

Équité pour réseau ad hoc Wi-fi

Fanilo Harivelo

IREMIA, Université de La Réunion
BP 7151, 15 Avenue R. Cassin
97715 Saint Denis Messag 9, France
Email: Fanilo.Harivelo@univ-reunion.fr

Pascal Anelli

IREMIA, Université de La Réunion
BP 7151, 15 Avenue R. Cassin
97715 Saint Denis Messag 9, France
Email: Pascal.Anelli@univ-reunion.fr

Abstract— La norme IEEE 802.11 est devenue un standard de la technologie sans fil. Cependant, son utilisation dans les réseaux ad hoc pose des problèmes de performance et en particulier, en terme d'équité d'accès. Cet article présente une méthode d'accès équitable (FWM : *Fair Wireless MAC*) qui est une extension de l'applicabilité de la méthode d'accès de 802.11 aux réseaux ad hoc. Pour cela, un mécanisme de type tonalité d'occupation est couplé à la détection de la porteuse afin de synchroniser les états des noeuds adjacents à une communication. En étendant la connaissance du voisinage des noeuds, la résolution des contentions de 802.11 peut de nouveau s'appliquer efficacement. L'inéquité due à la transmission sans fil est également traitée par FWM. La solution proposée est tirée de l'analyse des causes d'inéquité de 802.11 dans un réseau ad hoc. FWM sera comparé aux solutions de type tonalité d'occupation. L'appréciation de la solution proposée est faite avec le simulateur NS-2 sur des situations présentant des phénomènes d'inéquité.

I. INTRODUCTION

L'équité d'accès au canal est un objectif important pour les réseaux sans fil. Le partage du support dans un réseau ad hoc repose sur les conditions de trafic et également sur la position relative des nœuds les uns par rapport aux autres. Précisément, certains nœuds peuvent être en situation de famine au vu de la position géographique qu'ils occupent vis-à-vis de leurs voisins. L'accès au support leur est devenu quasiment impossible. Il devient alors très difficile dans ces conditions d'envisager un contrôle des ressources. Ce contrôle est particulièrement important lorsque l'on souhaite diversifier les services de communication sur des réseaux pour lesquels les capacités sont faibles et dont la qualité du canal varie significativement dans le temps. L'objectif d'équité d'accès au support est une des principales propriétés que doit offrir une méthode d'accès.

En fait, l'inéquité d'accès entre des nœuds physiquement voisins provient d'une méconnaissance du voisinage. Sur un lien sans fil, pour qu'une communication par la méthode IEEE 802.11 *Distributed Coordination Function* (DCF) [1] se déroule correctement, celle-ci nécessite que les deux extrémités se coordonnent. DCF comporte un mécanisme de synchronisation entre la source et la destination mais à cause des différences de portée entre détection et transmission [2], elle perd en efficacité. Le problème d'inéquité provient du fait que DCF fonctionne imparfaitement en mode ad hoc. L'approche étudiée sous le nom de FWM (*Fair Wireless MAC*) s'inscrit dans la continuité de DCF. Elle la rend opérante dans les situations inéquitables. FWM présente l'avantage de rendre

la solution indépendante de la topologie, auto-configurable et simple dans sa mise en œuvre. Le principe est d'ajouter un canal de signalisation hors bande. Ce canal est exploité selon un mode tonalité d'occupation (*busy tone*) [3]. FWM utilise le canal de signalisation pour informer les voisins d'une communication ou tentative de communication. Ce canal est intégré dans la procédure d'écoute de la porteuse. Les évaluations de cette solution ont montré qu'une inéquité perdurait à cause des instants de démarrage de la procédure d'accès au support. Ces instants restaient différents entre les nœuds. Par conséquent, FWM intègre un mécanisme de synchronisation du démarrage de la procédure d'accès au support pour les émetteurs. Cette synchronisation est réalisée par l'émission d'un signal par la station désynchronisée sur un deuxième canal de signalisation.

Les problèmes d'inéquité en réseau ad hoc passent en premier lieu par l'accès au support. Aussi, l'étude se concentre sur les communications directes. Elle pourra ensuite être étendue sur les communications indirectes.

Les mécanismes à base de tonalité d'occupation BTMA [3] et DBTMA [4] traitent les problèmes de station cachée et station exposées. FWM étend ces mécanismes par la résolution du problème de réception de l'acquittement (ACK) et le support d'équité. Le problème de réception de l'ACK apparaît lorsque deux stations exposées émettent simultanément. Si la première station termine plus tôt sa transmission que la deuxième station, sa réception de l'ACK va être corrompue par l'émission de la deuxième station. La première station va alors conclure à une collision et accentuer le mécanisme d'évitement de collision. Cela a pour conséquence la dégradation du débit total.

La suite de ce document est organisée de la manière suivante : la section II rappelle quelques notions sur la méthode DCF et identifie les causes de l'accès inéquitable sur réseaux ad hoc ; la section III présente la conception d'une solution propre à résoudre les problèmes d'inéquité ; la section IV évalue la solution proposée dans des situations caractéristiques ; la section V met en perspective le présent travail par rapport aux autres études dans ce domaine.

II. PROBLÈMES D'INÉQUITÉ DE DCF SUR RÉSEAUX AD HOC

La méthode d'accès DCF repose sur le principe de CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) qui consiste à déterminer l'activité du canal par son

écoute. L'activité du canal est déduite par la détection d'une onde porteuse effectuée au niveau physique mais également par une onde porteuse virtuelle faite au niveau de la couche MAC. Au niveau physique, la présence d'une onde est due à l'émission d'un nœud. Au niveau logique, la porteuse est déduite de la durée de la transmission en cours qui a été annoncée dans l'en-tête de la trame. Les nœuds à la réception de cette information l'enregistrent dans leur vecteur d'allocation réseau (NAV : *Network Allocation Vector*). La durée comprend un temps inter-trame (SIFS : *Short Inter-Frame Space*) et le temps de transmission d'un ACK. Un nœud souhaitant émettre une trame doit vérifier que le canal est resté inoccupé pendant une période au moins égale à un délai appelé DIFS (*DCF Inter Frame Space*). Si le canal est occupé ou devient occupé, le nœud doit retarder sa transmission jusqu'à ce que le support redevienne libre pendant une durée de DIFS. Le retard est déterminé par le tirage d'une valeur aléatoire appelée délai de *backoff*. Ce délai est décrémenté tant que le canal est inoccupé et arrêté dès que celui redevient actif. Quand le délai de *backoff* a atteint la valeur nulle, le nœud peut entamer sa transmission. Le tirage aléatoire du *backoff* est effectué dans un intervalle appelé fenêtre de contention (CW : *Contention Window*). La taille de cette fenêtre est fonction du nombre de tentatives de transmission. Sa taille est doublée à chaque tentative infructueuse. Chaque échec indique que l'étalement des demandes dans le temps n'a pas été assez important. Le tirage doit se faire sur un intervalle plus important. Une fois la trame émise et le délai SIFS (*Short Inter Frame Space*) écoulé, l'émetteur doit recevoir un ACK. Autrement, la trame de données émise est considérée comme perdue, le nombre de tentative est incrémenté et la procédure de *backoff* est reprise.

Une des caractéristiques de la transmission sans fil provient de l'atténuation du signal en fonction de la distance. Le signal peut être reçu sans pour autant être décodé au niveau trame. Ce cas définit une zone de détection dont la portée est notée r_s . La zone de transmission correspond à une réception correcte de la trame dont la portée est notée r_t . La portée de la détection est supérieure à celle de transmission ($r_s > r_t$). DCF prend en compte l'atténuation du signal par l'introduction du délai EIFS (*Extended Inter-Frame Space*). Quand un nœud reçoit une trame dont il peut décoder l'entête au niveau physique mais qu'il ne peut décoder au niveau MAC, il se met en retrait pour une période EIFS afin de ne pas interférer dans la transmission en cours. La période EIFS est environ 7 fois plus longue que la période DIFS.

En supposant l'homogénéité des équipements réseaux en terme de capacité et d'énergie, les situations d'inéquité dans un réseau ad hoc peuvent se résumer à 2 situations (Fig. 1). Dans chaque situation, les paires de nœuds sont à une distance $d > r_t$ l'une de l'autre.

La figure 1(a) montre une organisation de réseau en 3 paires de nœuds. Cette situation illustre une situation de contention déséquilibrée dans laquelle un ou les deux nœuds d'un flot ont un niveau de contention plus important que les nœuds des autres flots. Dans la figure 1(a), le nœud S_1 attend à la fois une inactivité de S_0 et S_2 pour acquérir le support. Alors que les

nœuds S_0 et S_2 n'ont pas connaissance de l'un et de l'autre, ils peuvent acquérir plus souvent le support. La concurrence pour eux est beaucoup plus faible [5]. La figure 1(b) présente le problème bien connu de la station cachée dans lequel la réception du flot 0 est perturbée par l'émission du nœud S_1 . Ce dernier n'a pas connaissance de la communication entre S_0 et D_0 , il fonctionne en toute indépendance et produit de nombreuses collisions au niveau de D_0 [6]. Pour éviter ce genre de situation, DCF fournit un protocole d'échange de trames de contrôle RTS/CTS. L'émetteur envoie avant ses données une trame *Request to Send* (RTS) à la destination. Tous les nœuds recevant cette trame se retirent de la contention pour la durée de la communication. Quand la destination reçoit le RTS, celui-ci accuse réception avec une trame *Clear to Send* (CTS) en précisant la durée de la communication. Les nœuds recevant le CTS se bloquent pour ne pas interférer avec la communication. L'émetteur des données commence sa transmission à la réception du CTS. Cependant, ce protocole est inefficace dans une configuration comme la figure 1(b) car les nœuds ne sont pas en mesure de décoder les trames de contrôles.

Afin d'apprécier l'inefficacité, les deux situations sont évaluées par simulation. L'évaluation de l'équité à l'accès est mesurée au travers du débit écoulé par chaque source de flot. Tous les flots sont identiques et sont émis à débit constant. Au niveau du récepteur, l'effet de capture du canal est inexistant. Cela signifie que la superposition de deux signaux au niveau d'un émetteur est considérée comme étant une collision sans prise en compte de leur puissance. La méthode d'évaluation repose sur la simulation faite avec l'outil NS-2. Le débit de chaque flot prend la valeur de l'interface réseau (c'est-à-dire qu'il génère à un débit maximal). Ainsi un seul flot est suffisant pour charger le lien. La figure 2 montre l'évaluation pour ces deux situations. Nous voyons très bien dans la situation de la contention déséquilibrée (Fig. 1 (a)) que l'émetteur du flot 1 (le nœud S_1) souffre d'un accès particulièrement inéquitable. Il doit attendre que les nœud S_0 et S_2 soient au repos en même temps pour accéder au support. La situation de la station cachée montre également une inéquité d'accès comme précédemment indiquée. Cette situation est même pire car, le flot 0 a disparu. En effet, le nœud S_0 tente de moins en moins souvent l'accès au support du fait de rencontrer chaque fois un échec. Les situations de contention déséquilibrée et de la station cachée sont issues d'une connaissance incomplète des activités du voisinage. Dans la section suivante nous allons étudier une extension à la méthode DCF pour corriger le défaut d'inéquité.

III. FWM : UN MÉCANISME D'ACCÈS ÉQUITABLE POUR RÉSEAUX AD HOC

Une solution au problème d'équité consisterait à concevoir une nouvelle méthode d'accès qui soit propre aux caractéristiques des réseaux ad hoc. Cependant la méthode DCF de 802.11 bénéficie d'une large diffusion. Il a une certaine maturité en terme de stabilité et d'interopérabilité. Il a été démontré que la méthode de reprise des contentions

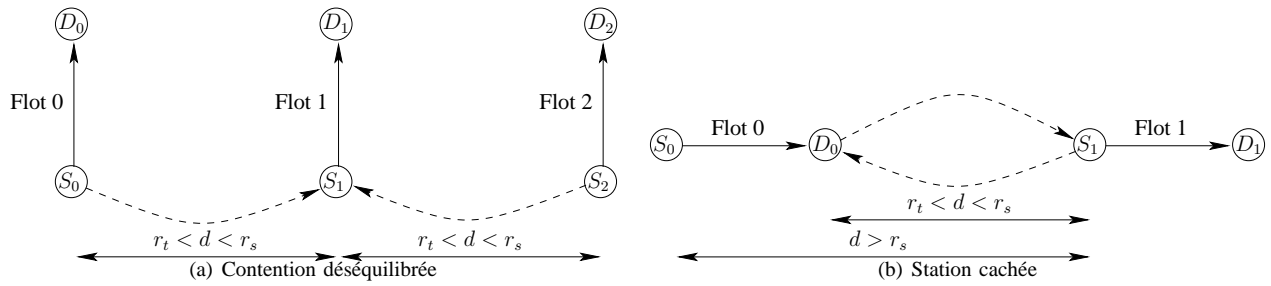


Fig. 1. Les situations d'accès inéquitable

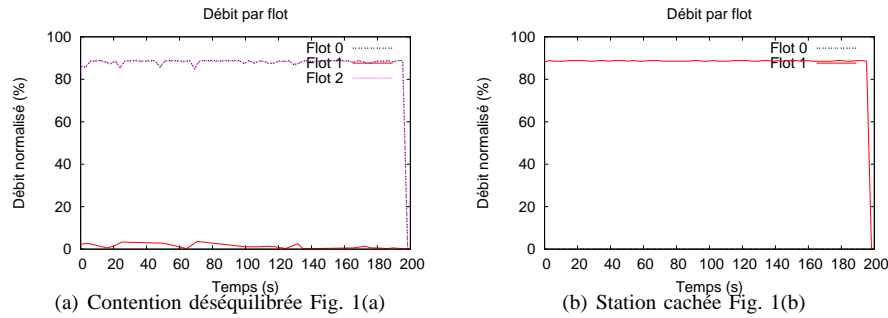


Fig. 2. Répartition des débits en DCF classique

dite de l'*exponential backoff* était stable [7]. Le passé nous a souvent montrés que les nouvelles technologies ont du mal à pénétrer le marché si elle sont en rupture avec celles existantes. Il est raisonnable de penser que la méthode d'accès pour les réseaux ad hoc doit s'inscrire dans la continuité de 802.11 DCF. Les correctifs nécessaires à son bon fonctionnement dans cette configuration de réseau doivent être apportés. C'est en suivant ce principe que la solution à l'inéquité a été entreprise. La démarche consiste, à partir de l'analyse des causes de l'inéquité à l'accès en réseau ad hoc, à proposer des solutions qui soient intégrables dans le protocole existant. Comme le problème se situe au niveau de l'accès au support, l'étude avec des liens directs est suffisante.

A. Problème de la méconnaissance des activités du voisinage

La situation de la station cachée et de la contention déséquilibrée ne pourrait pas se produire si l'état de propre à chaque nœud se propageait à son voisinage. L'état d'un nœud est défini par la transmission en cours. Classiquement, l'émetteur est dans un état d'émission. Le récepteur se trouve dans un état de réception. Un nœud est récepteur qu'il soit le destinataire de la communication ou non. Cela signifie qu'il reçoit une transmission et que donc, le canal est occupé. Autrement, le nœud est dans un état inoccupé et aucune communication n'existe. L'état d'émission d'un nœud est connu des voisins du fait de la méthode d'accès qui repose sur une détection de porteuse. Dans la situation de la contention déséquilibrée, les deux émetteurs de chaque côté savent quand l'émetteur central est en transmission. Le problème réside dans la perception de l'état de réception du nœud. Le nœud S_0 n'a

pas connaissance de la réception du nœud S_1 . C'est à dire qu'il ne détecte rien quand le nœud S_1 est bloqué (en état de réception) à cause de la transmission du nœud S_2 . La non propagation de l'état du nœud concerne donc bien l'état de réception. L'inéquité à l'accès s'explique fondamentalement par la connaissance incomplète de l'état du nœud.

La solution consiste donc à propager l'état de réception d'un nœud dans son voisinage. L'échange RTS/CTS vise à diffuser aux voisins de l'émetteur et du récepteur l'information indiquant qu'une transmission se déroulera entre eux. Le support sera alors réservé pendant toute la période de transmission. Sur un réseau ad hoc, une première idée serait que chaque récepteur (qu'il soit destination ou pas) émette une trame CTS pour indiquer qu'il est dans un état de réception. Le problème de cette solution c'est qu'il faut aussi une méthode d'accès pour l'émission de la trame CTS afin d'éviter leur collision. De plus, cette solution est aussi très sensible à la densité des récepteurs. Une autre difficulté réside dans la différence de portée de détection du signal et la portée de transmission. La trame CTS ne serait pas décodable pour les nœuds situés dans la zone de détection mais au-delà de la zone de transmission. Le mécanisme RTS/CTS s'attache à apporter une synchronisation au niveau MAC, du moment où les nœuds sont à portée de transmission les uns des autres. Dès qu'ils deviennent hors de la portée de transmission, cette approche n'est plus applicable. Par conséquent, l'état de réception d'un nœud doit être déduit d'un signal plus simple. Ce signal doit être présent pendant toute la durée de la transmission. Etant donné que le signal ne peut être transmis sur le même canal

que celui exploité par l'émetteur, un autre canal est requis. Dans ce cas, la synchronisation se déroule au niveau physique.

L'idée serait alors d'utiliser un canal dédié à la signalisation d'une transmission. Cette idée de la gestion de l'accès par des signaux sur des bandes de fréquences différentes a été avancée dans les solutions à tonalité d'occupation BTMA [3] et DBTMA [4] pour résoudre les problèmes de station cachée et de station exposée. Notre approche combine différentes méthodes :

- Détection de porteuse et *backoff* pour ordonner les accès concurrents
- Tonalité d'occupation pour traiter les spécificités du lien sans fil

Dans notre cas, un canal serait nécessaire en complément du canal principal qui reste utilisé selon le principe d'une détection de porteuse. Le canal dédié dit de signalisation servirait à un nœud à informer ses voisins qu'il est dans un état de réception. La transmission sur le canal de signalisation serait de type tonalité d'occupation à savoir un signal binaire (présence ou absence d'un signal). Ainsi un nœud continue d'émettre un signal sur le canal de signalisation tant qu'il est en réception sur le canal principal (même s'il n'est pas la destination de la communication) et s'arrête de signaler quand le canal principal redevient libre. L'intégration de cette fonctionnalité dans 802.11 DCF demande :

- l'introduction d'un canal de signalisation où la transmission est de type tonalité d'occupation et
- une nouvelle condition pour la détection de la porteuse. Un nœud considère le support comme libre si les 2 canaux sont libres. La détection de la porteuse doit se faire donc en combinant à la fois le canal principal et le canal de signalisation. Conséquence, pour le délai de *backoff*, celui-ci est décrémenté quand les 2 canaux sont libres.

Dans la situation de la contention déséquilibrée, les émetteurs des cotés apprennent les activités de l'un, l'autre via l'émetteur de la paire centrale. Celui-ci propage son état de réception à l'autre paire. Cet état est dû à l'émission d'une paire de coté. Ainsi le canal de signalisation revient à constituer un seul support partagé par les 3 paires. Le nœud S_0 est bloqué en même temps que le nœud S_1 est bloqué. L'accès du nœud S_0 s'effectue maintenant en concurrence avec les nœuds S_1 et S_2 . La contention d'accès a été rééquilibrée. Dans la situation de la station cachée, le nœud S_1 connaît, maintenant à l'aide du canal de signalisation, qu'un de ses voisins est dans un état de réception (en l'occurrence le nœud D_0). Le nœud S_1 ne détecte plus le canal libre. Il attend donc la fin de la transmission en cours pour concourir à l'accès.

La figure 3 montre l'évaluation des 2 situations avec le canal de signalisation ajouté à la méthode DCF. Les résultats montrent toujours une inéquité entre les flots. Il est intéressant de noter que l'inéquité a été inversée entre le flot 0 et le flot 1 dans la situation de la station cachée. Le flot 1 souffre maintenant de l'activité du flot 0. L'explication est à chercher du côté de la transmission en 802.11 et à sa traduction au niveau de DCF. Dans DCF, un nœud retarde sa transmission

d'une durée égale à EIFS quand il reçoit une trame qu'il est incapable d'interpréter. Ceci se produit quand le nœud se situe dans la zone de détection mais pas dans la zone de transmission. Pour illustrer ce phénomène, reprenons l'exemple de la contention déséquilibrée. A chaque transmission réussie par une paire de coté, le nœud S_1 reçoit la trame d'acquittement de la destination. Il ne peut pas interpréter cette trame car il n'est pas dans la zone de transmission. Le nœud S_1 active alors l'EIFS. L'accès au support est alors biaisé. En effet, quand une paire termine sa transmission, le nœud S_1 attend un EIFS alors que les autres émetteurs peuvent entamer leur procédure d'accès au support. Dans la situation de la station cachée, le même phénomène est observé : quand le nœud D_0 a reçu la trame de données, il envoie une trame d'acquittement qui est reçue par le nœud S_1 . Comme le nœud S_1 est à portée de détection mais pas de transmission, il n'arrive pas à décoder la trame et active l'EIFS. Le nœud S_1 retarde pratiquement tout le temps sa transmission. Le nœud S_0 peut accéder plus souvent à la transmission.

Le canal de signalisation traite imparfaitement l'équité d'accès car il n'a aucun effet sur l'EIFS. Ce problème introduit entre les nœuds des délais d'attente différents avant le démarrage de la procédure d'accès au support. Bien que ce problème d'EIFS soit dû à la différence de portée entre la détection de la porteuse et le décodage de la trame, on peut considérer qu'il est dû aussi à une perception imparfaite de l'environnement d'un nœud. Enfin on note que les problèmes de la connaissance incomplète et de l'EIFS peuvent exister en même temps sur un réseau. Un accès équitable au support dans un réseau ad hoc doit traiter également ce problème d'EIFS.

B. Problème des différences de portée dit de l'EIFS

Dans la configuration de réseau ad hoc, le problème de l'EIFS cause une différence du temps d'attente entre les émetteurs. La solution consiste à égaliser les temps d'attente. Il y a deux façons de procéder :

- empêcher que l'EIFS s'active ou
- activer l'EIFS pour tous les nœuds en compétition dès qu'un nœud a activé son EIFS.

L'existence même du délai EIFS peut être remise en question. L'EIFS préserve la communication en cours d'une interférence d'un nœud qui n'a pas pu apprendre la valeur d'occupation du support ou ne détecte pas la porteuse de cette communication. Ce nœud est désynchronisé avec la communication en cours. Le choix de conception du comité 802.11 a été de n'avoir qu'un seul canal pour la méthode d'accès. La resynchronisation devait se faire dans le temps. D'où le choix de l'EIFS. Cependant, en mode ad hoc, cela induit une inéquité comme reporté dans [8] et dans la section précédente. A cause du problème d'atténuation du signal, un seul canal pour DCF en mode ad hoc est insuffisant. Dans le contexte d'un canal de signalisation destiné au récepteur d'une communication pour synchroniser l'état de réception, il apparaît redondant d'ajouter le délai EIFS pour la resynchronisation. En effet, il n'y a plus de désynchronisation possible.

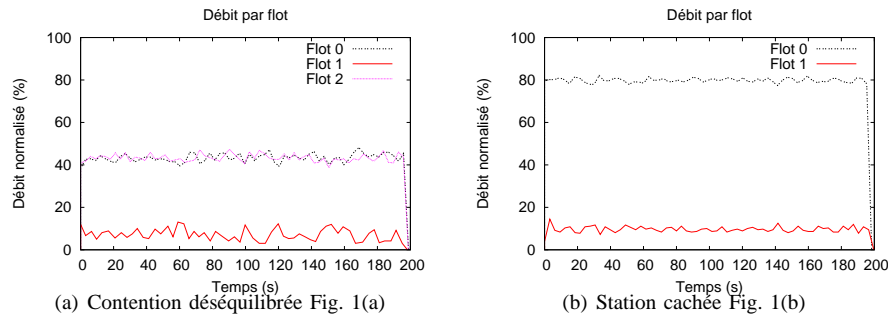


Fig. 3. Répartition des débits avec le canal de signalisation

La figure 4 montre l'évaluation de la situation de la station cachée avec le canal de signalisation et en supprimant le délai EIFS. Une amélioration de l'équité est perceptible. Cependant, le phénomène d'inéquité subsiste. Ceci s'explique par le fait que les deux émetteurs ne détectent pas la fin de la transmission du flot 1 au même instant. En effet, le nœud S_0 détecte le support libre lorsque le nœud D_0 arrête d'émettre sur le canal de signalisation. Il n'entend pas l'acquittement émis par D_1 . Le nœud S_0 entame sa procédure d'accès au support alors que le nœud S_1 est en phase de réception d'acquittement. C'est cet écart de temps au démarrage de la procédure d'accès au support qui donne au nœud S_0 un avantage par rapport à S_1 . L'ordre de grandeur de cet écart se situe au niveau de l'EIFS. En effet, le SIFS et le temps de transmission de l'acquittement vaut $314\mu s$ (contre $364\mu s$ pour EIFS). Inversement, la fin de la transmission du flot 0 ne pose aucun problème. Ceci se traduit par une inéquité en faveur du flot 0 visible sur la figure 4. Nous venons de démontrer que la solution consistant à supprimer purement et simplement l'EIFS n'est pas valable. Il faut donc garder le mécanisme d'EIFS pour équilibrer les attentes.

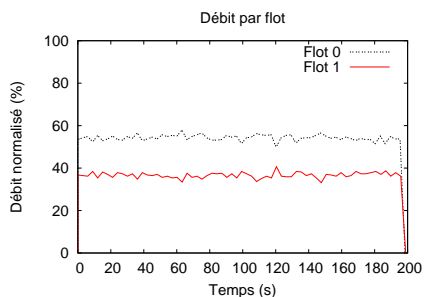


Fig. 4. Répartition des débits avec le canal de signalisation sans EIFS dans le cas de la station cachée Fig. 1(a)

La seconde approche consiste à synchroniser tous les nœuds sur l'activation de l'EIFS. Un signal de synchronisation est émis quand il y a une activation d'un EIFS. La réalisation du signal au niveau physique peut être soit un canal dédié, ou soit dans le canal de signalisation mais avec un signal dont le type est indiqué par sa durée. Dans le premier cas, un canal équivalent à celui que l'on a étudié précédent pourrait servir à

la signalisation de l'activation de l'EIFS. Quoiqu'il en soit, le signal de synchronisation vise à déclencher l'EIFS dans tous les nœuds qui le recevraient. A noter que ce signal n'a pas besoin d'être émis en continu mais serait de type impulsion. Le cas de la station cachée constitue un cas particulier dans le principe précédent. Les émetteurs ne sont pas à portée les uns, des autres. Dans la figure 1(b), le nœud S_0 n'est pas à portée du nœud S_1 quand ce dernier active son EIFS à réception de l'acquittement issu du nœud D_0 . Le signal d'activation de l'EIFS ne sera donc pas reçu par le nœud S_0 . Pour traiter cette situation, il faut que le nœud qui est à l'origine de l'activation de l'EIFS joue un rôle de relais, ici le nœud D_0 . Quand un nœud termine une transmission et qu'il reçoit ensuite quasi immédiatement un signal EIFS, il en déduit qu'il est à l'origine de l'activation de l'EIFS. Il relaie alors le signal pour activer l'EIFS des émetteurs voisins. Ainsi, le nœud S_0 déclenche une attente EIFS à la réception du signal EIFS relayé par le nœud D_0 , une fois que ce dernier a reçu le signal EIFS par le nœud S_1 . Le mécanisme du signal EIFS fonctionne également quand le flot 1 est le facteur déclenchant de l'EIFS. En effet, lorsque le nœud S_1 transmet, le nœud D_0 n'arrive pas à décoder la trame de données reçue. Il active alors un délai d'attente EIFS. Ensuite, il génère un signal EIFS. Les nœuds S_0 et S_1 recevront le signal. Puis, ils vont à leur tour se mettre en période EIFS et geler leur procédure d'accès au support. Entre-temps, le nœud D_1 aura envoyé son acquittement. En effet, l'envoi d'un acquittement ne dépend de l'état du support. La figure 5 montre le résultat de la situation de la station cachée en incorporant la signalisation EIFS. L'inéquité a disparu entre les flots. Le nœud S_0 active son EIFS quand le nœud S_1 active le sien et inversement. L'équité par activation de l'EIFS est obtenue au prix de l'inutilisation du support pendant le délai EIFS. Toutefois, nous avons vu qu'utiliser le support pendant l'EIFS conduit à une inéquité.

Dans [2], les auteurs proposent de distinguer le type des trames par leur longueur afin de déclencher un EIFS dont la durée serait variable en fonction du type de trame déclenchante. Cette solution ne fonctionne que pour des situations où l'émetteur d'un flot est à portée de l'émetteur ou du récepteur d'un autre flot. L'évaluation faite par les auteurs ne montre quasiment aucune amélioration pour la situation de

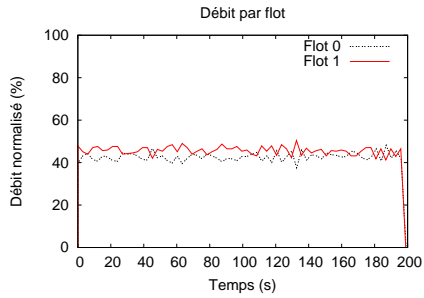


Fig. 5. Répartition des débits avec le canal de signalisation et le signal EIFS dans le cas de la station cachée Fig. 1(a)

la figure 1(b). Enfin si la longueur de la trame ne peut être détectée suite par exemple à une collision, le problème de l'EIFS persiste.

En somme, l'intégration de la présente proposition, dite *Fair Wireless MAC* (FWM), dans 802.11 demande :

- l'introduction de deux canaux de signalisation indépendants de celui qui est utilisé pour la transmission de données. En effet, distinguer deux types de signaux différents sur un seul canal de signalisation est difficile si les signaux se superposent. La transmission sur les 2 canaux est significativement plus simple que dans le canal de données. Elle est du type tonalité d'occupation (*busy tone*).
- l'activation de la période d'attente EIFS pas uniquement à réception d'une trame en erreur mais également sur un signal explicite ;
- la capacité d'un nœud à relayer un signal EIFS dans le canal de signalisation quand il vient de terminer une transmission.

IV. EVALUATIONS DE LA SOLUTION PROPOSÉE

L'évaluation de la proposition FWM est représentée sur la figure 6. L'équité d'accès se mesure par le partage de la bande passante. Tous les émetteurs ont le même flot de données à transmettre. Dans ces conditions, l'équité se mesure avec l'index d'équité [9] $F = \frac{(\sum x_i)^2}{n(\sum x_i^2)}$ (où x_i est le débit écoulé du flot i et n le nombre total de flots). Un partage équitable donne un index de 1 et totalement inéquitable, de $1/n$. La table I donne une évaluation chiffrée des améliorations apportées par la présente proposition FWM. L'index d'équité est satisfaisant pour les 2 situations étudiées. La variabilité du débit total écoulé notée σ est sensiblement la même sauf dans la situation de la contention déséquilibrée. Dans cette situation, elle a diminué de l'ordre de 30% du fait d'une meilleure coordination entre les émetteurs. Le débit total écoulé diminue plus ou moins en fonction de la situation et pour des raisons différentes. Dans la situation de la contention déséquilibrée, le débit total chute de 50%. Il est évident de voir qu'avec DCF d'origine, les 2 nœuds de coté peuvent émettre en même temps et le nœud central ne peut exercer aucune activité. La situation revient en quelque sorte à avoir deux liens. Avec

la nouvelle méthode, les deux liens sont ramenés à un seul lien. Le débit total écoulé chute logiquement de moitié. Le compromis entre équité et efficacité n'est pas nouveau [10]. L'objectif recherché ici n'est pas le débit maximum mais un partage équitable. FWM augmente le débit la paire centrale au prix d'une diminution du débit des deux paires de côté. Dans la situation de la station cachée, le débit total écoulé est plus faible. Ceci s'explique par le fait que l'EIFS bloque toutes les sources. Le support est inutilisé pendant des périodes égales à EIFS.

D'autres évaluations ont été menées dans des situations plus complexes que les cas étudiés précédemment. La figure 7 montre la combinaison des différents problèmes traités jusqu'ici. La figure 8 et la table II montrent les résultats des évaluations.

La situation de la figure 7(a) illustre le problème de l'EIFS [2] dans laquelle un nœud retarde pratiquement tout le temps sa transmission. En effet, le nœud S_0 reçoit une trame qu'il est incapable d'interpréter du fait qu'il se situe dans la zone de détection mais pas dans la zone de transmission. Le nœud S_0 et le nœud D_1 sont dans la zone de détection de l'un, l'autre. L'acquittement émis par I_{01} dans le cadre du flot 0 est reçu correctement par S_0 et D_1 . En revanche, l'acquittement émis par D_1 dans le cadre du flot 1 va occasionner un blocage par EIFS au niveau de la station S_0 . Ainsi le nœud S_0 est bloquée plus longtemps que le nœud I_{01} . Ce dernier pourra donc accéder plus souvent à la transmission.

Sur la figure 7(b), le nœud S_0 est une station cachée du nœud S_1 . Le nœud S_0 souffre du problème de l'EIFS quand le nœud D_1 émet un ACK à S_1 . Dans 802.11 classique, l'effet de la station cachée est plus fort que celui de l'EIFS. En effet, l'ACK déclencheur de l'EIFS n'est jamais envoyé vu que la réception est toujours corrompue. Ainsi, le flot 1 issu du nœud S_1 n'arrive pas à exister. La valeur de l'index d'équité indique que c'est l'inéquité maximale, $1/n$ avec $n = 2$, qui est atteint. Avec la proposition FWM, le défaut d'équité est corrigé tout en conservant un débit total écoulé du même ordre.

La dernière situation de la figure 7(c) traite de la chaîne de nœuds. Cette situation est intéressante car elle représente le fonctionnement d'un réseau ad hoc multi-sauts ou la source et la destination d'un flot communiquent par un lien indirect. Les nœuds sont à portée les uns des autres conduisant à une situation de contention intra-flot [11]. De la table II, FWM montre des variations du débit écoulé en 802.11 plus faible. Ceci s'explique par le fait qu'il y a une meilleure coordination des nœuds dans la chaîne à l'aide du canal de contention.

De nombreuses autres simulations ont été menées avec des tailles de paquet différentes. Les résultats obtenus, décrits dans la table III, corroborent ce qui a été présenté ici. De manière générale, la table montre une équité pour toutes les situations.

V. AUTRES APPROCHES

A. Solutions d'inéquité

Différentes solutions traitent de l'équité sur les réseaux sans fil.

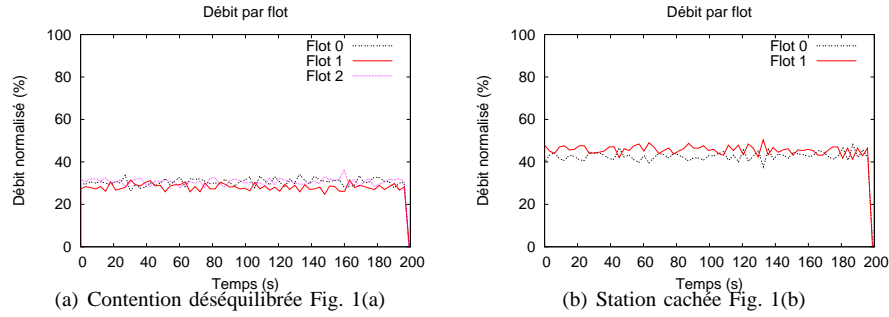


Fig. 6. Répartition des débits avec FWM

Situation	DCF classique			FWM		
	$\sum x_i$	σ	F	$\sum x_i$	σ	F
Fig. 1(a)	176.80	0.92	0.68	89.00	0.66	0.99
Fig. 1(b)	88.66	0.15	0.5	88.14	0.15	0.99

TABLE I

COMPARAISON DE PERFORMANCES POUR LES SITUATIONS CARACTÉRISTIQUES

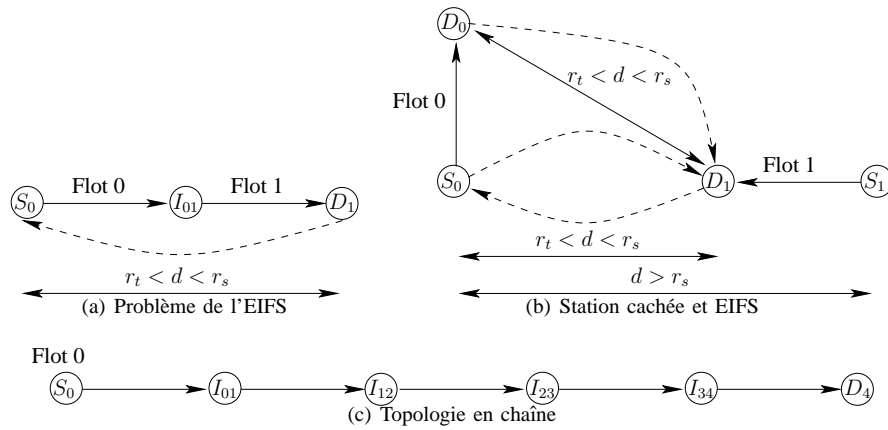


Fig. 7. Les situations d'accès inéquitable

Situation	DCF classique			FWM		
	$\sum x_i$	σ	F	$\sum x_i$	σ	F
Fig. 7(a)	88.72	0.24	0.65	87.97	0.30	0.99
Fig. 7(b)	88.66	0.15	0.5	86.61	0.12	0.99
Fig. 7(c)	16.51	2.16	-	15.64	0.84	-

TABLE II

COMPARAISON DE PERFORMANCES POUR LES SITUATIONS CARACTÉRISTIQUES

La solution présentée dans [12] repose sur l'historique des transmissions antérieures. Elle s'applique sur un réseau ad hoc complet (monosaut). Le partage du support s'effectue par le contrôle du débit d'émission des nœuds. Ce débit est régulé selon une politique AIMD (*Additive Increase Multiplicative Decrease*) [9]. La réussite d'une transmission résulte en une augmentation du débit tandis qu'un échec tend à le réduire. Des heuristiques sont données pour le choix des valeurs des paramètres de AIMD. Elles supposent une connaissance

préalable de la configuration du réseau, dont, le nombre de nœuds.

L'article [13] traite le problème d'inéquité par l'adoption d'une valeur de fenêtre de contention identique pour tous les nœuds. Il supprime le mécanisme de *backoff* de 802.11 et réalise l'évitement de collision par le réglage de la fenêtre de contention. Ce réglage repose sur le nombre d'intervalles de temps disponibles vus par les nœuds. Alors que cette solution amène des améliorations au niveau des performances d'un

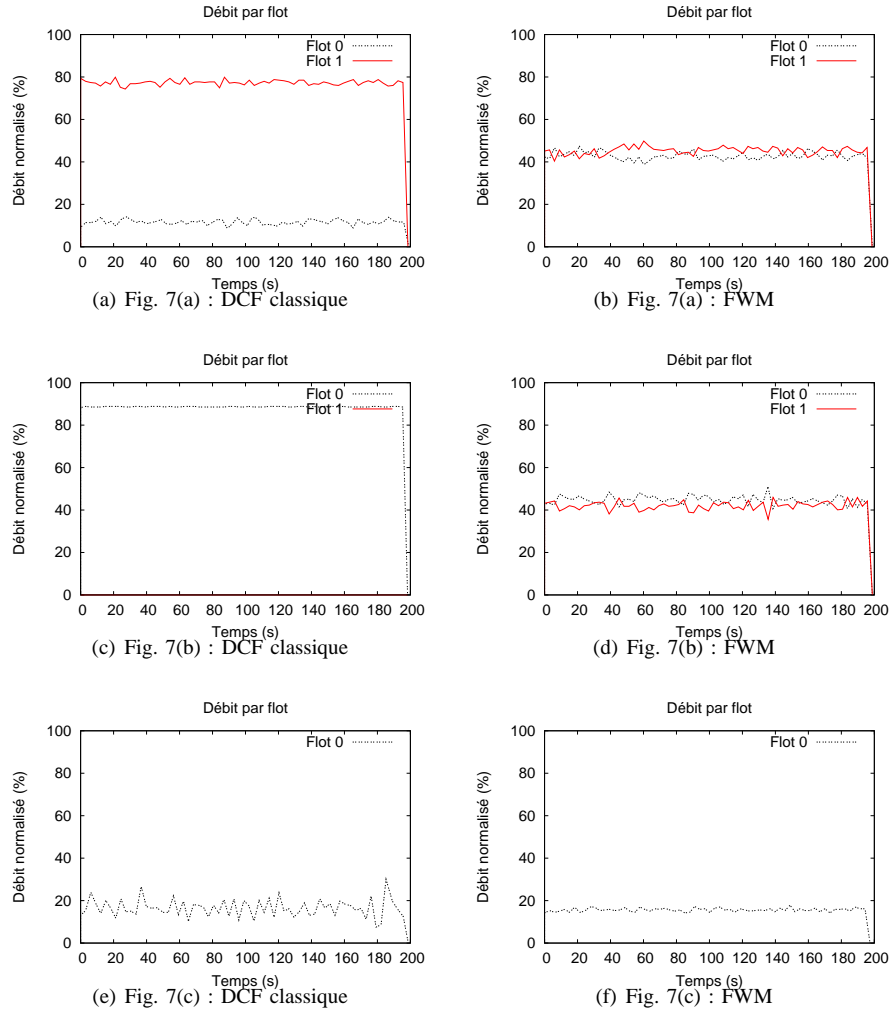


Fig. 8. Répartition des débits dans les situations de la figure 7

Situation	DCF classique			FWM		
	$\sum x_i$	σ	F	$\sum x_i$	σ	F
Fig. 1(a) - 256 octets	133.38	0.62	0.68	65.29	0.31	0.99
Fig. 1(b) - 256 octets	67.16	0.11	0.5	66.00	0.09	0.99
Fig. 7(a) - 256 octets	67.61	0.17	0.64	65.81	0.25	0.99
Fig. 7(b) - 256 octets	67.16	0.11	0.5	62.96	0.07	0.99
Fig. 7(c) - 256 octets	12.65	1.06	-	11.49	0.34	-
Fig. 1(a) - 512 octets	158.77	0.84	0.68	79.04	0.46	0.99
Fig. 1(b) - 512 octets	79.79	0.12	0.5	78.94	0.10	0.99
Fig. 7(a) - 512 octets	79.99	0.21	0.64	78.79	0.29	0.99
Fig. 7(b) - 512 octets	79.79	0.12	0.5	76.65	0.09	0.99
Fig. 7(c) - 512 octets	14.72	1.48	-	13.94	0.65	-
Fig. 1(a) - 1536 octets	183.86	1.16	0.69	92.93	0.76	0.99
Fig. 1(b) - 1536 octets	92.14	0.13	0.5	91.73	0.12	0.99
Fig. 7(a) - 1536 octets	92.04	0.46	0.65	91.62	0.33	0.99
Fig. 7(b) - 1536 octets	92.14	0.13	0.5	90.84	0.12	0.99
Fig. 7(c) - 1536 octets	17.65	1.97	-	16.33	1.28	-

TABLE III

COMPARAISON DE PERFORMANCES POUR TOUTES LES SITUATIONS ÉTUDIÉES AVEC DIFFÉRENTES TAILLES DE PAQUETS

réseau sans fil, elle n'a pas été testée dans des situations de réseau ad hoc caractéristiques d'inéquité.

Le principe de *Probabilistic NAV* (PNAV) [14] consiste à éviter la monopolisation du support par le même

émetteur. A cet effet, l'émetteur ajoute aléatoirement un vecteur d'allocation dans 802.11 après une émission. Cela permet aux autres nœuds d'émettre. La solution est astreinte à un paramétrage pour l'évolution de la valeur du vecteur d'allocation. Toujours est-il que le mécanisme repose sur des paramètres dont les directives sur le choix des valeurs ne sont pas présentées dans l'article.

Bruno et al [15] proposent une régulation de l'accès de chaque nœud au support sur la base d'une estimation de la bande passante consommée par le nœud. Cette régulation est réalisée par l'introduction d'un contrôle d'accès supplémentaire dans le mécanisme de *backoff*. Quand le temps de *backoff* expire, une probabilité de transmission est calculée par l'émetteur. Cette valeur est déduite du taux d'utilisation des slots [16] et de la bande passante consommée par l'émetteur. L'estimation du taux d'utilisation des intervalles de temps suppose la connaissance de la loi de distribution de la taille des paquets.

Une méthode déterministe est proposée dans [17]. Le principe consiste à introduire un temps d'attente selon que le canal soit partagé ou non. Le protocole offre de meilleures performances sur certaines configurations, tandis que pour d'autres configurations, comme celle de la figure 1(b), le problème d'inéquité persiste. Le choix des valeurs des paramètres dépend de la topologie et rend sa mise en œuvre délicate.

Pour résumer, les solutions citées précédemment nécessitent soit, le réglage de différents paramètres, soit la connaissance a priori du réseau ou du modèle de trafic. L'intégration de la proposition présentée dans ce document reste compatible avec DCF. Elle ne requiert aucune connaissance supplémentaire de la configuration du réseau comme reposant sur le protocole DCF.

B. Solutions à tonalité d'occupation

Le concept tonalité d'occupation a été déjà utilisé dans d'autres travaux mais dans des contextes différents.

Busy Tone Multiple Access (BTMA) [3] avance une solution au problème de station cachée qui résout également le problème de station exposée. Pour cela, la station se dote de deux canaux, l'un pour les données et l'autre pour un signal d'occupation ou de signalisation. Lorsque qu'une station perçoit une activité sur le canal de données, elle génère un signal sur le canal de signalisation. Contrairement à des méthodes du type CSMA/CA, BTMA ne s'appuie plus sur l'état du canal de données pour la détermination de l'état du support mais sur le canal de signalisation. Cette approche est valable à condition de ne pas avoir recours aux ACKs. Or, les réseaux sans fil ne s'avèrent pas très fiables, par nature. En effet, les pertes ne sont pas toujours le produit des interférences ou des collisions mais peuvent aussi provenir de l'atténuation du signal. Ainsi, un mécanisme d'ACK est toujours nécessaire afin que la gestion des pertes n'incombe pas aux couches supérieures. Les limitations de BTMA concernent :

- le problème de la réception de l'ACK. L'état du support est déduit du canal de signalisation. Cette déduction ne

fait donc intervenir que l'état de réception. Deux stations exposées peuvent alors transmettre simultanément. Le problème de la réception de l'ACK apparaît lorsque l'une des stations bascule en mode réception de l'ACK pendant que l'autre continue l'émission de sa trame.

- l'inéquité. BTMA est toujours sujet au problème des différences des instants de démarrage de la procédure d'accès (cf section III-A).

Dual Busy Tone Multiple Access (DBTMA) [4] vise la résolution des problèmes de station cachée et de station exposée. Le principe consiste à réserver le support de façon à empêcher les éventuels nœuds interférants de transmettre. Deux canaux de signalisation sont requis. Le premier (canal BT_t) sert à l'émetteur pour signaler l'envoi d'un RTS. Le deuxième (canal BT_r) est utilisé par le récepteur afin de réserver le canal pour la transmission de la trame. L'émetteur émet une tonalité d'occupation sur le canal BT_t pendant la transmission du RTS. Le récepteur génère une tonalité d'occupation sur le canal BT_r pendant la durée annoncée dans le RTS. Un nœud n'engage sa transmission que lorsqu'aucun de ces canaux n'est occupé. Les limitations de DBTMA sont :

- le problème de la réception de l'ACK. Dans DBTMA, le canal BT_t sert à la protection du RTS uniquement. Aucun signal n'est généré par une station sur ce canal lors de la transmission de la trame de données. Ainsi, une station exposée peut commencer son émission. Le problème de la réception de l'ACK intervient lorsque l'une des stations change en mode ACK.
- l'inéquité. La génération de la tonalité d'occupation sur le canal BT_r par un nœud n'est réalisée que lorsqu'il est destinataire de la transmission. Cela est compréhensible, comme BTMA traite uniquement de la réception des données par le récepteur (problème de station cachée). De ce fait, DBTMA ne peut pas régler les problèmes d'inéquité, tels que celui de la situation des trois paires (Fig. 1(a)). DBTMA reste également vulnérable au problème des différences des instants de démarrage de la procédure d'accès (cf section III-A).

FWM traitent les limitations de BTMA et DBTMA :

- le problème de la réception de l'ACK. FWM combine l'écoute sur le canal de données (pour prendre connaissance de l'état d'émission des voisins) et l'écoute de la tonalité d'occupation sur le premier canal de signalisation (pour prendre connaissance de l'état de réception des voisins). La raison est qu'un couple de nœuds en communication alterne les rôles d'émetteur et de récepteur durant l'échange (Données/ACK ou RTS/CTS/Données/ACK). On peut également voir la combinaison des deux écoutes de la manière suivante. L'écoute du canal de données empêche un émetteur interférent de démarrer sa transmission. Ensuite, la génération d'une tonalité d'occupation lors de la réception de l'ACK étend cette interdiction. De ce fait, toute la transmission est protégée. Fondamentalement, l'utilisation de la tonalité d'occupation par

FWM n'est pas uniquement motivée par la résolution du problème de station cachée, mais bien dans la propagation de l'état de réception d'un nœud (que le nœud soit destinataire ou non du signal reçu).

- l'inéquité. L'inéquité est résolue par la resynchronisation des instants de démarrage de la procédure d'accès.

VI. CONCLUSIONS

Ce document présente une méthode d'accès équitable appelée *Fair Wireless MAC* (FWM) qui est une extension de 802.11 DCF pour une utilisation dans les réseaux ad hoc. Son objectif est de corriger l'inéquité à l'accès au support de 802.11. Ce défaut dépend de la localisation du nœud par rapport aux communications dans son voisinage. Les deux situations retenues montrent une inéquité d'accès due à la non synchronisation de l'état d'un nœud avec ses voisins. Par conséquent, toute action d'émission d'un nœud tiers entraînera une collision. La solution proposée vise à maintenir une synchronisation entre les nœuds voisins à l'aide d'un canal de signalisation hors bande. Quand un nœud est en train de recevoir, il émet un signal d'occupation sur le canal de signalisation pour informer tous les émetteurs potentiels dans son voisinage (à portée de communication). La détection de la porteuse doit se faire en prenant en compte le canal de signalisation en plus du canal principal. Cependant, ce mécanisme seul est insuffisant pour assurer un accès équitable. Il faut prendre en compte la non synchronisation du délai EIFS entre les nœuds. Certains nœuds sont contraints d'attendre un délai EIFS avant d'entreprendre la procédure d'accès au support. Le facteur déclenchant de l'émission du signal EIFS est la détection d'une transmission non décodée. Cette différence du délai d'attente est une cause importante d'inéquité d'accès. Le problème induit par le délai EIFS est considéré dans le cadre de la présence d'un canal de signalisation. Plusieurs solutions sont étudiées, leur évaluation a montré que la plus équitable consiste à maintenir et synchroniser l'EIFS pour tous les émetteurs voisins d'un émetteur qui rencontre une situation où il a du activé son EIFS. La synchronisation est faite par un signal émis sur un second canal de signalisation.

L'utilisation du canal de signalisation est de type tonalité d'occupation (*busy tone*) qui a été proposée il y a quelques années pour traiter le cas de la station cachée et de la station exposée [3], [4]. L'approche proposée reprend ces travaux en y apportant une solution au problème de réception de l'ACK et l'inéquité. FWM propose de coupler la méthode de détection de la porteuse pour la transmission des trames de données (CSMA/CA) avec la méthode de tonalité d'occupation. La nature et les opérations de DCF sont conservées.

De nombreuses simulations avec NS-2 montrent que FWM atteint son objectif d'équité. Le débit total a légèrement chuté mais l'équité a fortement augmenté. FWM présente les caractéristiques d'auto-configuration dans la mesure qu'il n'exige aucune capacité de calcul particulière, paramétrage ou connaissance préalable du réseau. Son principal reproche est d'utiliser des canaux de signalisation hors bande. Ces canaux demandent des composants (et donc présente un coût) pour

la gestion des canaux supplémentaires. Toutefois, à cause de l'atténuation du signal, la resynchronisation des nœuds ne peut se faire par un mécanisme temporel mais par un mécanisme spatial, à savoir un signal simple et dédié. Les contraintes de mise en œuvre de FWM restent cependant moindres par rapport à l'avantage apporté à la communication dans les réseaux ad hoc.

REFERENCES

- [1] IEEE 802.11 WG, "Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications," *IEEE standard 802.11*, 1999.
- [2] Z. Li, S. Nandi, and A. K. Gupta, "ECS: an Enhanced Carrier Sensing Mechanism for Wireless Ad-hoc Networks," *Computer Communication*, vol. 28, no. 17, pp. 1970–1984, October 2005.
- [3] F. A. Tobagi and L. Kleinrock, "Packet Switching in Radio Channels: Part II-The Hidden Terminal Problem in Carrier Sense Multiple-Access and the Busy-Tone Solution," *IEEE Transactions on Communication*, vol. 23, no. 12, pp. 1417–1433, 1975.
- [4] Z. J. Haas and J. Deng, "Dual Busy Tone Multiple Access (DBTMA)-A Multiple Access Control Scheme for Ad Hoc Networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 6, pp. 975–985, 2002.
- [5] D. Dhoutaut and I. Guérin Lassous, "Impact d'un fort trafic au delà de la zone de communication dans un réseau ad-hoc multi-sauts," in *Algotel, Meze, France*, 2002, pp. 147–153.
- [6] I. Guérin Lassous, "Quelles performances pour les réseaux WiFi ?" *Techniques de l'Ingénieur, TE 7381*, May 2005.
- [7] N.-O. Song, B.-J. Kwak, and L. E. Miller, "On the Stability of Exponential Backoff," *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 108, no. 4, pp. 289–297, July–August 2003.
- [8] C. Chaudet, D. Dhoutaut, and I. Guérin Lassous, "Performance Issues with IEEE 802.11 in Ad Hoc Networking," *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 7, pp. 110–116, July 2005.
- [9] D.-M. Chiu and R. Jain, "Analysis of the Increase and Decrease Algorithm for Congestion Avoidance in Computer Networks," *Computer Networks and ISDN Systems*, vol. 17, no. 1, pp. 1–14, June 1989.
- [10] J.-Y. L. Boudec, "Rate adaptation, Congestion Control and Fairness: A Tutorial," Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Tech. Rep., November 2005.
- [11] H. Zhai, J. Wang, and Y. Fang, "Distributed Packet Scheduling for Multihop Flows in Ad Hoc Networks," in *IEEE WCNC, Atlanta, Georgia, USA*, March 2004.
- [12] S. Cai, Y. Liu, and W. Gong, "Analysis of An AIMD Based Collision Avoidance Protocol in Wireless Data Networks," in *Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Hawaii, USA*, December 2003.
- [13] M. Heusse, F. Rousseau, R. Guillier, and A. Duda, "Idle Sense: An Optimal Access Method for High Throughput and Fairness in Rate Diverse Wireless LANs," in *ACM SIGCOMM, Philadelphia, PA, USA*, August 2005.
- [14] C. Chaudet, G. Chelius, H. Meunier, and D. Simplot-Ryl, "Adaptive Probabilistic NAV to Increase Fairness in Ad Hoc 802.11 MAC Layer," in *Proceedings of the Fourth annual Mediterranean workshop on Ad Hoc Networks (Med-Hoc-Net), Island of Porquerolles, France*, June 2005.
- [15] R. Bruno, C. Chaudet, M. Conti, and E. Gregori, "A Novel Fair Medium Access Control for 802.11-based Multi-Hop Ad hoc Networks," in *Proceedings of the 14th IEEE Workshop on Local and Metropolitan Area Networks (LanMan) - Chania, Crete, Greece*, September 2005.
- [16] L. Bononi, M. Conti, and E. Gregori, "Runtime Optimization of IEEE 802.11 Wireless LANs Performance," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 66–80, January 2004.
- [17] T. Razafindralambo and I. Guérin Lassous, "Increasing Fairness and Efficiency using the MadMac Protocol in Ad Hoc Networks," in *Networking, Coimbra, Portugal*, May 2006.