



**HAL**  
open science

## Amélioration de la précision pour l'estimation de la bande passante résiduelle dans les réseaux ad hoc basés sur IEEE 802.11

Cheikh Sarr, Claude Chaudet, Guillaume Chelius, Isabelle Guérin-Lassous

### ► To cite this version:

Cheikh Sarr, Claude Chaudet, Guillaume Chelius, Isabelle Guérin-Lassous. Amélioration de la précision pour l'estimation de la bande passante résiduelle dans les réseaux ad hoc basés sur IEEE 802.11. Huitièmes Journées Doctorales en Informatique et Réseaux (JDIR'07), Jan 2007, Marne-la-Vallée, France. pp.87-96. hal-01117821

**HAL Id: hal-01117821**

**<https://hal.science/hal-01117821v1>**

Submitted on 18 Feb 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Amélioration de la précision pour l'estimation de la bande passante résiduelle dans les réseaux ad hoc basés sur IEEE 802.11

Cheikh Sarr<sup>†</sup>, Claude Chaudet<sup>‡</sup>, Guillaume Chelius<sup>†</sup>, and Isabelle Guérin Lassous<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>Inria Ares / Citi, Insa de Lyon – 69621 Villeurbanne Cedex – France  
Cheikh.Sarr@insa-lyon.fr, Guillaume.Chelius@insa-lyon.fr

<sup>‡</sup>GET/ENST; LTCI-UMR CNRS 5141 – 37-39, rue Darreau – 75014 Paris – France  
Claude.Chaudet@enst.fr

<sup>‡</sup> LIP / Université Lyon I – 69364 Lyon Cedex 07 France  
Isabelle.Guerin-Lassous@ens-lyon.fr

**Résumé**— Les réseaux ad hoc ne fournissent de manière native, aucun mécanisme permettant de gérer la qualité de service dans un réseau sans fil multi-saut. Cependant, les recherches portant sur la QoS ont connu un essor ces dernières années. La principale difficulté, lors de la mise en place de protocole de QoS, réside dans l'estimation précise des ressources disponibles. Dans cet article, nous proposons une méthode fiable permettant d'estimer la bande passante résiduelle se basant sur une estimation probabiliste de la synchronisation des périodes de temps libre entre les mobiles émetteur et récepteur et une estimation de la probabilité de collision au niveau des liens radio. Par des simulations, nous comparons les performances de notre méthode avec d'autres protocoles de QoS tels que BRuIT, AAC, QoS-AODV qui sont basés sur d'autres techniques d'évaluation de la bande passante résiduelle.

## I. INTRODUCTION

Les recherches menées dans le domaine de la qualité de service dans les réseaux ad hoc, ont permis la mise en place de nombreux protocoles de QoS. Le but de certains de ces protocoles est fournir des routes satisfaisant un ou plusieurs critères sur la qualité de la transmission. Le critère le plus souvent utilisé est la bande passante.

La mise en place d'un protocole efficace basé sur la bande passante nécessite une estimation précise de la bande passante disponible. Or cette métrique est difficilement quantifiable dans un environnement ad hoc multi-saut. En effet, le médium étant partagé, la perception de la bande passante utilisée et disponible est différente d'un mobile à un autre. Par conséquent, un mobile, en plus de la bande passante qu'il consomme, doit avoir une estimation de la bande passante consommée par les mobiles voisins avec lesquels il partage le médium.

Plusieurs solutions ont été proposées pour pallier ce problème, ces dernières pouvant être classifiées en deux grandes catégories : les techniques intrusives qui se basent sur l'envoi de paquets de contrôle et les techniques passives qui préconisent une estimation locale de la bande passante disponible parfois combinée à un mécanisme léger d'échange

de ces informations. Les techniques intrusives consomment une quantité non négligeable de bande passante, tandis que les techniques passives reposent sur une estimation grossière puisqu'elles estiment généralement la bande passante résiduelle comme la différence entre la capacité et la bande passante consommée, ce qui n'est pas toujours vrai. Dans cet article, nous proposons de rendre l'estimation de la bande passante résiduelle plus précise.

Notre solution est basée sur le standard 802.11, qui est largement répandu dans les réseaux sans fil multi-sauts. Elle peut néanmoins s'adapter à toutes les technologies basées sur le principe du CSMA/CA en modifiant quelques uns de ses paramètres.

La *bande passante résiduelle ou disponible* entre deux mobiles peut se définir comme le débit maximal qui peut être émis entre ces deux nœuds sans dégrader aucun des flux présents dans le réseau. Cette notion est différente de la capacité qui représente juste le débit maximal d'émission entre deux mobiles. Dans [12] nous avons proposé une première estimation de la bande passante disponible. Bien que cette dernière améliore la précision des solutions existantes, il existe des configurations particulières pouvant conduire à une estimation moins fiable. Dans cet article, nous proposons donc des améliorations permettant de prendre en compte ces configurations particulières. Dans la section II, nous présentons un état de l'art sur les techniques d'évaluation de la bande passante résiduelle. Dans la section III, nous décrivons notre méthode. Enfin, nous comparons les performances de notre technique d'évaluation de la bande passante résiduelle avec d'autres approches existantes dans la section IV.

## II. ETAT DE L'ART

Les techniques d'évaluation de la bande passante disponible peuvent se subdiviser en deux grandes classes :

- Les techniques dites intrusives basées sur des paquets de contrôle envoyés de bout en bout, afin d'estimer la bande passante résiduelle le long d'un chemin.

- Les techniques dites passives qui utilisent des informations locales (comme par exemple le taux d'utilisation du canal). Les messages Hello classiques et périodiques, qui permettent la mise à jour des informations de voisinage, sont aussi utilisés afin d'échanger des informations de bande passante.

#### A. Les techniques intrusives

Plusieurs techniques intrusives d'estimation de la bande passante résiduelle ont été proposées dans les réseaux filaires. Un résumé détaillé de ces techniques est donné dans [9]. Les techniques SLOPS (Self Loading Periodic Streams) estiment la bande passante résiduelle de bout en bout en envoyant des paquets de tailles égales et en mesurant leur délai. Par la suite, la source augmente son débit d'émission jusqu'à observer une variation du délai de ces paquets. Le débit pour lequel on constate une variation significative de ce délai correspond au point limite de saturation et par conséquent à la valeur de la bande passante résiduelle. La technique TOPP (Train of Packet Pair) [8] est basée sur le même principe, cependant la fonction d'augmentation du débit de la source est linéaire. DietTOPP [1] est basée sur TOPP, mais a été conçu pour des environnements sans fil. Dans [5], les auteurs mettent en relief le fait que le délai des paquets, supérieur à une valeur théorique maximale, permet d'estimer une utilisation du médium et d'en déduire la bande passante résiduelle.

Toutes ces techniques sont actives car elles utilisent des paquets de contrôle envoyés de bout en bout pour estimer la bande passante résiduelle le long d'un chemin. Une consommation importante de la bande passante et un impact sur les trafics de données sont les deux inconvénients majeurs de ces techniques.

#### B. Les techniques passives

Chaudet et Guérin Lassous ont proposé BRuIT [4] (Bandwidth Reservation under InTerferences) qui prend en compte la notion de zone de détection de porteuse. En effet, avec les protocoles de type CSMA/CA, deux nœuds qui sont en zone de détection de porteuse partagent l'accès au médium et donc de la bande passante, même s'ils ne sont pas capable de communiquer directement. Par conséquent, chaque mobile doit être en mesure d'estimer l'occupation du médium effectuée par les mobiles dans sa zone de détection de porteuse. BRuIT approxime cette zone de détection de porteuse par le voisinage à deux sauts. Périodiquement, chaque nœud fournit des informations sur la quantité de bande passante qu'il utilise pour router un flux, ainsi que sur celle utilisée par ses voisins, en envoyant des messages Hello. Chaque mobile peut donc estimer la bande passante consommée dans son voisinage à deux sauts et en déduire sa bande passante résiduelle. Le principal inconvénient de cette méthode est que l'approximation de la zone de détection de porteuse par le voisinage à deux sauts n'est pas toujours vrai. De plus BRuIT sous-estime la bande passante résiduelle, car il ne tient pas compte de la synchronisation possible de flux se trouvant

dans la zone de détection de porteuse d'un nœud mais étant complètement indépendants entre eux.

Dans [14], Yang et Kravets ont proposé CACP (Contention Aware Control Protocol). Le but est, comme dans BRuIT, d'estimer la bande passante résiduelle des nœuds dans la zone de détection de porteuse. Dans un premier temps, la bande passante résiduelle locale est calculée en utilisant les périodes de temps libre au niveau du médium. Dans un second temps, pour estimer la bande passante dans la zone de détection de porteuse trois méthodes différentes sont proposées : l'utilisation des messages Hello dans un voisinage à deux sauts comme dans BRuIT, l'augmentation de la puissance d'émission des émetteurs de telle sorte que le signal puisse être décodé par l'ensemble des nœuds dans la zone de détection de porteuse et enfin la réduction du seuil de sensibilité des récepteurs. Les auteurs mettent en relief le problème de la contention intra flux déjà étudié dans [6]. En effet, l'émission des données par un mobile va consommer de la bande passante au niveau d'un certain nombre de liens en amont et en aval. Par conséquent il est important d'identifier, de manière précise, le nombre de mobiles qui seront en contention lors de l'émission d'un flux QoS.

QoS-AODV [11] utilise une métrique appelée BWER (Bandwidth Efficiency Ratio) afin d'estimer la bande passante résiduelle au niveau de chaque nœud. Cette métrique exprime le ratio entre le nombre de paquets transmis et reçus. QoS-AODV utilise les messages Hello pour collecter les informations de bande passante des mobiles dans son voisinage à un saut. Finalement, la bande passante résiduelle d'un mobile est égale au minimum de la bande passante résiduelle estimée par ce mobile et de celle des mobiles dans son voisinage à un saut.

Dans AAC [10], chaque mobile estime sa bande passante utilisée en additionnant la taille des paquets perçus durant une période fixe. Cette taille des paquets est déduite de l'occupation du médium, ce qui permet de prendre en compte les mobiles dans la zone de détection de porteuse. La bande passante résiduelle est le minimum de la bande passante résiduelle des mobiles se trouvant dans la zone de détection de porteuse de l'émetteur et du récepteur. De la même manière que CACP, AAC propose aussi la prise en compte de la contention intra-flux.

#### C. Motivations

Comme nous l'avons vu précédemment, les techniques actives ne sont pas totalement satisfaisantes car elles consomment une quantité non négligeable de bande passante qui peut affecter le débit des flux de données. Dans [13], les auteurs mettent en relief le fait que la bande passante consommée par les paquets de contrôle avec ce type de techniques peut occuper une part significative du trafic total dans le réseau. Les techniques passives fournissent plus une estimation par nœud que par lien et l'approximation de la zone de détection de porteuse au voisinage à deux sauts peut parfois entraîner des évaluations erronées. Les travaux de [3] évaluent les erreurs introduites suivant l'approximation de la zone de détection de porteuse pour des réseaux aléatoires.

Cependant, il est indispensable d'avoir une estimation précise de la bande passante résiduelle sur un lien afin de router les flux QoS dans de bonnes conditions. Pour fournir une estimation précise, certaines considérations doivent être prises en compte. Premièrement, pour qu'une communication puisse déjà s'effectuer sur un lien radio à un saut, le médium doit être libre aussi bien au niveau de l'émetteur que du récepteur (nous considérons un émetteur et un récepteur qui se trouvent à portée de communication). Par conséquent, la bande passante résiduelle sur un lien dépend de la synchronisation des périodes de temps libres de l'émetteur et du récepteur et la connaissance du recouvrement de ces périodes de temps libre va augmenter la précision de l'estimation. Une telle connaissance n'est pas prise en compte dans les techniques passives présentées dans la section précédente. Deuxièmement, la présence de collisions dégrade de manière significative le débit des communications. Considérons l'exemple décrit au niveau de la figure 1. Cette configuration présentée dans [2] est une situation qui donne une inégalité en termes de débit.

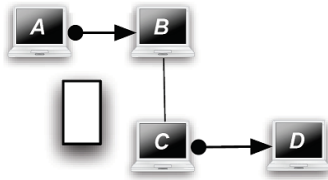


Fig. 1  
INÉQUITÉ D'ACCÈS AU MÉDIUM

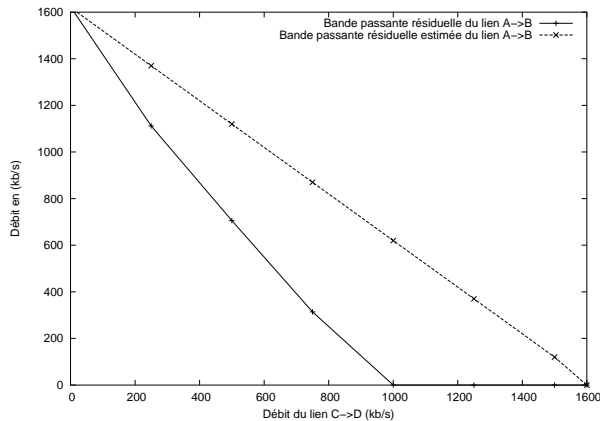


Fig. 2  
BANDE PASSANTE RÉSIDUELLE DU LIEN (A,B)

Supposons que nous ayons un flux sur le lien (C,D), et que nous voulons estimer la bande passante résiduelle sur le lien (A,B). Les simulations sont réalisées sous NS2. Dans cette configuration, les estimations faites par BRuIT, CACP ou AAC sont identiques et sont représentées au niveau de la figure 2 par la courbe étiquetée par "Bande passante résiduelle estimée" en fonction du débit d'émission du lien (C,D). Au niveau de

ces protocoles, la bande passante résiduelle correspond à la capacité du médium (nous sommes dans un environnement à 2Mb/s soit un débit maximum réel d'environ 1,6Mb/s) moins la bande passante consommée au niveau du lien (C,D). La seconde courbe représente la bande passante résiduelle réelle du lien (A,B) qui correspond au débit maximum que l'on peut faire passer sur ce lien (obtenue par simulation). On constate donc que plus le débit du lien (C,D) augmente, plus la bande passante résiduelle réelle devient plus petite que la bande passante résiduelle estimée. L'explication de cette différence se trouve au niveau des collisions qui apparaissent au niveau du récepteur en B. Ces collisions qui dégradent de manière significative le débit du lien (A,B), doivent être prises en compte pour raffiner l'estimation. Par conséquent il est indispensable de mettre au point un mécanisme de prédiction du nombre moyen de collisions au niveau du récepteur.

Pour conclure cette section, il est donc primordial de considérer tous les aspects précités, afin de rendre l'estimation de la bande passante résiduelle la plus précise possible.

### III. UNE ESTIMATION PRÉCISE DE LA BANDE PASSANTE RÉSIDUELLE

Le but de cette section est de présenter en détail la méthode mise en place pour estimer la bande passante résiduelle d'un lien en tenant compte des préconisations faites dans les paragraphes précédents. Dans notre proposition nous combinons trois approches :

- Une approche d'écoute temporelle afin d'estimer localement la bande passante résiduelle en monitorant l'activité du canal radio. Cette approche ne permet d'estimer que la bande passante résiduelle sur les nœuds.
- Une évaluation probabiliste de la synchronisation des périodes de temps libres des mobiles aux extrémités du lien. L'approche probabiliste semble la plus à même d'approximer la synchronisation réelle qui est difficile à prévoir.
- Une estimation de la probabilité de collision sur le lien considéré.

Les deux derniers points nécessitent l'échange d'informations de bande passante entre les mobiles. Cet échange est réalisé, non à l'aide des paquets de contrôle, mais grâce aux paquets Hello que l'on retrouve habituellement dans la plupart des protocoles de routage et qui permettent la mise à jour des informations de voisinage. Par conséquent, leur utilisation n'entraînera pas un surplus de trafic au niveau du réseau. Ainsi, notre méthode d'estimation de la bande passante résiduelle est passive et non intrusive.

Dans [12], nous avons déjà proposé une méthode d'estimation de la bande passante résiduelle d'un nœud et par extension d'un lien, à l'aide d'une estimation probabiliste de la synchronisation des périodes de temps libre au niveau de l'émetteur et du récepteur. Nous allons faire un bref résumé de cette méthode, pour plus de détails voir [12].

### A. Estimation de la bande passante résiduelle d'un nœud

Pendant une période d'observation  $\Delta$ , chaque nœud écoute l'activité du médium et en déduit sa période globale de temps libre. Les nœuds ne considèrent que les périodes de temps libres supérieures à un DIFS, qui représente la durée d'attente minimale pour qu'une communication puisse démarrer. Il est important de noter que cette écoute permanente du médium permet de prendre en compte la bande passante utilisée par les mobiles dans la zone de détection de porteuse. En effet, tout signal dont la valeur est supérieure au seuil de détection de porteuse bloque l'émission du nœud qui écoute. A ce stade, on constate une surestimation de la bande passante résiduelle car cette méthode ne prend pas en compte le backoff et les collisions qui peuvent survenir à la réception.

### B. Estimation de la bande passante résiduelle d'un lien

1) *Prise en compte du recouvrement des périodes de silence*: Dans [12], nous avons proposé une méthode permettant d'estimer la bande passante résiduelle d'un lien à partir de celle d'un nœud comme décrit précédemment. On effectue une estimation probabiliste du recouvrement des périodes de temps libre à partir de l'occupation médium au niveau de l'émetteur et du récepteur qui sont à portée de communication. Ainsi, si l'on considère un lien radio composé de deux nœuds à portée de communication  $s$  et  $r$  avec des périodes de temps libres équivalentes respectivement à  $\tau_s$  et  $\tau_r$ . Si  $C_{max}$  est la capacité du médium et  $E(b_{(s,r)})$  la bande passante résiduelle estimée du lien  $(s, r)$ , alors le résultat principal est :

$$E(b_{(s,r)}) = \tau_s \times \tau_r \times C_{max}$$

Les messages Hello sont utilisés pour l'échange des informations locales de bande passante entre mobiles voisins. Cette première méthode est relativement précise, mais il existe des configurations particulières pour lesquelles l'estimation n'est pas fiable. Nous proposons donc des améliorations à cette méthode pour la rendre plus fiable indépendamment des configurations choisies.

2) *Prise en compte des collisions*: Le phénomène des collisions dégrade plus ou moins fortement le débit des communications dans un réseau ad hoc. Ainsi la seule connaissance de la distribution des périodes de temps libre au niveau de l'émetteur et du récepteur n'est pas suffisante pour prévoir une collision. En effet, lorsqu'un paquet est émis au niveau de la source, il est possible que le médium au niveau du nœud récepteur soit occupé ce qui va engendrer une collision au niveau de ce dernier. La présence de collisions engendre des retransmissions de paquets et augmente la taille de la fenêtre de contention, ce qui tend à réduire le débit réel des flux.

Dans le scénario présenté au niveau de la figure 1, la première évaluation de bande passante présentée dans [12] de même que des protocoles tels que BRuIT, CACP et AAC vont fausser l'évaluation de la bande passante sur le lien (A,B) car toutes ces méthodes ne vont pas prendre en compte les collisions qui surviendront au niveau du nœud B. Par conséquent, pour que l'estimation de la bande passante résiduelle

soit précise, nous devons estimer une probabilité de collision au niveau du nœud récepteur.

Pour estimer cette probabilité de collision, les messages Hello sont envoyés périodiquement en mode broadcast par tous les nœuds à une fréquence  $\Delta$  supposée connue. Nous avons choisi  $\Delta = 1$  s, *i.e* une fréquence deux fois plus élevée que pour le protocole OLSR afin d'être plus réactif face à la mobilité des nœuds. Ainsi nous pouvons estimer une probabilité de collision sur ces messages Hello selon la formule :

$$p_{Hello} = \frac{\text{Nombre de paquets Hello entrés en collision}}{\text{Nombre de paquets Hello qu'on devrait recevoir}} \quad (1)$$

Dès qu'un mobile reçoit un message Hello d'un de ses voisins, il peut en déduire le nombre de messages Hello qu'il devrait recevoir de ce voisin durant une période de mesure. Cette valeur correspond au dénominateur "Nombre de paquets Hello qu'on devrait recevoir". Le numérateur correspond à cette dernière valeur moins le nombre de paquets Hello effectivement reçus durant cette même période de mesure.

Une telle estimation suppose donc une couche MAC idéale, ce qui n'est pas le cas dans 802.11. Cependant, il est intéressant de noter que si l'émetteur n'émet pas un nombre important de paquets Hello, cela implique que le médium est chargé dans son voisinage. Par conséquent tous les liens associés à ce nœud n'auront pas une bande passante résiduelle élevée et l'erreur sur la valeur de  $p_{Hello}$  n'aura pas un impact important sur l'estimation. De plus, cette erreur va générer une sous-estimation de la bande passante résiduelle, ce qui est préférable (il est préférable de diminuer le nombre de flux QoS que de dégrader le débit des flux voisins) à une surestimation qui entraînerait une dégradation des flux QoS. Une autre stratégie possible serait de prendre en compte les numéros de séquence des paquets Hello, afin d'identifier ceux ayant subi des collisions, même si cette approche ne donne pas d'indication sur un paquet Hello non reçu durant un intervalle prédéfini.

Les paquets Hello ont une taille petite et constante. Par conséquent la probabilité de collision que l'on observera sur des paquets de données de plus grandes tailles ne sera pas identique à la probabilité de collision sur ces paquets Hello. Pour résoudre ce problème nous utilisons une interpolation à l'aide des polynômes de Lagrange dont le but est de trouver une unique fonction  $f(m)$  dépendant de la taille  $m$  du paquet telle que :  $p_m = f(m) \times p_{Hello}$ ,  $p(m)$  étant la probabilité de collision sur un paquet de taille  $m$  octets.

Considérons le scénario de la figure 1. La figure 3(a), représente la probabilité de collision obtenue par simulation avec NS-2 pour différentes tailles de paquets, en présence de paquets Hello. A partir de ces mesures, nous pouvons en déduire le polynôme d'interpolation correspondant à cette situation :  $P(m) = -5,65 \cdot 10^{-9}m^3 + 11,27 \cdot 10^{-6}m^2 - 5,58 \cdot 10^{-3}m + 2,19$ .

La figure 3(b), représente la probabilité de collision estimée au niveau du nœud B, en utilisant la fonction  $f(m)$ , pour différentes tailles de paquets. Cette figure montre que la

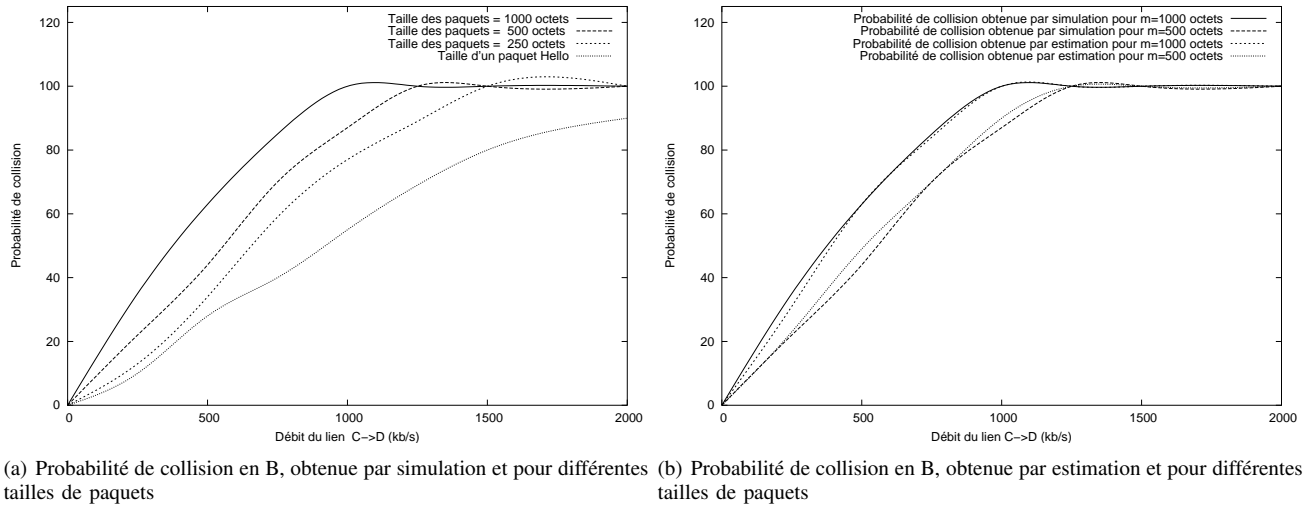


Fig. 3

## PROBABILITÉ DE COLLISION AU NIVEAU DU NŒUD B

probabilité de collision estimée est une bonne approximation de la probabilité de collision obtenue par simulation pour des taille de paquets de 1000 et 500 octets.

Afin d'obtenir le degré de précision de l'interpolation, nous allons estimer l'erreur relative commise par le biais de l'interpolation. Elle permet d'estimer l'écart séparant la courbe de la probabilité de collision obtenue par simulation de celle interpolée. L'erreur relative notée  $\epsilon$ , est un vecteur ligne où chaque composante  $\epsilon_i$  représente l'erreur relative au point d'abscisse  $x_i$  :

$$\epsilon = (\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n) \text{ avec } \epsilon_i = \left| \frac{f(x_i) - g(x_i)}{f(x_i)} \right| \forall i \in [1; n]$$

$f(x_i)$  et  $g(x_i)$  étant respectivement les valeurs des probabilités de collision obtenues au point d'abscisse  $x_i$  par simulation et par interpolation.

Nous pouvons aussi calculer l'erreur relative moyenne notée  $\bar{\epsilon}$  à l'aide de la formule ci-dessous :

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{f(x_i) - g(x_i)}{f(x_i)} \right|$$

$(x_i)$	0	250	500	750	1000
$(g(x_i))$	0	29	62	89	100
$(f(x_i))$	0	32	63	85	99
$\epsilon_i$ (%)	-	9,3	1,5	4,7	1

TABLE I

ERREUR RELATIVE DUE À L' INTERPOLATION

La tableau I représente l'erreur d'interpolation faite dans notre cas. Ainsi le vecteur d'erreur obtenu en pourcentage est  $\epsilon = (9, 3; 1, 5; 4, 7; 1)$  ce qui représente une erreur moyenne de  $\bar{\epsilon} = 4\%$  environ, ce qui est relativement faible et traduit

la précision de l'interpolation à l'aide des polynômes de Lagrange.

Il est important de noter que la probabilité de collision ne dépend que de la taille des paquets envoyés par la source et de l'occupation du médium au niveau du récepteur. Nous avons donc présenté une méthode permettant d'évaluer la probabilité de collision qui combine deux approches :

- Une approche on-line permettant d'évaluer l'impact de la distribution de l'occupation du médium au niveau du récepteur par le biais de la probabilité de collision sur les paquets Hello.
- Une approche off-line qui prend en compte la taille des paquets envoyés par la source par le biais d'une interpolation.

3) *Prise en compte du backoff*: Lorsqu'un mobile subit une collision, il double la taille de sa fenêtre de contention. Jusqu'à présent, nous n'avons considéré que la bande passante consommée par les collisions sans tenir compte du mécanisme du backoff de la norme IEEE 802.11.

Dans un premier temps, lorsqu'il n'y a pas de collision, le backoff suit une loi uniforme dans l'intervalle  $[0; CW_{min} - 1]$  et peut donc être approximé par sa valeur moyenne  $\frac{CW_{min}-1}{2}$ . Nous utiliserons les notations suivantes :

- $K$  représente la proportion de bande passante consommée par le temps d'attente de 802.11 avant l'envoi d'un paquet (DIFS plus backoff).
- *backoff* est la valeur moyenne du backoff sans collision qui vaut  $\frac{CW_{min}-1}{2}$ .
- *DIFS* (*SIFS* resp.) est la durée d'un DIFS (*SIFS* resp.) défini par la norme IEEE 802.11.
- $T(m)$  est le délai séparant l'émission de deux paquets consécutifs. Cette valeur dépend du débit d'émission et de la taille  $m$  du paquet.

La valeur de  $K$  est donnée par la formule :

$$K = \frac{DIFS + \overline{backoff}}{T(m)} \quad (2)$$

On constate que la valeur de  $K$  diminue lorsque la taille des paquets augmente. Ainsi, dans certains cas (avec des paquets de très petites tailles), le fait de ne pas prendre en compte la valeur de  $K$  peut entraîner une estimation imprécise de la bande passante résiduelle.

En cas de collision, le mécanisme du backoff exponentiel est activé. Après chaque paquet ayant subi une collision, la taille de la fenêtre de backoff est doublée jusqu'à une valeur maximale  $CW_{max}$ . Par conséquent la valeur du backoff augmente au-delà de la valeur moyenne obtenue lorsqu'il n'y a pas de collision.

Considérons un lien radio pour lequel la probabilité de collision vaut  $p$ . La variable  $n$  représente le nombre maximum de retransmissions associé à cette probabilité de collision  $p$ . Avec une probabilité équivalente à  $(1 - p)$ , la première transmission est réussie et le backoff moyen est équivalent à  $\frac{CW_{min}-1}{2}$ .

Avec une probabilité  $p(1 - p)$ , le premier paquet subi une collision et le deuxième paquet est transmis correctement en utilisant un backoff moyen équivalent à  $2 * \frac{CW_{min}-1}{2}$ . Soit  $X$  la variable aléatoire représentant le nombre de retransmissions. Elle peut être exprimée à l'aide des probabilités suivantes :

$$P(X = k) = \begin{cases} p^k(1 - p) & \text{if } k \leq 6 \\ p^k & \text{if } k = 7 \\ 0 & \text{if } k \geq 8 \end{cases}$$

Les deux dernières probabilités indiquent le fait que, comme spécifié par la norme IEEE 802.11, le nombre maximum de retransmissions est fixé par défaut à 7 et qu'au-delà de cette valeur limite, le paquet est détruit et le backoff est ramené dans l'intervalle initial  $[0; CW_{min} - 1]$ .

Dans cette évaluation, nous considérons la probabilité de collision indépendante du débit d'émission du nœud émetteur. Cette approximation est juste dans la plupart des cas. En effet, la probabilité de collision reflète le fait qu'un paquet, une fois émis, subit une collision parce que le médium dans le voisinage du récepteur est occupé par d'autres transmissions. Ainsi l'instant d'émission du paquet par l'émetteur influe très peu sur cette probabilité de collision. Cependant, pour des topologies où plusieurs émetteurs génèrent des transmissions vers un récepteur commun, les collisions au niveau du récepteur vont entraîner une augmentation de la fenêtre de contention de tous les nœuds ayant subi une collision et modifier la charge autour du récepteur et par conséquent la probabilité de collision. Mais dans notre approche, à chaque envoi périodique de paquet Hello, la probabilité de collision est recalculée ce qui tend à améliorer la précision de l'estimation de la bande passante résiduelle.

Ainsi pour un lien dont la probabilité de collision est  $p$ , le nombre moyen de retransmissions  $n$  associé à cette probabilité est égal à l'espérance de la variable aléatoire  $X$ , d'où :

$$n = \sum_{k=1}^{+\infty} k.P(X = k) = \sum_{k=1}^7 k.P(X = k)$$

$$n = \sum_{k=1}^6 k.p^k(1 - p) + 7p^7$$

Ainsi le backoff moyen en cas de collision, noté  $\overline{backoff}$  devient :

$$\overline{backoff} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^n 2^k \cdot \frac{CW_{min} - 1}{2}$$

$$\overline{backoff} = \frac{1}{n} \frac{CW_{min} - 1}{2} (2^{n+1} - 1)$$

En fin de compte, la proportion de bande passante consommée par le mécanisme du backoff exponentiel en cas de collision est donnée par la formule :

$$K = \frac{DIFS + \overline{backoff}}{T(m)} \quad (3)$$

Cependant, on peut démontrer que la proportion de bande passante consommée par le backoff est négligeable devant celle consommée par les collisions. En d'autres termes, la chute du débit des flux QoS est due en grande majorité à cause des collisions. Nous utiliserons les notations suivantes :

- $T_{backoff}$  est la proportion de bande passante consommée par le backoff durant la période de mesure lorsque la taille de la fenêtre de contention est supérieure à  $CW_{min}$ .
- $T_{collision}$  est la proportion de bande passante consommée par les collisions.
- $\alpha = \frac{T_{backoff}}{T_{collision} + T_{backoff}}$  représente la part de bande passante consommée par le backoff en fonction des collisions.

Pour estimer la valeur du paramètre  $\alpha$ , nous considérons un scénario au niveau duquel des mobiles sont aléatoirement placés dans un carré de  $1000 m \times 1000 m$ . Nous augmentons aussi bien le nombre de nœuds que la charge du réseau. Les résultats présentés au niveau de la figure 4, représentent la moyenne de 30 simulations. Les paramètres de simulation utilisés sont donnés au niveau de la table II.

On remarque sur cette figure que dans le pire des cas, la proportion de bande passante consommée par le backoff représente à peine plus de 6% de la proportion de bande passante consommée par les collisions à 2 Mb/s, et 12% à 11 Mb/s. Ainsi, la majeure partie de la bande passante perdue est due aux collisions. De plus, lorsqu'on augmente, le nombre de nœuds et la charge du réseau la valeur de  $\alpha$  tend à être nulle.

Ces simulations, ont été effectuées dans des environnements à 2 Mb/s et 11 Mb/s comme capacité. Dans un environnement à 11 Mb/s, la valeur de  $\alpha$  dans le pire des cas augmente mais n'est égale qu'à 12% ce qui reste toujours relativement faible. Cependant, avec des environnements présentant des débits beaucoup plus élevés (802.11a ou g), le temps de transmission étant plus faible, le backoff consommera une

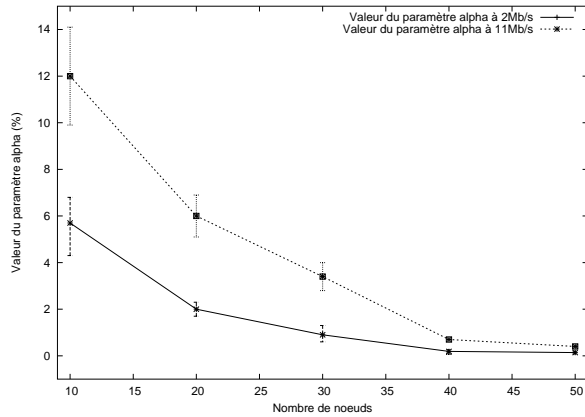


Fig. 4

PROPORTION DE BANDE PASSANTE CONSOMMÉE PAR LE BACKOFF EN FONCTION DES COLLISIONS

proportion de bande passante qui ne pourra plus être négligée lors de l'estimation.

En conclusion, pour estimer la bande passante résiduelle d'un lien trois paramètres sont indispensables :

- $E(b_{(s,r)})$  qui représente une estimation de la synchronisation des périodes de temps libre entre les nœuds source  $s$  et destinataire  $r$  à portée de communication. Elle est calculée à l'aide des formules décrites dans [12].
- La valeur  $K$  qui représente la proportion de bande passante consommée par le mécanisme du backoff.
- La valeur  $p_m$  qui représente la probabilité de collision sur des paquets de taille  $m$  octets.

Pour estimer de manière fine la bande passante résiduelle sur le lien  $(s, r)$ , il faut donc retrancher la proportion de bande passante occupée par le backoff et les collisions.

Pour conclure, la bande passante résiduelle d'un lien entre deux nœuds voisins  $s$  et  $r$  est donnée par la formule :

$$E_{final}(b_{(s,r)}) = (1 - K) \cdot (1 - p_m) \cdot E(b_{(s,r)}) \quad (4)$$

#### IV. SIMULATIONS

Nous avons évalué les performances de notre estimation et avons comparé les résultats obtenus avec d'autres approches passives décrites dans la section II. Toutes ces techniques d'évaluation de la bande passante résiduelle ont été intégrées dans un protocole de QoS. Nous avons donc comparé nos résultats avec trois protocoles disponibles sur Internet<sup>1</sup> : BRuIT, AAC, QoS-AODV. Le but de ce travail n'est pas de mettre au point un nouveau protocole de routage, mais plus d'utiliser les techniques de routage proposées par les autres protocoles tels que BRuIT, AODV, et AAC tout en comparant la précision des techniques mises au point pour évaluer la bande passante

<sup>1</sup>BRuIT: <http://citi.insa-lyon.fr/~iguerinl/QoS.html> - QoS-AODV and AAC: <http://www.ctr.kcl.ac.uk/members/ronan/default.asp>

résiduelle. Avec une version protocolaire, il est possible à la fois de comparer les performances de notre protocole en terme de précision d'estimation avec les autres approches existantes, tout en étudiant son impact sur le réseau.

Nous présenterons brièvement dans la Section IV-A le protocole de routage que nous allons utiliser et que nous appellerons ABE pour *Accurate Bandwidth Estimation* et dans la Section IV-B, les performances obtenues avec ABE.

#### A. ABE

1) *Version protocolaire d'ABE*: Pour mettre en place une version protocolaire de notre estimation de bande passante résiduelle, tous les nœuds vont s'échanger périodiquement par le biais des paquets Hello, leurs informations de bande passante. Ainsi, toutes les  $\Delta$  secondes, un nœud estime localement son occupation du médium et inclut cette information dans un paquet Hello légèrement modifié. Plus la valeur de  $\Delta$  est grande, plus stable seront les mesures. Cependant,  $\Delta$  ne doit pas être trop grand pour pouvoir réagir à la mobilité des nœuds. Nous avons choisi  $\Delta = 1$  seconde, *i.e* une fréquence deux fois plus élevée que dans OLSR.

Ainsi un nœud  $R$  qui reçoit un message Hello d'un autre nœud  $S$ , calcule la bande passante résiduelle du lien  $(S,R)$  en utilisant l'équation 4 comme indiqué au niveau de la figure 5.

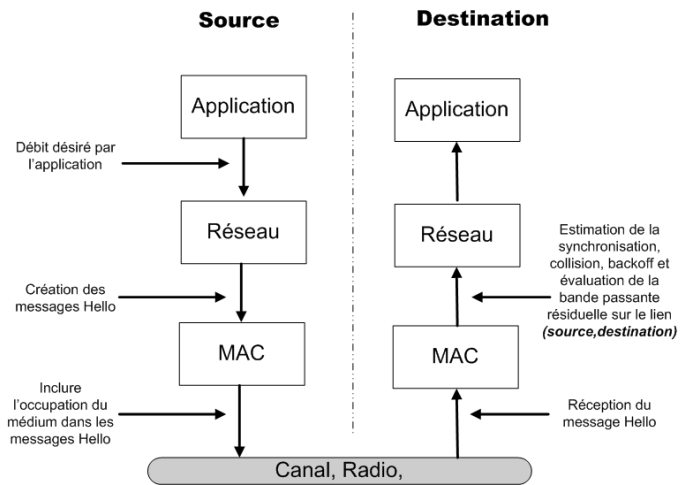


Fig. 5

FONCTIONNEMENT DU PROTOCOLE ABE

2) *Routage QoS*: Comme les protocoles BRuIT, QoS-AODV et AAC, notre protocole de routage est fortement inspiré d'AODV. Nous utilisons les paquets de requête de route (RREQ) auquel nous rajoutons l'information de bande passante désirée par l'application. Lorsque la source veut établir une route pour un flux QoS, elle broadcast un paquet de RREQ à ses voisins. Chaque nœud intermédiaire qui reçoit la requête effectue un contrôle d'admission en vérifiant si la bande passante demandée par l'application est inférieure à la bande passante résiduelle du lien sur lequel le paquet de RREQ a été reçu. Si c'est le cas, le nœud ajoute son adresse



sur la route et envoie le paquet de RREQ, sinon il le détruit. Lorsque le destinataire le reçoit, il vérifie aussi si son contrôle d'admission a réussi. Finalement, le destinataire renvoie à la source un paquet de réponse (RREP) en mode unicast par le chemin inverse pour s'assurer que la route réservée est toujours utilisable. Lorsque ce paquet revient au nœud source, alors les ressources sont donc réservées et le nouveau flux QoS est envoyé sur cette route.

Lorsque l'émetteur et le récepteur sont à plus d'un saut radio, nécessitant un routage multi-saut, une simple comparaison entre le débit demandé par l'application et la bande passante résiduelle n'est pas suffisante. En effet, elle ne prend pas en compte le fait que le flux QoS sera routé par des mobiles voisins, ce qui va bloquer toutes les transmissions dans un rayon supérieur à la zone de communication du mobile : c'est le phénomène de la contention intra-flux. Dans ABE, pour résoudre ce problème nous utilisons directement la relation entre le débit de bout en bout et le nombre de sauts comme décrit dans [7]. De plus, ABE détecte une route cassée en monitorant les paquets Hello. Si un mobile ne reçoit pas un message Hello pendant un certaine durée, il renvoie une route erreur (RERR) à la source qui va se charger de trouver une autre route de secours. Le même processus est répété lorsque le mobile se rend compte que les conditions ne lui permettent pas d'envoyer son flux QoS au débit désiré.

## B. Simulations

Nous avons évalué les performances d'ABE en utilisant le simulateur NS-2 (version 2.27), avec 802.11 comme couche MAC fournie par le simulateur.

Les différents paramètres utilisés lors des simulations sont résumés au niveau du Tableau II.

Paramètres	Valeurs
Protocole de routage	ABE
Protocole MAC	IEEE 802.11b
Intervalle Hello	1 s
Taille des paquets	1000 octets
Modèle de propagation	TwoRayGround
Capacité du médium	2 Mb/s
Zone de communication	250 m
Zone d'interférence	550 m
Taille de la grille	1000×1000 m
Durée des simulations	Entre 50 et 100 secondes

TABLE II

PARAMÈTRES GÉNÉRAUX POUR LES SIMULATIONS

Nous comparons les performances d'ABE avec AODV, QoS-AODV, AAC et BRuIT.

1) *Topologies aléatoires*: Afin d'être moins dépendant des topologies pour lesquelles nous pouvons à l'avance prévoir les cas pathologiques, nous allons tester notre protocole sur des scénarios aléatoires dont la topologie des nœuds est *a priori* inconnue.

La première topologie étudiée est constituée de 20 nœuds placés aléatoirement dans un carré de 1000x1000. Sept flux CBR sont initiés, pour chacun d'entre eux le mobile initiateur

de la communication choisit aléatoirement un mobile comme destinataire (celui-ci peut être hors de sa zone de communication). La simulation dure 50 secondes, le démarrage de chaque flux est espacé de 5 secondes et les résultats présentés constituent la moyenne de 30 simulations.

Au niveau de la figure 6(a), lorsqu'AODV est utilisé, le réseau tend à être dans un état de congestion car aucun contrôle d'admission n'est effectué afin de limiter le débit des flux. On observe aussi de fréquentes cassures de routes ce qui réduit très fortement les performances globales du réseau.

Les figures 6(b) et 6(c) montrent les débits obtenus avec AAC et QoS-AODV. Ces deux protocoles admettent plus de flux QoS qu'ils ne devraient ce qui tend aussi vers une congestion du réseau. AAC ne prend pas en compte le phénomène des collision tandis que QoS-AODV ne prend ni en compte le phénomène des collision, ni celui de la contention intra-flux. Par conséquent, ces deux protocoles surestiment la bande passante résiduelle. Ce scénario met en relief l'importance de la prise en compte des collisions et de la contention intra flux.

Sur la figure 6(d), ABE effectue un contrôle d'admission plus fin qu'avec AAC et AODV, car seuls trois flux sur sept ont pu trouver une route au débit désiré. Ce scénario montre que notre estimation de la bande passante résiduelle ne surestime pas la bande passante résiduelle.

Finalement, lorsqu'on utilise BRuIT (figure 6(e)), seul un flux sur sept est admis, ce qui implique que BRuIT sous-estime la bande passante résiduelle. La raison est principalement du au fait que BRuIT ne prend pas en compte la synchronisation possible de flux distants.

2) *Evaluation du coût du mécanisme*: L'établissement et la maintenance des routes nécessitent des échanges de messages (RREQ, RREP, RERR). Nous évaluons le surcoût de notre protocole ABE en additionnant le nombre total des tous ces messages à travers un réseau dont le nombre de nœuds croît de 10 à 50 avec 10 flux CBR dont les débits sont distribués aléatoirement entre 10 et 80 kb/s. Tous les résultats présentés ci-dessous sont la moyenne de 30 simulations pour un nombre de nœuds défini.

La figure 7 représente le nombre total de messages de contrôle nécessaires pour l'établissement et la maintenance des routes en fonction du nombre de nœuds. AAC et QoS-AODV génèrent le même nombre de messages de contrôle car étant basés sur un protocole de routage similaire. BRuIT n'intègre pas de mécanisme de reconstruction de routes et donc les résultats ne sont pas comparables.

AAC et ABE génèrent moins de messages de contrôle qu'AODV car la phase de contrôle d'admission élimine les routes ne possédant pas assez de bande passante résiduelle pour router les flux QoS. De plus lorsque le réseau devient congestionné, AODV essaie de reconstruire ses routes, ce qui augmente encore plus le nombre de messages de contrôle. Cependant, ABE génère moins de messages de contrôle qu'AAC, car AAC surestime la bande passante résiduelle et explore donc un plus grand nombre de chemins durant la phase de découverte de route.

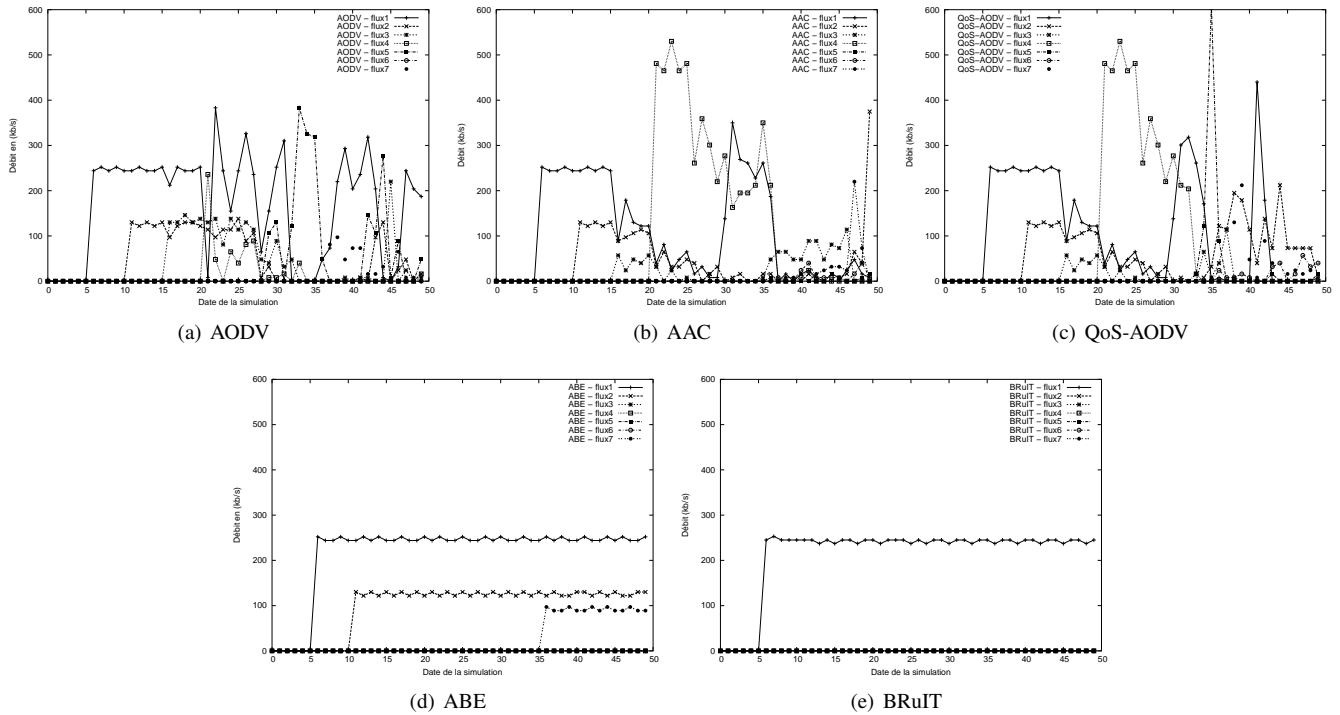


Fig. 6

DÉBITS OBTENUS AVEC AODV, AAC, QoS-AODV, ABE ET BRUIT

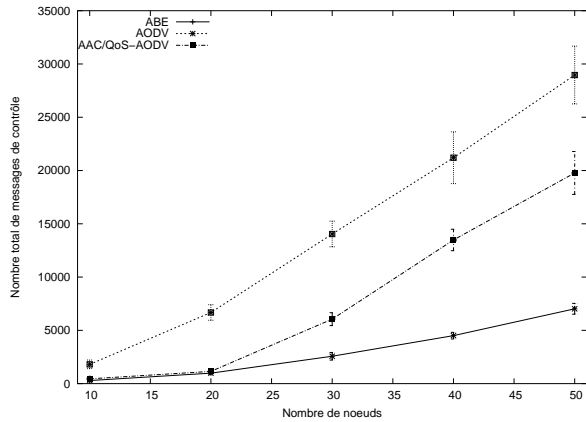


Fig. 7

NOMBRE TOTAL DE MESSAGES DE CONTRÔLE NÉCESSAIRES POUR L'ÉTABLISSEMENT ET LA MAINTENANCE DES ROUTES

3) *Mobilité*: Il est difficile de fournir de la qualité de service en cas de mobilité des nœuds. Ainsi des violations fréquentes de la QoS apparaissent dûes à la mobilité des nœuds, aux cassures de routes ou à des chutes de débit des flux QoS. Avec ABE, dès qu'une des situations précitées apparaît, un message d'erreur est envoyé à la source, qui reconstruit sa route. La phase de reconstruction peut être plus ou moins longue et générera un surplus de message de contrôle.

Pour évaluer les effets de la mobilité sur les flux QoS, nous avons mis en place un scénario constitué de 10 nœuds placés aléatoirement et cinq flux CBR de débit aléatoire et dont les dates d'émission sont espacées de 2 secondes. Le modèle de mobilité est le Random Way Point avec un vitesse maximale de 20 m/s et des temps de pause de 10 s. La simulation dure 100 s.

Les figure 8(a) et 8(b) montrent qu'en cas de mobilité aussi bien AODV que AAC génèrent une congestion du réseau et des dégradations des flux QoS. Avec BRuIT (figure 8(d)), la sous-estimation est toujours présente et seuls deux flux QoS on trouvé une route. De plus, BRuIT n'a pas pu reconstruire les routes des flux 4 et 5 tandis que ABE (Figure 8(c)) a pu acheminer trois flux QoS au débit désiré tout en reconstruisant au bout de 5 secondes la route du flux 4 à la date T=40 s. L'introduction des temps de pause permet aux mobiles de reconstruire leur route. Ainsi même en cas de mobilité, le débit des flux QoS n'est pas dégradé, mais la transmission est décalée, le temps de reconstruire des routes intermédiaires.

## V. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté une nouvelle technique permettant d'améliorer l'estimation de la bande passante résiduelle entre deux nœuds voisins, et par extension, le long d'un chemin. Les résultats montrent une estimation plus fiable de la bande passante résiduelle que les techniques existantes en prenant en compte la probabilité de collision que vont subir les paquets de données. A travers des simulations, nous

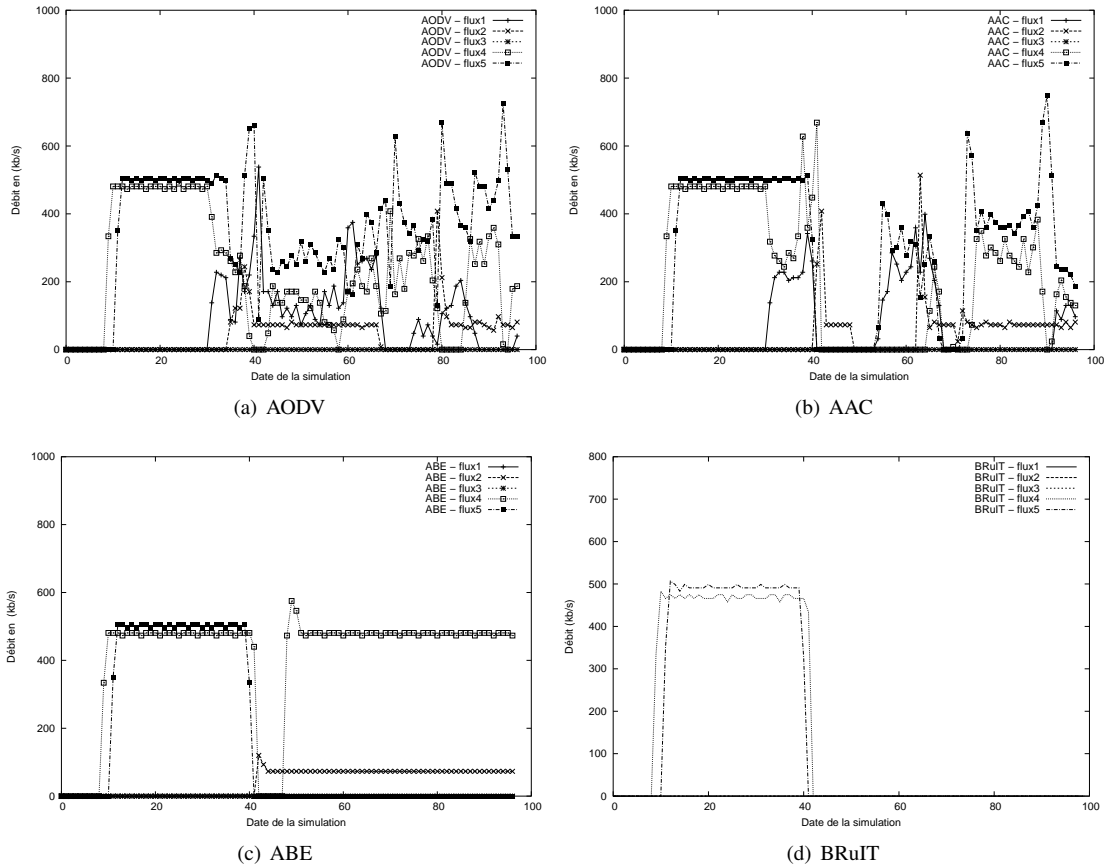


Fig. 8

DÉBITS OBTENUS AVEC AODV, AAC, ABE ET BRUIT EN CAS DE MOBILITÉ

avons montré la robustesse et la précision de notre estimation que nous avons intégrée dans un protocole pour pouvoir en comparer les performances avec d'autres approches existantes. Les simulations montrent que les flux sont routés avec le débit demandé par l'application sans aucune dégradation du débit même en cas de mobilité.

REFERENCES

- [1] Andreas Johnsson, Bob Melander, and Mats Björkman. Bandwidth Measurement in Wireless Network. Technical report, Mälardalen University, Sweden, March 2005.
- [2] Vaduvur Bharghavan, Alan J. Demers, Scott Shenker, and Lixia Zhang. MACAW: A Media Access Protocol for Wireless LAN's. In *SIGCOMM*, pages 212–225, 1994.
- [3] Claude Chaudet and Isabelle Guérin-Lassous. Evaluation of the BRuIT protocol. In *Proceedings of VTC 2005*, Stockholm, Sweden, May 2005.
- [4] Claude Chaudet, Isabelle Guérin Lassous. BRuIT - Bandwidth Reservation under InTerferences influence. In *In Proceedings of European Wireless 2002 (EW2002)*, Florence, Italy, Feb 2002.
- [5] Frank Y. Li, Mariann Haugea, Andreas Hafslund, Oivind Kure and Pal Spilling. Estimating Residual Bandwidth in 802.11-based Ad Hoc Networks: An empirical Approach. In *Proceedings of The Seventh International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2004)*, Abano Terme, Italy, September 2004.
- [6] K. Sanzgiri, I. D. Chakeres, and E. M. Belding-Royer. Determining Intra-Flow Contention Along Multihop Paths in Wireless Networks. In *In proceedings of BroadNet*, San Jose, California (USA), October 2004.
- [7] L. Chen and W. Heinzelman. QoS-aware Routing Based on Bandwidth Estimation for Mobile Ad Hoc Networks. *IEEE Journal on Selected Areas of Communication*, 3, 2005.
- [8] Bob Melander, Mats Bjorkman, and Per Gunningberg. A new end-to-end probing analysis method for estimating bandwidth bottlenecks. In *Proceedings of the Fifth Global Internet Symposium in held in conjunction with Globecom 2000*, San Francisco, USA, November 2000.
- [9] Ravi Prasad, Margaret Murray, Constantinos Dovrolis, and K. Claffy. Bandwidth estimation: metrics, measurement techniques, and tools. *IEEE Network*, 17(6):27–35, November 2003.
- [10] R. de Renesse, M. Ghasseman, V. Friderikos, A.H Aghvami. Adaptive Admission Control for Ad Hoc and Sensor Networks Providing Quality of Service., Technical report, King College London, May 2005.
- [11] Ronan de Renesse, Mona Ghasseman, Vasilis Friderikos, A. Hamid Aghvami. QoS Enabled Routing in Mobile Ad Hoc Networks. In *IEE 3G 2004*, 2004.
- [12] C. Sarr, C. Chaudet, G. Chelius, and I. Guérin Lassous. A node-based available bandwidth evaluation in IEEE 802.11 ad hoc networks. In *First International Workshop on System and Networking for Smart Objects (SANSO)*, Fukuoka, Japon, July 2005.
- [13] Srinivasan Seshan, Mark Steem and Randy H Katz. SPAND : Shared Passive Network Performance Discovery. In *USITS - Usenix Symposium on Internet Technologies and Systems*, Monterey, December 1997.
- [14] Yaling Yang and Robin Kravets. Contention Aware Admission Control for Ad Hoc Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 4:363–377, 2005.