

ABCD : Un protocole *cross-layer* pour la diffusion vidéo dans des réseaux sans fil *ad-hoc*

Claudio GRECO, Marco CAGNAZZO, Béatrice PESQUET-POPESCU

Institut Télécom – Télécom-ParisTech,
Département Traitement du Signal et des Images
46 rue Barrault, 75634 Paris Cedex 13, France
{greco,cagnazzo,pesquet}@telecom-paristech.fr

Résumé – Ces travaux présentent un protocole *cross-layer* pour la diffusion d'un flux vidéo dans un réseau sans fil *ad-hoc* en régime de mobilité. Le protocole permet de bâtir dynamiquement un réseau *overlay* de diffusion par arbres, optimisé de manière distribuée par rapport à un réseau sans fil sous-jacent. Chaque arbre est utilisé pour envoyer une description vidéo de manière indépendante des autres. Le protocole proposé permet la diffusion vidéo avec un taux de perte négligeable et un délai acceptable, même vis-à-vis d'un taux élevé de connexions/déconnexions des nœuds, grâce à l'indépendance des chemins des descriptions.

Abstract – In this work, we present a cross-layer protocol for video streaming in mobile ad-hoc networks. The protocol builds a multi-tree overlay network, optimised w.r.t. the underlying wireless network; then, the video descriptions are sent independently, one on each tree. The proposed protocol allows video streaming with negligible loss rate and short delay, even under high churn, thanks to the path independence among the descriptions.

1 Introduction

La diffusion en temps réel de la vidéo dans les réseaux mobiles *ad-hoc* (MANET) est un sujet de recherche très actif dans le monde académique comme dans l'industrie, ses applications permettant de fournir un moyen de communication robuste et qui passe bien à l'échelle, dans un environnement sans infrastructure préexistante, comme c'est le cas des applications militaires ou de secours.

Le problème de transmettre de la vidéo en temps réel dans des réseaux non fiables est souvent approché avec des techniques de codage par descriptions multiples (Multiple Description Coding ou MDC [1]), qui donnent un certain degré d'immunité vis-à-vis des pertes, inévitables dans les réseaux non fiables, notamment les réseaux pair-à-pair et les réseaux *ad-hoc*. L'utilisation du MDC équivaut à chercher un compromis entre l'efficacité de l'encodage (en termes de rapport débit/distorsion) et la robustesse du décodage. Nos travaux se placent dans le même contexte que les travaux de Lamy-Bergot *et al.* [2], qui ont traité le problème d'utiliser le MDC pour la diffusion vidéo dans un environnement *ad-hoc*.

Les alternatives les plus fréquentes au MDC pour adapter un flux vidéo aux canaux avec pertes sont l'utilisation d'un réseau d'*overlay* conjointement à l'encodage vidéo hiérarchique [3] ou le codage réseau appliqué sans un *overlay* explicite [4].

Les travaux actuels étendent la première version du protocole ABCD, qui a été récemment proposée [5]. Cette ex-

tension, tout comme le protocole original, ne dépend pas de la technique MDC choisie ; en revanche, les expériences ont été réalisées en utilisant une technique MDC proposée par les auteurs [6].

Le reste de cet article est organisé de la manière suivante : dans la Section 2, on explique le fonctionnement du protocole dans ses fonctions de base ; puis, dans la Section 3, on décrit les améliorations proposées. Les résultats expérimentaux sont présentés dans la Section 4. Finalement, dans la Section 5, on donne les conclusions finales.

2 Le protocole ABCD

Dans cette section, on présente le fonctionnement de base du protocole ABCD, visant à construire un arbre *multicast* pour la diffusion en temps réel de la vidéo.

Le protocole ABCD permet de bâtir un réseau *overlay* comportant la superposition de N arbres de *multicast*, où N est le nombre de descriptions dans lesquelles le flux est encodé. Dans la pratique, le cas le plus intéressant est pour $N = 2$. Le but du protocole est de choisir une topologie d'*overlay* qui minimise à la fois le nombre moyen de sauts des nœuds vers la source vidéo et le nombre total de paquets envoyés ; bien entendu, chaque nœud essaie aussi de maximiser le nombre de descriptions reçues, afin de maximiser sa qualité vidéo.

Pour minimiser le nombre de paquets protocolaires échangés, on a mis en œuvre une double stratégie : d'un

côté on minimise le nombre de nœuds *actifs*, c'est à dire, chargés de retransmettre les paquets vidéo reçus ; de l'autre, on essaie de maximiser l'information qu'un nœud peut recevoir sans faire de requêtes explicites.

Ces deux objectifs sont atteints grâce à la même technique : l'introduction d'un mécanisme de *broadcast* fiable, qui permet à plusieurs nœuds de profiter du même paquet envoyé, en réduisant fortement le risque de collision qui est typique du *broadcast* classique et qui, pour le *broadcast* multi-saut dans les réseaux *ad-hoc* sans fil, impose un compromis entre débit et aire de diffusion [7]. La technique de *broadcast* fiable implémentée par ABCD consiste simplement dans l'exécution d'un échange RTS / CTS / ACK (tel qu'il est prévu par le standard IEEE 802.11) avec un pair désigné par l'envoyeur, qui prend le nom de *pair de contrôle*. Bien que cette stratégie ne garantisse pas *a priori* une immunité complète aux collisions, les résultats expérimentaux démontrent que l'incidence des collisions est négligeable dans le cas des expérimentations réalisées, notamment pour une densité inférieure à environ 60 nœuds par rayon de transmission au carré.

La formation de l'*overlay* commence par un message d'annonce, envoyé par la source, qui contient l'identifiant de la source et le nombre de descriptions dont le flux se compose. Chacun des nœuds qui sont dans le rayon de transmission de la source (c'est à dire ses *voisins*) reçoit ce message et y répond avec un message d'attachement pour chaque description. Un message d'attachement contient l'adresse du nœud qui l'a envoyé, la description souhaitée et un ensemble d'informations sur l'état du nœud. Ce message permet à la source de maintenir, pour chaque description, une liste des nœuds intéressés au flux (ses *filles*) ; dès que la liste contient au moins un nœud, et tant qu'elle n'est pas vide, la source sera *active*, c'est à dire, elle enverra les paquets de la description. Les attachements sont envoyés par chacun des nœuds fils périodiquement, afin de confirmer à la source qu'il souhaite continuer à recevoir le flux ; en absence de message d'attachement, le nœud est effacé de la liste. D'ailleurs, ces messages d'attachement périodiquement envoyés par les voisins de la source jouent à leur tour le rôle d'annonce pour leurs voisins qui ne sont pas directement à proximité de la source. Ces nœuds peuvent à leur tour envoyer un attachement à un des voisins de la source, qui deviendra ainsi leur parent. Un nœud qui reçoit un message d'attachement deviendra donc actif sur cette description, et le restera jusqu'au moment où il ne recevra plus d'attachements qui sont lui adressés. Un nœud actif renvoie en *broadcast* les paquets vidéo reçus ; ces paquets sont reçus par son parent aussi, donc ses attachements peuvent être joints aux paquets vidéo. Cette procédure se répète jusqu'au moment où tous les nœuds pour lesquels un chemin vers la source existe sont connectés, en formant, pour chaque description, un *arbre* de diffusion.

3 Améliorations proposées

Dans cette section on explique en détail les améliorations proposées pour le protocole ABCD, qui permettent d'améliorer la qualité de l'*overlay* et de réduire l'*overhead* dû aux messages de contrôle.

Lorsqu'un nœud a entre ses voisins plusieurs nœuds actifs (appelés nœuds A) où attachés (appelés nœuds B), il doit choisir son parent selon un critère d'optimisation. Même s'il est déjà attaché à un parent, il peut s'avérer qu'un candidat meilleur rentre dans son rayon de transmission et donc il abandonnera son parent courant pour le nouvel arrivé.

Pour chaque description, la fonction que les nœuds tendent à minimiser est :

$$J = \omega_h h + \omega_a a + \omega_d d - \omega_g g + \omega_q q$$

où h est le nombre de sauts vers la source, a est le nombre de nœuds actifs visibles au nœud courant, d est le nombre de descriptions sur lesquelles le nœud est attaché au même parent, g est le nombre de fils attachés au même parent que le nœud sur la même description, q est la longueur de la queue d'envoi du parent et les valeurs ω sont des poids positifs. Toutes ces informations sont jointes à l'entête des paquets d'attachement (et donc, des paquets vidéo aussi). La diversité des chemins pour les deux descriptions, et donc l'indépendance des pertes, dépend du terme $+\omega_d d$: plus la valeur du poids ω_d sera élevée, plus les nœuds choisiront des parents différents pour les deux descriptions. Le prix à payer pour une plus grande diversité est le nombre plus élevé de nœuds actifs, qui risque d'augmenter la congestion du canal.

Dans la fonction J , le terme $-\omega_g g$ fait que les nœuds essaient de maximiser le nombre de « frères » dans leur choix du parent. La raison de ce choix est qu'un nœud reste actif jusqu'à ce qu'il reçoit les attachements d'*au moins un* fils ; donc, les nœuds attachés au même parent peuvent envoyer leurs attachements avec une probabilité décroissante avec g (dans l'implémentation actuelle, $p = \log_K \frac{K}{g}$), pour réduire la congestion du réseau sans risquer la désactivation du parent. Pour réduire ultérieurement le risque d'une désactivation accidentelle, le pair de contrôle du dernier paquet vidéo reçu envoie toujours son attachement.

Quand la topologie de l'*overlay* reste constante, les attachements périodiques ne contiennent plus d'informations utiles. Pour minimiser la congestion, les attachements sont plus fréquents quand il y a des changements de topologie (comme un remplacement de parent) à propager, mais leur fréquence diminue au fur et à mesure qu'un nœud reste attaché au même parent. Il existe, en tous cas, une fréquence minimale.

Le choix du pair de contrôle est fait de manière aléatoire ; chaque fils n de l'envoyeur a une probabilité d'être choisi proportionnelle au nombre de ses « descendants », c'est à dire, des nœuds dont le chemin vers la source passe par n . Ce choix est fait pour maximiser l'espérance du

TABLE 1 – Caractéristiques techniques des cartes réseau simulées.

| | |
|--------------------------|----------------------|
| Modèle de Propagation | TwoRayGround |
| Porteuse | 2.472 GHz (Canal 13) |
| Puissance d'Émission | 15 dB m |
| Seuil de Collision | 10 dB |
| Sensibilité du Récepteur | -82 dB m |
| Portée Nominale | 25 m |

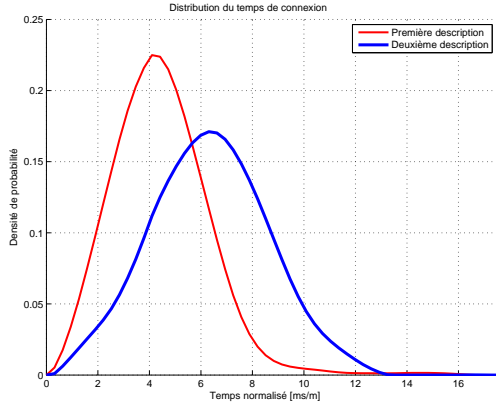


FIGURE 1 – Densité de probabilité du temps nécessaire pour recevoir le flux. Le temps est normalisé par rapport à la distance de la source.

nombre de nœuds protégés vis-à-vis des pertes.

4 Résultats expérimentaux

Afin de valider le protocole, nous avons mis en œuvre une implémentation d'ABCD pour le simulateur à événements discrets *ns2* [8], qui modélise en détail la couche MAC/PHY 802.11, en tenant en compte des collisions, nœuds cachés, interférences, *etc.* Les paramètres de la simulation ont été basés sur les caractéristiques techniques de la carte réseau ORiNOCO 11 b/g [9], résumés dans le Tableau 1.

Le protocole ABCD a été testé dans plusieurs conditions, notamment en termes de densité, nombre de nœuds et débit du flux. Sauf dans les cas de densité supérieure à 20 par ensemble de voisins, qui est plus de trois fois la densité optimale [10], et le cas de réseau non-connecté, le protocole garantit qu'en régime stationnaire 100 % des nœuds reçoit toutes les trames vidéo.

Si un chemin existe entre chaque nœud et la source, en moyenne les nœuds reçoivent au moins une description dans environ 200 ms et les deux dans environ 300 ms. Dans la Figure 1, on présente la densité de probabilité du temps de connexion, normalisé par rapport à la distance de la source (dont le nombre de sauts dépend); on peut observer qu'en moyenne les nœuds se connectent à la première description dans 4 millisecondes par mètre (par exemple, un nœud qui est à 50 m de la source se connecte

dans 200 ms) et à la deuxième dans 6.

En cas de déconnexion de 50 % des nœuds, presque tous ceux qui restent reçoivent encore au moins une description et environ 50 % d'eux en reçoit deux, grâce à la diversité de chemin et au fait qu'un nœud est souvent dans le rayon de deux nœuds actifs. Il faut environ 500 ms pour que tous les nœuds reçoivent les deux descriptions, bien que la topologie continue à changer pendant environ 2s encore, dans lesquelles la topologie est optimisée pour trouver à chaque nœud le parent optimal.

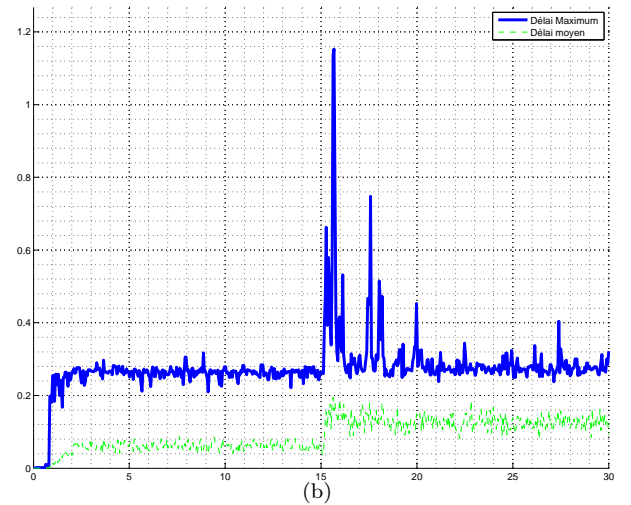
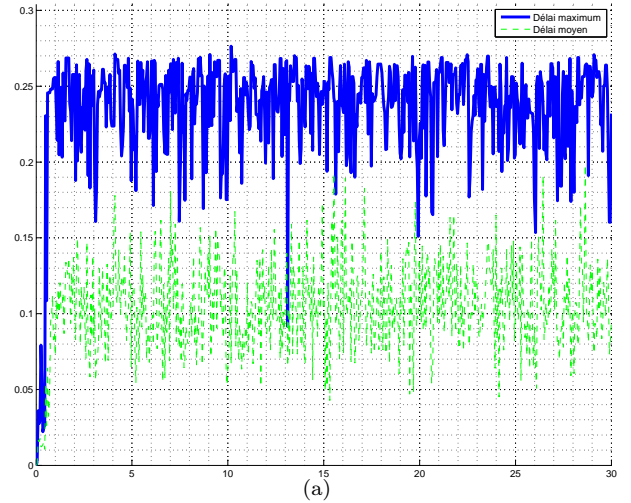


FIGURE 2 – Délai moyen et maximum en fonctions du temps (en secondes) : (a) scénario avec 60 nœuds dans $75 \times 75 \text{ m}^2$; (b) scénario avec 100 nœuds dans $140 \times 140 \text{ m}^2$, 50 % des nœuds se déconnecte à $t = 15 \text{ s}$.

Quand la topologie est à régime, le délai moyen source-nœud est de l'ordre des 100 ms et le délai maximum de l'ordre des 250 ms. Dans les situations de brusque changement du nombre de nœuds connectés (connexions où

TABLE 2 – Nombre moyen de nœuds actifs.

| Nombre de nœuds | 10 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
|--|-----|-----|-----|-----|------|------|
| Nœuds actifs (au moins une descr.) | 1.0 | 2.6 | 5.7 | 8.8 | 14.4 | 27.8 |
| Nœuds actifs actifs (deux descriptions) | 1.0 | 1.3 | 1.5 | 1.8 | 3.2 | 7.8 |

TABLE 3 – *Overhead* dû aux attachements.

| Nœuds | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <i>Overhead</i> | 2.02 % | 2.89 % | 4.62 % | 5.73 % | 5.91 % |
| Nœuds | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 |
| <i>Overhead</i> | 6.42 % | 6.94 % | 8.70 % | 9.16 % | 9.62 % |

déconnexions d'environ 50 % des nœuds), le délai moyen reste de l'ordre des 200 ms, mais le délai maximum peut arriver à environ 1 s (voir la Fig. 2). En tous cas, un tel délai est toujours transitoire et ne se produit pas pour plus de 4 ~ 5 trames, qui sont considérées perdues.

Dans le Tableau 2, on présente le nombre moyen de nœuds actifs pour une densité fixée à 12 nœuds par ensemble de voisins pour un nombre de nœuds variable ; on peut remarquer que le nombre de nœuds actifs augmente de manière moins que linéaire, c'est à dire, le protocole passe bien à l'échelle.

Dans le Tableau 3 on présente l'*overhead* dû aux attachements, c'est à dire le pourcentage de paquets d'attachement sur le total des paquets envoyés. On remarque un *overhead* très acceptable, entre 2.0 % et 9.6 %, en fonction du nombre de nœuds.

Finalement, dans la Figure 3 on peut voir la qualité moyenne de la vidéo décodée pour un réseau utilisant ABCD en comparaison avec deux réseaux qui utilisent un *flooding* sans *broadcast* fiable, le premier utilisant MDC et le second H.264 standard. Le *flooding* (*inondation*) est une technique de routage où chaque nœud fait suivre tous les messages qu'il reçoit ; la convergence de l'algorithme est assurée par le fait que les messages sont écartés quand ils ont été envoyés un nombre fixé de fois (TTL, *time-to-live*, ici fixé à 16) [11].

La qualité est mesurée en termes de PSNR (*Peak Signal to Noise Ratio*), défini par : $PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{255^2}{EQM} \right)$, où EQM est l'erreur quadratique moyenne.

5 Conclusions

La diffusion de la vidéo sur des réseaux mobiles *ad-hoc* est un sujet de recherche très actuel, grâce à la possibilité de fournir un service de communication visuelle robuste et fiable, sans la nécessité d'avoir une infrastructure préexistante. Dans ce contexte, nous avons récemment proposé un protocole *cross-layer* pour la génération d'un réseau d'*overlay* visant à la diffusion efficace d'un flux vidéo encodé par descriptions multiples qui exploite les propriétés du moyen *broadcast*, grâce à un mécanisme original de

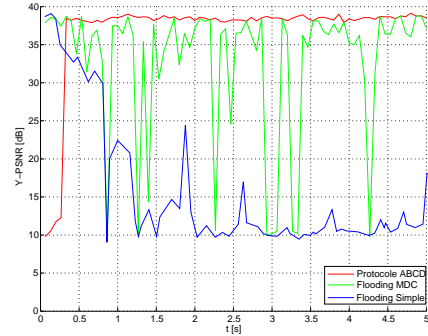


FIGURE 3 – Qualité vidéo moyenne pour 100 nœuds avec ABCD (“Foreman”, CIF, 30 fps, 1.8 Mbps).

réserve du canal.

Dans ces travaux, nous avons proposé des extensions du protocole qui améliorent la qualité de l'*overlay* (selon une métrique opportunément définie) et qui réduisent l'*overhead* dû aux messages de contrôle échangés pour maintenir l'*overlay*. Les résultats montrent que la technique proposée permet la livraison d'un flux vidéo avec un délai faible et une perte de qualité négligeable.

Références

- [1] V. K. GOYAL, « Multiple description coding : compression meets the network », *IEEE Signal Proc. Mag.*, vol. 18, no. 5, p. 74–93, 2001.
- [2] C. LAMY-BERGOT, B. CANDILLON, B. PESQUET-POPESCU et B. GADAT, « A simple multiple description coding scheme for improved peer-to-peer video distribution over mobile links », in *IEEE PCS '09*, 2009.
- [3] J. VILLALÓN, P. CUENCA, L. OROZCO-BARBOSA, Y. SEOK et T. TURLETTI, « Cross-layer architecture for adaptive video multicast streaming over multirate wireless LANs », *IEEE J. Sel. Area Comm.*, vol. 25, no. 4, p. 699–711, 2007.
- [4] P. CHOU, Y. WU et K. JAIN, « Practical network coding », in *ALLERTON*, 2003.
- [5] C. GRECO et M. CAGNAZZO, « A cross-layer protocol for cooperative content delivery over mobile ad-hoc networks », *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*, vol. 7, no. 1–2, p. 49–63, 2011.
- [6] C. GRECO, M. CAGNAZZO et B. PESQUET-POPESCU, « H.264-based multiple description coding using motion compensated temporal interpolation », in *IEEE MMSP '10*, (Saint-Malo, France), Oct. 2010.
- [7] A. EL FAWAL, J. LE BOUDEC et K. SALAMATIAN, « Multi-hop broadcast from theory to reality : Practical design for ad-hoc networks », in *AUTONOMICS*, 2007.
- [8] « The Network Simulator – ns-2 ». Website.
- [9] « Proxim ORiNOCO 11b/g client PC card specifications », 2006.
- [10] E. ROYER, P. MELLIA-SMITH et L. MOSER, « An analysis of the optimum node density for ad-hoc mobile networks », in *IEEE ICC '01*, 2002.
- [11] B. WILLIAMS et T. CAMP, « Comparison of broadcasting techniques for mobile ad-hoc networks », in *ACM ISMAHNC '02*, 2002.