

# Modélisation Analytique du protocole Multi-Bande CSMA/CA

Baher MAWLAWI<sup>1,2,3</sup>, Jean-Baptiste DORÉ<sup>1</sup>, Nikolai LEBEDEV<sup>2,3,4</sup>, Jean-Marie GORCE<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>CEA-Leti Minatec, 17 rue des Martyrs, 38054 Grenoble Cedex 9, France

<sup>2</sup>Université du Lyon, INRIA, France

<sup>3</sup>INSA-Lyon, CITI-INRIA, F-69621, Villeurbanne, France

<sup>4</sup>CPE Lyon, BP 2077, F-69616, France

baher.mawlawi@cea.fr, jean-baptiste.dore@cea.fr  
lebedev@cpe.fr, jean-marie.gorce@insa-lyon.fr

**Résumé** – Les réseaux basés sur la méthode d'accès CSMA / CA - RTS / CTS (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance – Request To Send / Clear To Send) ont montré leur limite pour des réseaux chargés. La principale cause de cette sensibilité est l'augmentation de la probabilité de collision avec la charge du réseau. Dans ce travail, nous proposons un nouveau protocole qui s'appuie sur un mécanisme CSMA/CA - RTS/CTS. Afin de réduire la probabilité de collision, nous proposons une stratégie basée sur la division en sous bande du message RTS. Une analyse théorique basée sur les chaînes de Markov est proposée pour calculer analytiquement le débit saturé. La méthodologie suivie et les validations par des simulations sont décrites.

**Abstract** – Networks based on CSMA/CA-RTS/CTS (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance – Request To Send / Clear To Send) have shown their limit for crowded networks. The main cause is that the collision probability increases with the network load. In this work, we propose a new protocol based on CSMA/CA – RTS/CTS mechanism. In order to reduce the probability of collision, we propose a strategy based on the division in sub-bands for RTS message. A theoretical analysis based on Markov chain is proposed to compute analytically the saturated bitrate. The adopted methodology and the validation by simulations are described.

## 1 Introduction

De nos jours, les appareils sans fil sont largement déployés dans notre société. Dans les années à venir il est prévu une explosion du nombre de terminaux pouvant communiquer sans intervention humaine. Afin de limiter la part des échanges de messages de contrôles précédant une communication les protocoles d'accès aléatoire et ou opportunistes sont envisagés [12]. Ces protocoles tel le CSMA / CA - RTS / CTS (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance – Request To Send / Clear To Send) pourraient être adoptés pour de nombreuses raisons : ils permettent de fonctionner avec toute la bande passante disponible dans un environnement de nombre inconnu de dispositifs [1], fonctionnent d'une manière répartie [2] et conduisent à un déploiement moins cher car ils ne nécessitent pas de planification, d'interopérabilité et de complexité de gestion [3].

Cependant, lorsque le CSMA / CA est utilisé, une dégradation importante en terme de performance du système a été démontré, en particulier dans les réseaux chargés [4, 5]. Pour éviter de gaspiller les ressources radio en nombre limitées, de nombreuses études ont proposé de diviser le canal en plusieurs sous-canaux [6, 7].

Un protocole CSMA multicanal pour des réseaux sans fil à multi-sauts est proposé dans [8]. Les auteurs proposent de diviser la bande disponible en plusieurs canaux et de sélectionner

un canal libre au hasard pour la transmission de paquets. Il est montré via des simulations que le protocole CSMA multicanal fournit un meilleur débit que le protocole CSMA utilisant un seul canal.

Ces travaux appliquent la version de base de CSMA / CA pour chaque sous canal dans le but d'améliorer le débit et de réduire la probabilité de collision de paquets entre les utilisateurs. En fait, ils ont obtenu des transmissions simultanées sur les différents sous-canaux. Toutefois, comme la durée des paquets sera multipliée par le nombre de sous-canaux, la performance du système sera pénalisée en termes de délai de transmission. Pour cela, nous proposons d'étudier un meilleur compromis en utilisant la stratégie de division de canal uniquement pour les messages RTS, tandis que l'ensemble de la bande sera conservée pour les autres (CTS, données et ACK).

Le document est présenté comme suit. Nous expliquons et nous décrivons dans la section II le protocole proposé. Nous proposons un modèle analytique du système dans la section III basé sur des chaînes de Markov. La section IV présente une validation du modèle théorique par des simulations. Enfin, la section V est réservée pour la conclusion.

## 2 Modélisation du Système

Sans perte de généralité, nous considérons un scénario où une pluralité de stations transmet des paquets à un point d'accès (PA). Les performances du système sont étroitement liées au nombre de collisions entre les paquets transmis simultanément. Considérant un canal symétrique et idéal (couche physique parfaite sans perte de paquets) avec un mécanisme RTS / CTS, les collisions entre paquets ne peuvent se produire que pendant la transmission des messages RTS.

Le multiplexage fréquentiel (orthogonal) des messages RTS est considéré. Ainsi, un seul canal est divisé en  $n$  sous-canaux lors de la transmission des RTS. Il convient de mentionner que la durée d'un paquet RTS est dans ce cas multipliée par un facteur  $n$  lorsque la bande de fréquence est réduite d'un facteur  $n$ , et ceux pour préserver la capacité de la liaison.

Nous supposons que tous les nœuds ont la connaissance de la taille des sous-canaux et de la fréquence centrale. La stratégie proposée est utilisée pour réduire les collisions entre les paquets de différents utilisateurs (nœuds source), qui sont disposés à accéder en même temps à un point d'accès commun (nœud destinataire) et cela en introduisant un degré de liberté supplémentaire avec le choix d'un sous-canal. Notez que le récepteur est à l'écoute de tous les sous-canaux simultanément.

On suppose qu'il a été alloué, pour chaque station (STA), un sous-canal de RTS parmi les  $n$  possibles. Si un signal est détecté sur au moins un sous-canal, le canal est déclaré occupé. Ensuite, une période (exprimée en nombre de slot de temps) d'un compteur d'attente est choisie aléatoirement dans l'intervalle  $[0, CW-1]$ , où  $CW$  est un entier représentant la fenêtre de contention. Une fois que le canal est détecté disponible sur une durée DIFS, le compteur de temporisation est décrémenté d'une unité (un slot de temps). Le compteur d'attente se fige quand le canal est occupé, et reprend lorsque le canal est de nouveau disponible.

Lorsque le compteur d'attente arrive à zéro, la source (STA) envoie un message de demande d'autorisation (RTS) vers le nœud de destination en utilisant son sous-canal. Il attend alors de recevoir un message d'autorisation (CTS) du nœud de destination (point d'accès) avant de transmettre ces données. Du côté du nœud destination l'ensemble des sous-canaux sont écoutés simultanément. Si un ou plusieurs RTS est détecté, le point d'accès (PA) diffuse un message CTS sur tous les sous-canaux indiquant la station autorisée à communiquer.

La STA choisie envoie ses données et attend de recevoir l'acquittement du PA. Les données et le message d'acquittement (ACK) sont envoyés sur l'ensemble des sous-canaux.

La fenêtre de contention ( $CW$ ) est un nombre entier entre  $CW_{min}$  et  $CW_{max}$ . La fenêtre de contention est initialement réglée à la valeur minimale ;  $CW = CW_{min}$ . Chaque fois qu'un nœud source est impliqué dans une collision RTS, elle augmente le temps d'attente de transmission en doublant la fenêtre de contention jusqu'à la valeur maximale  $CW_{max} = 2^m \times CW_{min}$ , où  $m$  est le nombre d'étapes de repli. Inversement, dans le cas d'une transmission réussie, le nœud réinitialise sa

fenêtre de contention à la valeur  $CW_{min}$ .

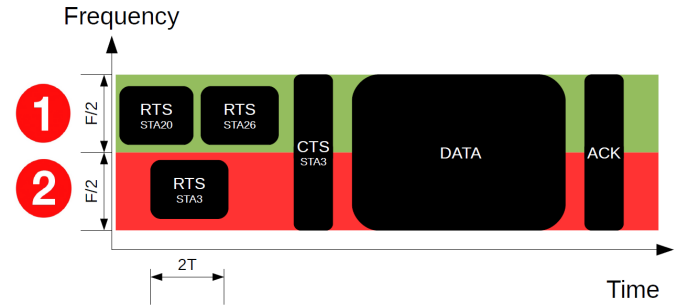


FIGURE 1 – Multibande CSMA/CA - RTS/CTS scénario.

Décrivons un exemple simple qui considère le cas de trois STA, STA3, STA20, STA26 et un PA. La figure 1 illustre la façon dont la collision peut être réduite en divisant le canal RTS en deux sous-canaux. Le premier sous-canal a été alloué aux STA20 et STA26. Le deuxième sous-canal a été alloué à la station STA3. Les stations tentent d'envoyer un signal RTS sur son sous-canal. Du côté de récepteur, une collision se produit sur le sous-canal 1 alors que le message RTS peut être décodé sur le sous canal 2. Le PA choisit donc la STA3 et envoie un message CTS sur tous les sous-canaux présents indiquant que la STA3 a gagné l'accès au canal. Toutes les stations reçoivent et décodent le CTS et seulement STA3 tente d'envoyer ses paquets au cours d'une quantité définie de temps (plusieurs slot de temps). Une communication réussie a lieu lorsque le PA répond par un acquittement qui est diffusé sur tous les sous-canaux.

## 3 Modélisation Analytique

Dans cette section, le protocole proposé est modélisé analytiquement par des chaîne de Markov dans le cas d'une nombre infini de retransmission [9, 10]. Cela signifie que la station essaie de transmettre le paquet jusqu'au succès en restant bloquée dans l'état d'une fenêtre contention égale à  $CW_{max}$ .

Dans cette partie, nous dérivons analytiquement l'expression du débit en mode saturé (tous les nœuds ont toujours un paquet à envoyer) pour le protocole proposé. Pour cela, nous suivons le même raisonnement que Bianchi [4, 5] pour le protocole de canal unique. L'extension au cas multi canal est proposée en prenant en compte la division en plusieurs sous canaux du message RTS.

Le débit saturé, qui est la charge utile moyenne d'information dans une tranche de temps sur la durée moyenne d'une tranche de temps, peut être exprimé en utilisant l'expression [11] :

$$S^n = \frac{E[\text{informations utile transmis dans un slot temps}]}{E[\text{Durée de slot de temps}]} = \frac{P_s^n \times P_{tr}^n L}{P_s^n \times P_{tr}^n T_s^n + P_{tr}^n \times (1 - P_s^n) T_c^n + (1 - P_{tr}^n) T_{id}} \quad (1)$$

Cette formulation est strictement équivalente à celle proposée par Bianchi [11] mais nous allons voir par la suite comment ces variables changent en fonction de  $n$ , le nombre de sous canaux.

Les exposants se réfèrent au nombre des bandes de RTS ;  $P_{tr}^n$  est la probabilité qu'il y aura au moins une transmission dans le système qui considère  $n$  canaux de RTS dans le temps considéré ;  $L$  est la taille moyenne de paquets de données utiles ;  $T_s^n$  est le temps moyen nécessaire pour transmettre un paquet de la taille  $L$  (y compris les périodes d'espacement inter-frames [4]) ;  $P_s^n$  est la probabilité d'une transmission réussie ;  $T_{id}$  est la durée de la période d'inactivité (un seul slot de temps) ; et  $T_c^n$  est le temps moyen passé dans un état de collision.  $T_c^n$  et  $T_s^n$  peuvent être calculés pour le mode de transmission RTS / CTS avec :

$$\begin{cases} T_s^n = n \times RTS + SIFS + \sigma + CTS + SIFS + \sigma + H \\ \quad + L + SIFS + \sigma + ACK + DIFS + \sigma \\ T_c^n = n \times RTS + DIFS + \sigma \end{cases} \quad (2)$$

Où  $H$ ,  $L$ , et  $ACK$  sont les temps de transmission nécessaires pour envoyer l'en-tête des paquets, la charge utile, et l'acquittement, respectivement.  $\sigma$  est le délai de propagation. L'objectif principal de cet article est de calculer  $P_{tr}^n$  et  $P_s^n$ .

La probabilité de transmission et la probabilité de succès pour  $n$  sous-canaux prises en compte dans le système sont données par :

$$P_{tr}^n = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \pi_i)^{N_i} \quad (3)$$

$$P_s^n = \frac{1 - \prod_{i=1}^n (1 - N_i \pi_i (1 - \pi_i)^{N_i - 1})}{1 - \prod_{i=1}^n (1 - \pi_i)^{N_i}} \quad (4)$$

$N_i$  est le nombre de stations actives affectées au sous-canal  $i$  et  $\pi_i$  est la probabilité qu'une station associée au sous-canal  $i$  émette dans un slot de temps choisie d'une façon aléatoire. Les équations 3 et 4 montrent que les probabilités de transmission et de succès pour l'ensemble du système sont équivalentes à au moins une transmission avec succès sur un sous-canal.

On peut montrer que l'expression de  $\pi_i$  s'exprime de la manière suivante :

$$\pi_i = \frac{2}{1 + W_{min_i} + p_i W_{min_i} \sum_{k=0}^{m_i-1} (2p_i)^k} \quad (5)$$

Cette probabilité d'accès au canal est inversement proportionnelle à la fenêtre de contention minimale et à la probabilité de collision ( $p_i$ ) liée à chaque état de backoff. Dans le cas où le nombre d'utilisateur actif présent dans le système est réparti de manière égale sur tous les sous-canaux, la probabilité de transmission et de succès pour l'ensemble du système peuvent être exprimées de la manière suivante :

case 1 :  $N$  est multiple de  $n$  :

Dans ce cas,  $\pi_1 = \pi_2 = \dots = \pi_i = \dots = \pi_n = \pi$  and  $N_1 = N_2 = \dots = N_i = \dots = N_{n-1} = N_n = \frac{N}{n}$

$$P_{tr}^n = 1 - (1 - \pi)^N \quad (6)$$

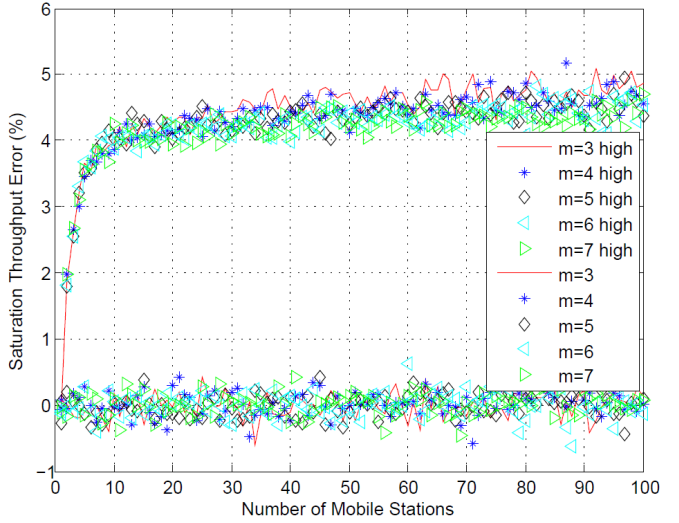


FIGURE 2 – Erreur (%) entre le modèle analytique et la simulation pour deux valeurs différentes de  $CW_{min}$ .

$$P_s^n = \frac{1 - (1 - \frac{N}{n} \pi (1 - \pi)^{\frac{N}{n} - 1})^n}{1 - (1 - \pi)^N} \quad (7)$$

Il faut noter que le cas de  $n = 1$  correspond au résultat donné par Bianchi [11].

case 2 :  $N$  n'est pas multiple de  $n$  :

La répartition des stations sur les bandes peut être exprimée par l'équation 8.

$$\begin{aligned} N_1 &= \left\lfloor \frac{N}{n} \right\rfloor \\ N_2 &= \left\lfloor \frac{N - N_1}{n - 1} \right\rfloor \\ N_i &= \left\lfloor \frac{N - \sum_{k=1}^{i-1} N_k}{n - k} \right\rfloor \\ N_n &= N - \sum_{k=1}^{n-1} N_k \end{aligned} \quad (8)$$

Les probabilités de succès et de transmission liées à ces cas sont données par les équations 3 et 4.

## 4 Validation

Afin de valider l'expression analytique du débit, nous considérons le cas de deux sous-canaux RTS avec une allocation équi-repartie des stations. Nous considérons également une couche physique du type 802.11n dont les paramètres sont rapportés dans le tableau 1.

La figure 2 représente l'erreur relative entre le modèle analytique et les résultats de simulation du protocole proposé en fonction du nombre de stations dans le réseau. La différence qui apparait est négligeable (inférieure à 5 %) et elle est du même ordre que ce que l'on a dans le cas mono bande. Cette

erreur peut s'expliquer par les hypothèses de modélisation que nous avons considéré :

- Pour toute station donnée, la probabilité de collision,  $p_i$ , est constante et indépendante de l'historique des collisions de la station et de toutes les autres stations.
- La probabilité de collision ne dépend pas de la phase de temps au cours de laquelle la transmission est faite.

Ces hypothèses se vérifient dans le cas d'une fenêtre de contention minimale importante et la présence d'un grand nombre de stations mobiles (la loi des grands nombres).

Remarque : la simulation avec une fenêtre minimale de contention de taille importante ( $CW_{min} = 2^{20}$ ) a été réalisée et l'erreur tend vers zéro. Même si ce paramètre n'a pas d'intérêt pratique, il sert à valider la modélisation. Ces courbes sont illustrées sur la figure 2 pour différent nombre d'état de backoff légendées par « high ».

|                   |                       |
|-------------------|-----------------------|
| Packet payload    | 8184 bits             |
| MAC header        | 272 bits              |
| PHY header        | 128 bits              |
| ACK length        | 112 bits + PHY header |
| RTS length        | 160 bits + PHY header |
| CTS length        | 112 bits + PHY header |
| Channel Bit Rate  | 72.2 Mbit/s           |
| Propagation Delay | 1 $\mu$ s             |
| SIFS              | 10 $\mu$ s            |
| Slot Time         | 9 $\mu$ s             |
| DIFS              | 28 $\mu$ s            |

TABLE 1 – Paramètres de la couche physique 802.11n 20Mhz

Il faut noter que ce protocole améliore les performances du système en termes de débit et de délai par rapport au protocole mono bande (adopté dans le standard Wifi par exemple) et spécialement pour les réseaux chargés. Les améliorations introduites par ce protocole par rapport à l'état de l'art sont décrites dans notre travail précédant [13].

## 5 Conclusion

Dans ce travail, nous avons proposé un nouveau protocole d'accès basé sur la technique CSMA/CA - RTS/CTS. Ce protocole réduit la probabilité de collision des messages RTS dans le but d'améliorer les performances du système en termes de débit saturé. Nous avons proposé une modélisation analytique en se basant sur les chaînes de Markov. Les résultats de simulations montrent que l'erreur de modélisation est très faible ce qui valide notre étude théorique.

## Références

[1] C.-S. Hwang and J. Cioffi, "Opportunistic csma/ca for achieving multiuser diversity in wireless lan," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 6, pp. 2972–2982, 2009.

[2] J. Ni and R. Srikant, "Distributed CSMA/CA algorithms for achieving maximum throughput in wireless networks," in *Information Theory and Applications Workshop*, 2009, 2009, pp. 250–250.

[3] H. Xiaoben, "Self-Organized and Distributed Radio Resource Management Scheme for CSMA/CA Based IEEE 802.11 WLAN," in *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2007. *WiCom 2007. International Conference on*, 2007, pp. 2048–2053.

[4] G. Bianchi, "IEEE 802.11-saturation throughput analysis", *Communications Letters, IEEE*, vol. 2, no. 12, pp. 318–320, dec. 1998.

[5] G. Bianchi, L. Fratta, and M. Oliveri, "Performance evaluation and enhancement of the csma/ca mac protocol for 802.11 wireless lans," in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1996. PIMRC'96., Seventh IEEE International Symposium on*, vol. 2, oct 1996, pp. 392–396 vol.2.

[6] Y. Zhang, X. Zhang, and D. Yang, "Performance analysis of channelaware multichannel csma in wireless networks," in *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE*, 2008, pp. 1657–1660.

[7] A. Raniwala and T. cker Chiueh, "Architecture and algorithms for an ieee 802.11-based multi-channel wireless mesh network," in *INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE*, vol. 3, 2005, pp. 2223–2234 vol. 3.

[8] A. Nasipuri, J. Zhuang, and S. Das, "A multichannel csma mac protocol for multihop wireless networks," in *Wireless Communications and Networking Conference, 1999. WCNC. 1999 IEEE*, 1999, pp. 1402–1406 vol.3.

[9] P. Chatzimisios, A. Boucouvalas, and V. Vitsas, "IEEE 802.11 packet delay-a finite retry limit analysis," in *Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM '03. IEEE*, vol. 2, Dec 2003, pp. 950–954 Vol.2.

[10] P. Chatzimisios, A. Boucouvalas, and V. Vitsas, "IEEE 802.11 packet delay-a finite retry limit analysis," in *Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM '03. IEEE*, vol. 2, Dec 2003, pp. 950–954 Vol.2.

[11] M. H. Manshaei and J.-P. Hubaux, "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function : Bianchi model," March 2007.

[12] A. Laya, L. Alonso and J. Alonso-Zarate, "Is the Random Access Channel of LTE and LTE-A Suitable for M2M Communications ? A Survey of Alternatives," March 2007.

[13] B. Mawlawi, J.-B. Doré, N. Lebedev and J.-M. Gorce, "Performance Evaluation Of Multiband CSMA/CA With RTS/CTS For M2M Communication With Finite Retransmission Strategy", *Fourth International Conference on Selected Topics in Mobile & Wireless Networking (MoWNet'2014)*, September 2014.