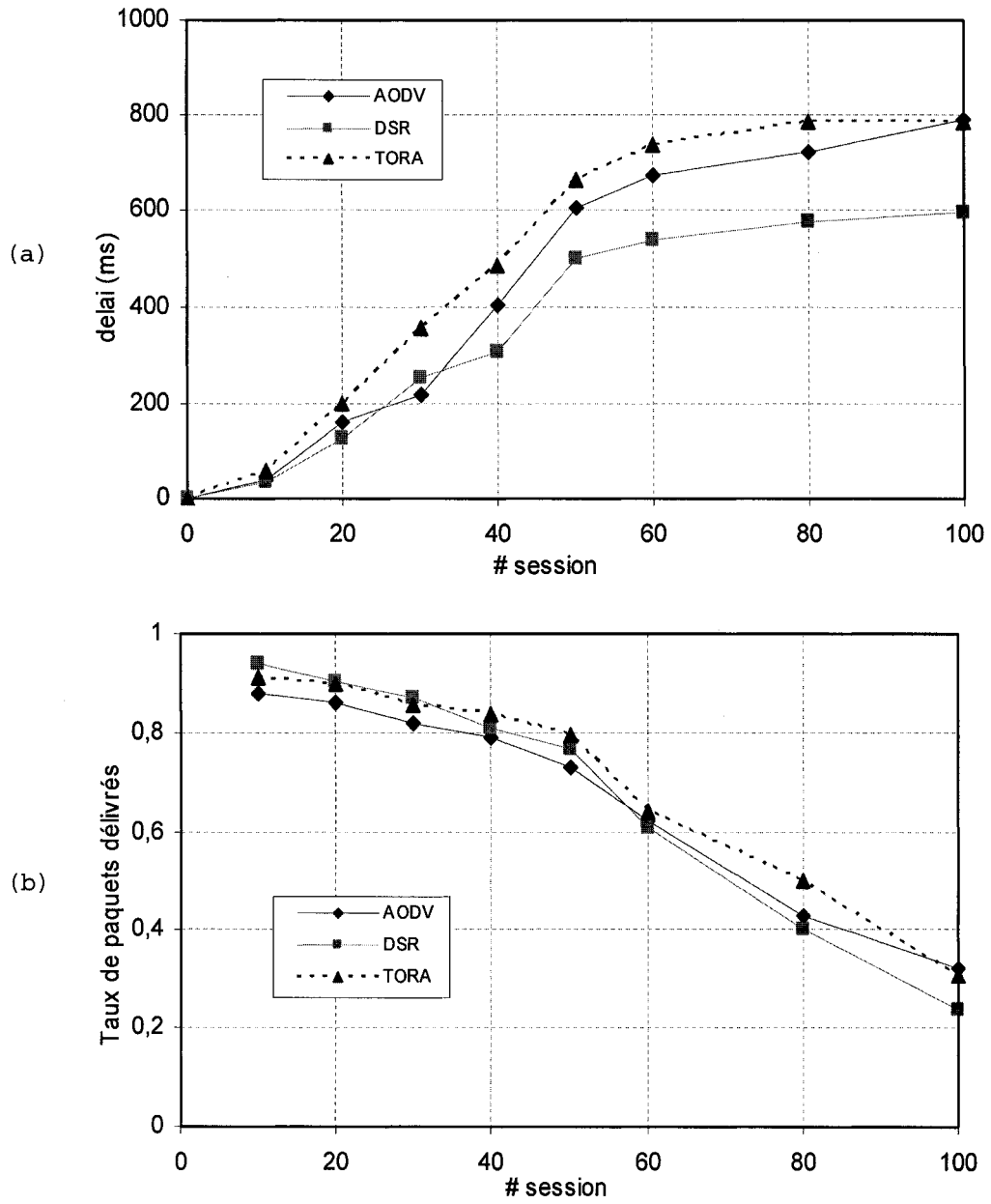


Figure 59 Délai de bout en bout et taux de paquets délivrés en fonction de la charge du réseau (# session)

6.3.4.1 Taux de paquets délivrés

Dans cette section, le taux de paquets délivrés est illustré dans la figure 60 pour les trois protocoles de routage (AODV, DSR et TORA) avec et sans dorsale. Rappelons que ce taux représente le nombre de paquets de données délivrés aux destinations par le nombre de paquets générés par les sources. Nous examinons deux niveaux de charge, soit une charge moyenne (40 sessions) et une charge élevée (80 sessions). Sur la figure 60, le nombre entre parenthèses indique le nombre de session.

D'après les résultats de simulations, nous pouvons remarquer qu'il y a une amélioration des performances des protocoles de routage en présence de la dorsale pour les niveaux de charge moyen et élevé. Pour un niveau de charge moyen, le taux de paquets délivrés peut atteindre les 80% pour les trois protocoles et pour une mobilité assez élevée (20m/s). Cette amélioration est de l'ordre de 17 % pour AODV, 12 % pour DSR et 4 % pour TORA par rapport à leur version originale. Cette amélioration est à l'origine principalement de la réduction des messages de contrôle (RREQ et RREP dans DSR et AODV et *Query* et *Update* dans TORA). En effet, les messages de contrôle ne sont plus diffusés dans tout le réseau, seuls les nœuds dominants échangent ces messages. Une réduction des messages de contrôle engendre une bande passante plus disponible pour le trafic de données.

Pour un niveau de charge élevé (80 session), les trois protocoles éprouvent la difficulté à délivrer plus que 80% des paquets pour une mobilité faible. Un nombre de session élevé engendre une augmentation du trafic de contrôle et par la suite une bande passante moins disponible pour le trafic de données. Un grand nombre de paquets sera droppé dans les nœuds congestionnés. Le protocole DSR performe mieux que les deux autres protocoles (AODV et TORA) pour un niveau de charge moyen et élevé en présence de la dorsale.

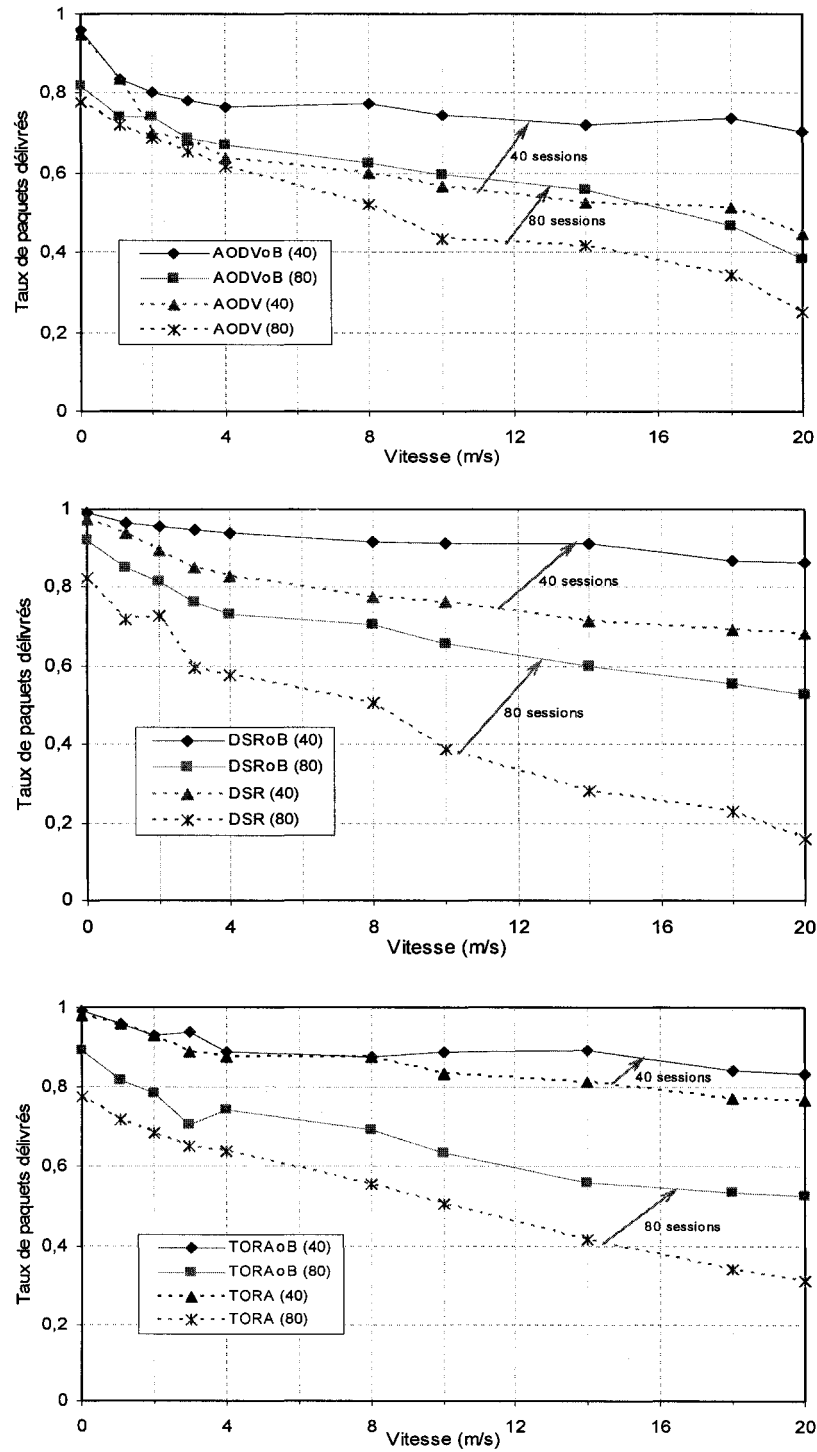


Figure 60 Nombre de paquets délivrés par rapport au nombre de paquets envoyés en fonction de la mobilité

6.3.4.2 Nombre de sauts

La figure 61 illustre les résultats de simulation du nombre de sauts moyen en fonction de la mobilité. Pour des raisons de clarté graphique, nous avons représenté uniquement les résultats pour une charge moyenne (40 sessions). En effet, les résultats de simulations obtenus pour une charge élevée (80 sessions) sont très proches de ceux pour une charge moyenne. Ceci est tout à fait raisonnable étant donné que le nombre de sauts est calculé uniquement pour les paquets qui se rendent à la destination et il ne dépend que de la disponibilité de la route entre la source et la destination.

D'après les résultats de simulation, nous ne remarquons pas beaucoup d'amélioration des performances des protocoles de routage en termes de nombre de sauts quand la dorsale est utilisée. Seul le protocole TORA a pu bénéficier de la présence de la dorsale et le nombre de sauts a diminué d'un peu plus de 10 %. Rappelons que le protocole TORA ne possède pas de mécanisme qui lui permet de déterminer les routes optimales. TORAoB bénéficie des informations sur la topologie lors de la construction et de la maintenance de la dorsale pour diminuer le nombre moyen de sauts entre la source et la destination.

Le protocole AODV se comporte pratiquement de la même façon en absence ou en la présence d'une dorsale, alors que le protocole DSR ne tire pas d'avantage de la présence de la dorsale en ce qui concerne le nombre moyen de sauts. Les routes sont plus longues pour DSRoB. En utilisant la dorsale, les routes doivent passer par les nœuds dominants qui, dans certains cas, ne sont pas minimales.

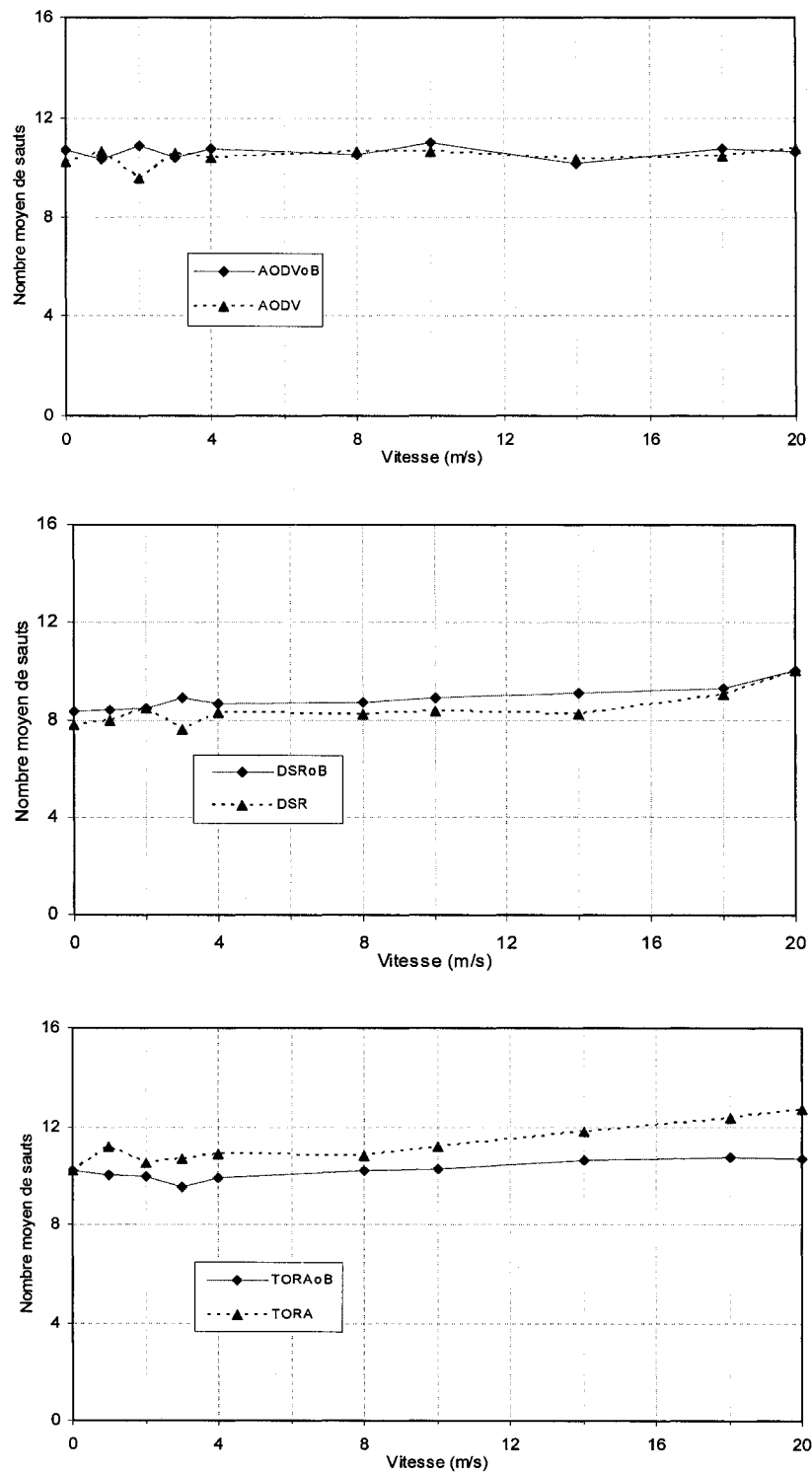


Figure 61 Nombre moyen de sauts en fonction de la mobilité

6.3.4.3 Nombre de paquets de données transmis par rapport au nombre de paquets de données délivrés

Dans cette simulation, nous avons évalué le nombre de paquets de données retransmis par tous les nœuds intermédiaires par rapport au nombre de paquets délivrés aux destinations. Ce nombre nous permet d'obtenir l'information sur le nombre de retransmissions nécessaires des paquets de données pour se rendre à la destination. Comme nous l'avons mentionné dans la section 6.2, il est préférable d'avoir un nombre de l'ordre du nombre de sauts moyen. En effet, plus ce nombre dépasse le nombre de sauts moyen, plus il y a des paquets de données redondants dans le réseau.

Les résultats de la figure 62 montrent que le nombre de retransmission des paquets augmente quand la charge dans le réseau augmente. Cette augmentation est due principalement au non disponibilité des routes entre la source et la destination ; les nœuds intermédiaires sont surchargés. Avec l'utilisation de la dorsale, nous avons remarqué que le nombre de retransmissions dans le réseau a été considérablement réduit particulièrement pour les deux protocoles AODV et TORA, qui possèdent des résultats déplorables en absence de la dorsale. Cette réduction est due essentiellement à l'information disponible dans les nœuds dominants. Cette information sera alors utilisée par le protocole de routage en question pour acheminer ses paquets de données vers la destination.

Pour une charge moyenne ou élevée, la présence d'une dorsale a permis de réduire le nombre de retransmissions non utiles dans le réseau : une réduction en nombre de retransmissions de l'ordre de 20 % et 30 % pour les protocoles AODV et TORA respectivement. Pour le protocole DSR, il n'y a pas de réduction significative (2 %) dans le cas d'une charge moyenne, alors que cette réduction est de l'ordre de 20% pour une charge élevée. Rappelons que DSR utilise une technique de récupération qui lui permet d'arrêter la retransmission une fois qu'il détecte qu'une route n'est plus valide.

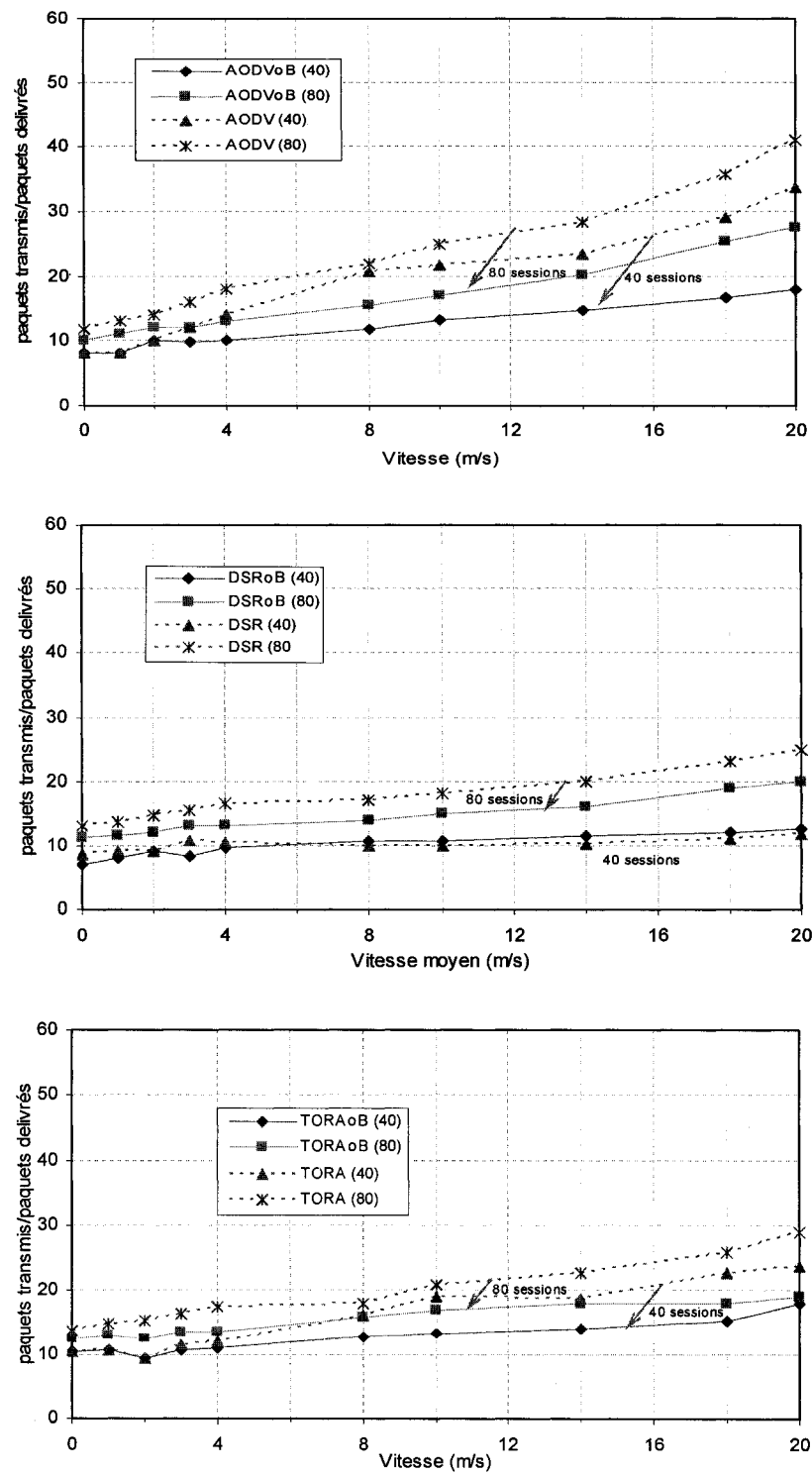


Figure 62 Nombre moyen de paquets transmis par paquets délivrés en fonction de la mobilité

6.3.4.4 Nombre d'octets utilisés pour le trafic de contrôle

Comme illustré sur la figure 63, le trafic de contrôle pour tous les protocoles réactifs a été considérablement réduit quand la dorsale est utilisée et il croît légèrement en fonction de la mobilité. Pour un système statique (vitesse nulle) ou une mobilité faible nous remarquons que le trafic de contrôle en présence de la dorsale est plus important que celui sans dorsale pour les trois protocoles de routage. Le trafic additionnel provient du trafic utilisé par la maintenance de la dorsale. Ceci est observé pour les deux niveaux de la charge dans le réseau et pour la plupart des protocoles de routage.

Quand la mobilité augmente, le trafic de contrôle augmente légèrement. Cette légère augmentation du trafic de contrôle peut être expliquée par le fait que la taille de la dorsale augmente en fonction de la mobilité (comme nous l'avons discuté dans le chapitre précédent). Rappelons que le trafic de contrôle est échangé uniquement par les nœuds qui forment la dorsale. Nous notons aussi que les protocoles DSRoB et AODVoB génèrent moins de trafic de contrôle que le protocole OLSR (figure 56) même pour un taux de mobilité élevé. Le protocole DSRoB génère moins de trafic de contrôle comparé aux deux autres protocoles dans un environnement dynamique.

Pour une charge élevée, la présence de la dorsale a permis de diminuer le trafic de contrôle. Toutefois, cette réduction est beaucoup moins importante que dans le cas d'une charge moyenne.

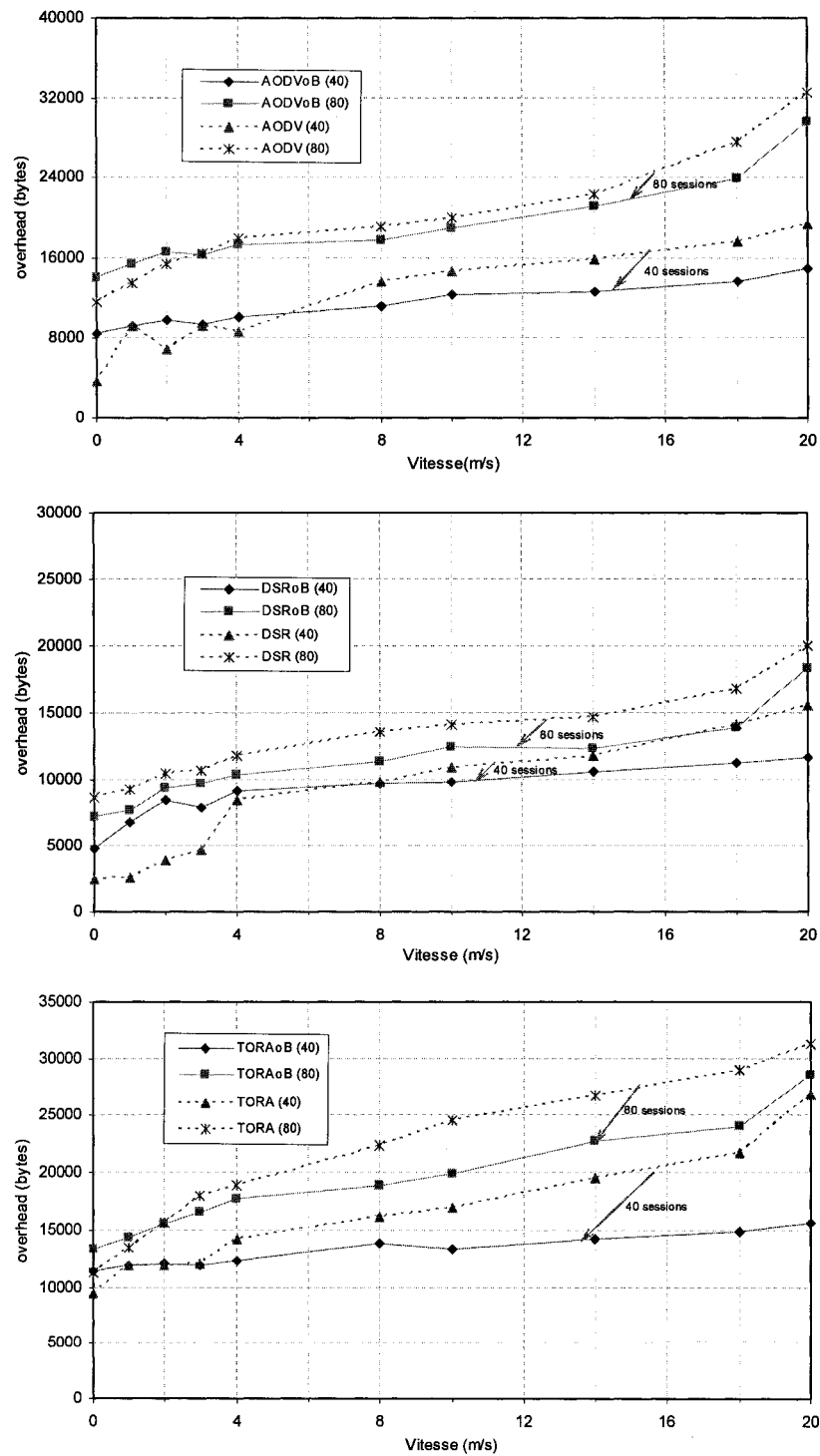


Figure 63 Nombre d'octets utilisés pour le trafic de contrôle en fonction de la mobilité

6.3.4.5 Délai moyen de bout en bout

La figure 64 illustre la variation du délai moyen de bout en bout en fonction de la mobilité pour les protocoles de routage AODV, DSR et TORA. Quand la mobilité des nœuds augmente, nous observons bien une amélioration pour les trois protocoles réactifs DSRoB, AODVoB et TORAoB, elle est de l'ordre de 27 %, 19 % et 30 % respectivement. La réduction du nombre de retransmission dans le réseau et le trafic de contrôle permet de diminuer le temps de séjour dans les tampons et le temps de traitement dans les nœuds intermédiaires.

Pour une mobilité réduite, les résultats de simulation montrent que le délai moyen de bout en bout en présence de la dorsale est légèrement supérieur comparé à celui dans le cas où la dorsale n'est pas employée. Le délai additionnel provient du fait que les routes sélectionnées par les protocoles en présence de la dorsale sont plus longues que celles des protocoles dans leurs versions originales, figure 56. Les résultats de simulations montrent que le protocole DSRoB performe mieux que les autres protocoles pour un niveau de mobilité élevé.

Tous les protocoles de routage possèdent un délai important quand la charge dans le réseau est élevée (80 sessions). Ceci est expliqué par le fait que les tampons dans les nœuds intermédiaires sont pleins et le temps de séjour des paquets dans ces tampons va augmenter. Nous remarquons aussi que le protocole qui délivre plus de paquets (DSR) possède le délai le plus faible. La présence d'une dorsale permet de réduire le délai quand la mobilité augmente. Toutefois, cette réduction est moins importante que dans le cas d'une charge moyenne.

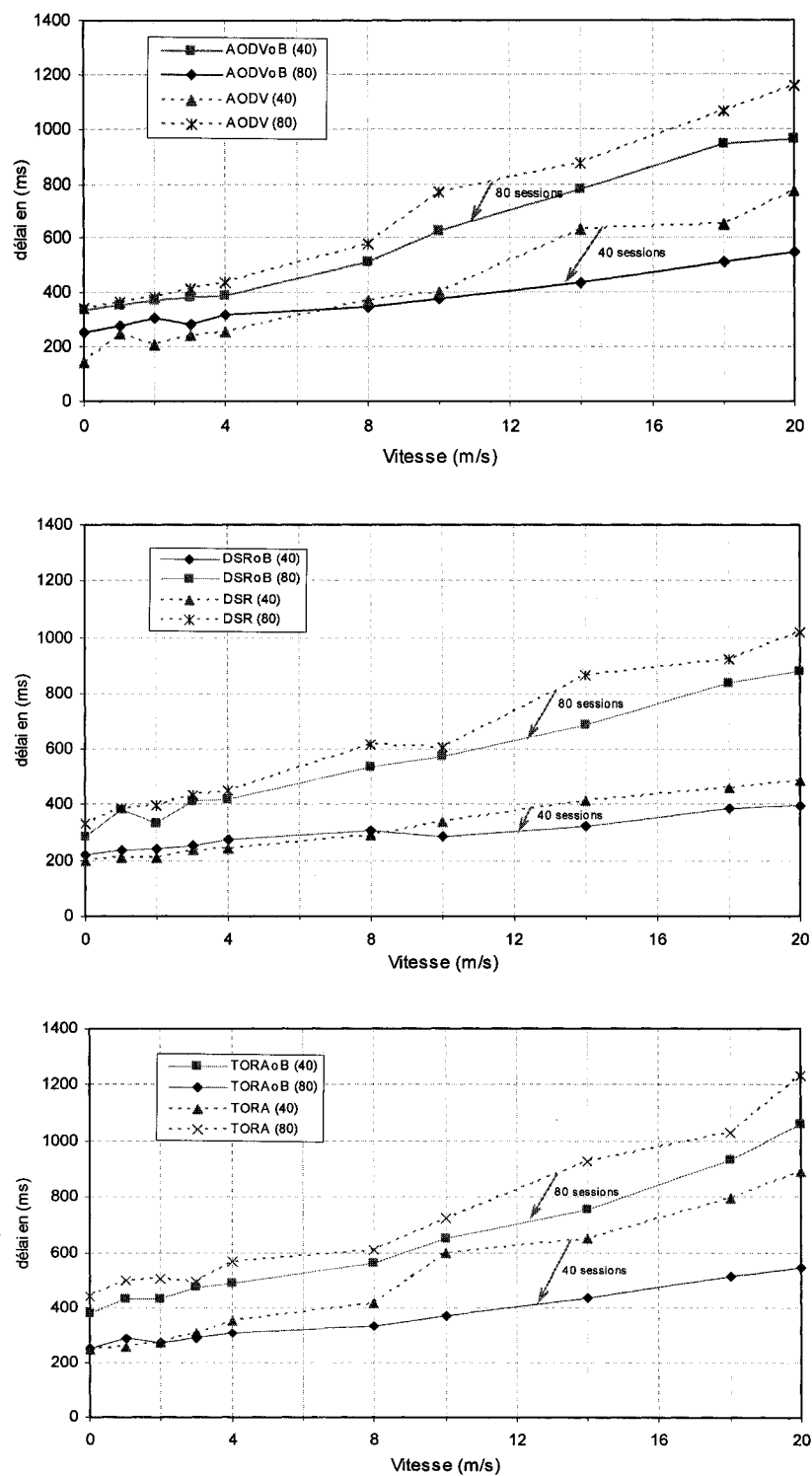


Figure 64 Délai moyen en fonction de la mobilité

Tableau VI
Sommaire des résultats obtenus

Mobilité faible

	Charge moyenne				Charge élevée			
	taux de paquets délivrés	retransmission	overhead	délai	taux de paquets délivrés	retransmission	overhead	délai
AODV	+12%	-5%	+18%	+15%	+10%	-10%	+8%	-3%
DSR	+8%	-4%	+25%	+8%	+16%	-12%	-10%	-4%
TORA	+4%	-2%	+7%	+4%	+12%	-6%	+12%	-4%

Mobilité élevée

	Charge moyenne				Charge élevée			
	taux de paquets délivrés	retransmission	overhead	délai	taux de paquets délivrés	retransmission	overhead	délai
AODV	+25%	-37%	-23%	-10%	+21%	-32%	-11%	-8%
DSR	+28%	-2%	-18%	-5%	+36%	-12%	-15%	-4%
TORA	+17%	-22%	-12%	+4%	+25%	-6%	-18%	-10%

6.3.5 Interprétation des résultats

Le tableau VI récapitule l'écart relatif entre les résultats de simulation pour les protocoles de routage (DSR, AODV et TORA) avec et sans la dorsale pour un niveau de charge moyen (40 sessions) et élevé (80 session) et pour une mobilité faible [0 ~ 4m/s] et élevée [14 ~ 20m/s]. Dans ce tableau, le signe (+) indique une amélioration pour le taux de paquets délivrés. De même, le signe (-) indique une réduction de retransmission, *overhead* et délai. Nous avons intérêt à augmenter le taux de paquet délivré et diminuer le nombre de retransmission, l'*overhead* et le délai. Par exemple, le +12% pour le taux de paquet délivré (protocole TORA, charge moyenne, mobilité faible) indique qu'en utilisant la dorsale, TORAoB, il y a une amélioration de l'ordre de 12% de plus de paquets délivrés par rapport aux résultats de TORA (sans dorsale). Les cases en gris

représentent les cas où l'utilisation de la dorsale est moins efficace qu'avec le protocole en question. Par exemple, le protocole AODV génère plus de paquet de contrôle en présence d'une dorsale. En effet, pour une charge moyenne et pour une mobilité faible, les résultats de simulation du protocole AODVoB montrent qu'il y a 18% de trafic de contrôle additionnel comparés à celui d'AODV.

En se basant sur l'analyse des résultats de simulation, nous avons remarqué que l'utilisation de la dorsale est avantageuse et permet d'améliorer la performance des protocoles de routages (AODV, DSR et TORA) pour un niveau de mobilité élevée (peu importe le niveau de la charge dans le réseau). Ceci est expliqué par le fait que la construction de la dorsale a permis de limiter la zone de diffusion des messages de contrôle et le nombre de retransmission dans le réseau. Il s'en suit que plus de bande passante disponible pour le trafic de donnée. Aussi, notre procédure de maintenance a prouvé son efficacité dans un environnement dynamique. En effet, elle est de nature distribuée et elle s'adapte bien avec tout changement de la topologie, ce qui permet d'avoir des informations pertinentes qui seront utiles pour les protocoles de routage. Ces informations concernent essentiellement la topologie du réseau. À un instant donné, chaque dominant connaît à priori la liste des dominés qui doit desservir.

Pour une mobilité faible, la présence d'une dorsale n'apporte pas beaucoup d'amélioration. Ceci est dû au fait que la construction et la maintenance de la dorsale engendre un *overhead* additionnel sans qu'il soit compensé par le niveau de mobilité. Surtout pour une charge moyenne, la performance des trois protocoles se dégrade en termes de trafic de contrôle et de délai. Cependant, nous observons une légère amélioration au niveau du taux de paquets délivrés et le nombre de retransmission. Dans le cas où nous avons une charge élevée, les performances des protocoles AODV et TORA se dégradent légèrement en termes de trafic de contrôle additionnel. Pour les autres paramètres (délai, taux de paquets délivrés et nombre de retransmission), la

présence de la dorsale contribue à une légère amélioration pour les trois protocoles de routage.

Tableau VII
proportion du trafic de contrôle par rapport au trafic global

	Mobilité faible				Mobilité élevée			
	Charge moyenne (40 sessions)		Charge élevée (80 sessions)		Charge moyenne (40 sessions)		Charge élevée (80 sessions)	
	sans dorsale	avec dorsale	sans dorsale	avec dorsale	sans dorsale	avec dorsale	sans dorsale	avec dorsale
AODV	33%	37%	41%	37%	48%	27%	61%	32%
DSR	28%	34%	37%	29%	46%	22%	56%	28%
TORA	31%	33%	42%	44%	51%	33%	54%	30%

Le trafic de contrôle est présenté dans l'unité absolue et pas relatif par rapport au trafic total parce que nous avons voulu étudier la variation (évolution) du trafic de contrôle en fonction de la variation de la mobilité. Le tableau VII illustre le pourcentage du trafic de contrôle par rapport au trafic global pour les trois protocoles de routage AODV, DSR et TORA. Le trafic de contrôle consomme une bonne partie de la bande passante ; entre 30% et 50% de la bande passante est utilisé pour le trafic de contrôle. La proportion du trafic de contrôle par rapport au trafic global varie en fonction du protocole et en fonction du niveau de la mobilité. Ces résultats montrent bien que la présence de la dorsale permet de réduire cette proportion de la bande passante utilisée par le trafic de contrôle surtout pour une mobilité élevée.

Si nous comparons le protocole OLSR, qui utilise la technique de relais multipoint pour diffuser les messages contrôles dans le réseau, nous pourrions dire que pour un même niveau de charge le taux de paquets délivrés pour les protocoles de routage réactifs DSR et TORA, sans la dorsale, dépasse celui de OLSR et la présence de la dorsale permet

d'avantage d'améliorer ce taux. En ce qui concerne le nombre de retransmission OLSR présente de meilleurs résultats comparés aux autres protocoles sans la dorsale. Toutefois, en présence de la dorsale celle-ci diminue d'avantage le nombre de retransmission. OLSR et les trois protocoles réactifs en présence de la dorsale possèdent le même ordre de grandeur en ce qui concerne le trafic de contrôle (*overhead*). Le délai pour DSRoB est faible par rapport à celui d'OLSR, alors que pour AODVoB et TORAoB ce délai est toujours important comparé à celui de OLSR.

6.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons comparé, au moyen des simulations, quatre protocoles de routage ; un protocole proactif (OLSR) et trois protocoles réactifs (AODV, DSR et TORA). Nous nous sommes intéressés principalement à leurs comportements face à la mobilité des nœuds dans le réseau. Pour cela nous avons défini cinq critères (ou métriques) pour effectuer cette comparaison. Les résultats de simulation montrent que les performances de ces protocoles se dégradent quand la mobilité augmente : le taux de paquets délivrés diminue, la retransmission inutile augmente, le trafic de contrôle augmente, le délai augmente etc.

Nous avons par la suite repris les mêmes protocoles en présence d'une dorsale et refait les mêmes simulations. De plus, nous avons tenu compte du niveau de la charge du trafic dans le réseau en faisant varier le nombre de sessions simultanées durant la simulation. Nous avons remarqué qu'il y a une amélioration considérable surtout quand le niveau de mobilité augmente. En effet, les trois protocoles réactifs, pris en considération, performant mieux en présence d'une dorsale pour une charge moyenne et élevée dans le réseau. Cette amélioration varie et elle est de 10 à 30 % pour certaines métriques. Cette amélioration est due principalement aux facteurs suivant :

- la réduction de la zone de diffusion des paquets de contrôle dans le réseau et la limitation de nombre de retransmissions inutiles assure une meilleure utilisation de la bande passante dans le réseau,
- l'information, même locale, disponible dans la dorsale sur la position des nœuds dominés à servir par le dominant. Cette information est utile pour le protocole de routage dans la phase de la découverte d'une route,
- la maintenance distribuée qui assure, dans certaines mesures, la stabilité et la connectivité de la topologie même pour une mobilité élevée.

Dans un réseau *ad hoc*, nous avons constaté que la présence d'une dorsale a permis de contribuer à l'amélioration des performances des protocoles de routage en présence de la mobilité. Pour une mobilité élevée et une charge moyenne, cette amélioration des performances est remarquable comparativement à celle des protocoles sans dorsale. En effet, la dorsale a permis de minimiser le trafic de contrôle, de réduire les retransmissions inutiles et de réduire l'effet de la mobilité. Et par conséquent, la consommation de la bande passante a été réduite. Pour une charge élevée (et peu importe le niveau de la mobilité), la dorsale a permis d'améliorer les performances mais pas autant que celles pour une charge moyenne.

Pour un système statique ou à faible mobilité, la présence d'une dorsale n'est pas si avantageuse que dans le cas à forte mobilité. Nous avons remarqué que les protocoles de routage sont capables de s'adapter dans un environnement peu dynamique. En effet, le délai et le trafic de contrôle sont plus faibles quand la dorsale est utilisée. Pour une mobilité réduite, le trafic de contrôle généré pour la maintenance de la dorsale ne sera pas compensé et affecte la performance des protocoles.

Dans nos simulations, nous avons considéré une topologie uniforme et un trafic homogène et nous avons remarqué que la présence d'une dorsale améliore les

performances des protocoles de routage existants. Pour une topologie non-uniforme, c'est la connectivité des nœuds qui va être modifiée et par la suite la taille de la dorsale qui va changer et nous présumons que la présence d'une dorsale va toujours apporter des améliorations. Pour un trafic hétérogène la performance va dépendre principalement de la bande passante disponible dans le réseau qui augmentera en présence de la dorsale. Nous avons vérifié que la présence de la dorsale permet de réduire le trafic de contrôle dans le réseau et par la suite il y aura plus de bande passante disponible pour le trafic de données.

En conclusion, dans un réseau *ad hoc*, l'utilisation d'une dorsale avec un protocole de routage est avantageuse pour un environnement dynamique (forte mobilité) peu importe le niveau de la charge dans le réseau. Tandis que pour un environnement statique et une charge élevée, l'utilisation d'une dorsale est peu avantageuse. Pour un environnement statique et une charge moyenne, l'utilisation d'une dorsale ne présente aucun avantage. Ainsi, le choix d'utilisation d'une dorsale ou non dépend de la nature de l'application en question.