

# Équité dans une chaîne de stations IEEE 802.11

Bertrand Ducourthial<sup>1</sup> et Yacine Khaled<sup>1</sup> et Stéphane Mottelet<sup>2</sup>

(1) Heudiasyc UMR CNRS-UTC 6599 (2) LMAC EA 2222  
Université de Technologie de Compiègne, BP20529 60205 Compiègne Cedex (Prénom.Nom@utc.fr)

La norme IEEE 802.11 présente un cas d'inéquité connu sous le nom de « problème des trois paires » [DGL02]. Dans cet article, nous résumons nos résultats [DKM05] concernant sa généralisation. Notre contribution porte sur la mise en évidence du phénomène étendu par simulation, sa modélisation extensible à un nombre quelconque de paires et son étude analytique. Nous terminons par une application pratique de ces travaux, permettant de maximiser l'équité.

**Keywords:** IEEE 802.11, DCF, équité, problème des trois paires

## 1 Introduction

Bien qu'il existe d'autres protocoles pour les communications sans fil, la norme IEEE 802.11 [LAN99] apparaît comme un standard largement utilisé, tant en mode infrastructure (avec un point d'accès) qu'en mode autonome (réseau ad hoc). Deux stations 802.11 doivent utiliser les mêmes fréquences pour se comprendre<sup>†</sup>. Mais si deux stations émettent simultanément, il se produit une collision et la trame n'est pas compréhensible. C'est à la couche *Medium Access Control* (MAC) que revient la tâche du partage du médium de communication et plus particulièrement à la procédure *Distributed Control Access* (DCF) qui utilise un procédé non centralisé. Notons que la norme prévoit une procédure centralisée (PCF) en cas d'utilisation d'un point d'accès, mais cette dernière n'est généralement pas implémentée de sorte que c'est principalement à la procédure DCF que revient le partage équitable du médium.

Les spécificités des communications sans fil rendent délicate la détection des collisions. Aussi la norme implémente-t-elle la technique d'évitement de collision *Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance* (CSMA/CA) : une communication n'a lieu qu'après l'attente préventive d'un délai fixe et d'un délai aléatoire, alors même que le canal est libre. Le délai fixe dépend des situations : SIFS=10  $\mu$ s entre une trame et son acquittement, DIFS=50  $\mu$ s avant une trame de données, EIFS=364  $\mu$ s en cas de réception d'une trame incomprise. Ce dernier cas se produit lorsqu'une station reçoit une trame qu'elle ne peut comprendre. L'en-tête étant envoyée à 1 Mbit/s avec une modulation robuste, la trame est reçue dans une large zone. Mais ce qui suit l'en-tête peut être modulé différemment afin d'augmenter le débit, et en conséquence peut être incompris par les stations trop éloignées de l'émetteur. En attendant un délai EIFS avant d'émettre, la station trop éloignée des autres ne gêne pas leur communication.

Plusieurs études ont montré les imperfections de la couche MAC de la norme 802.11 (cf. [DKM05] et les références citées). Parmi elles, [DGL02, CDGL05] ont étudié un scénario appelé « problème des trois paires ». Il est constitué de paires dans lesquelles un émetteur envoie des données à un récepteur (provoquant l'envoi d'acquiescement par le récepteur). Le scénario combine trois paires alignées réalisant trois communications indépendantes. Cependant l'espacement entre les paires est tel que les trames d'une paire sont détectées mais non comprises par ses voisines, conduisant les stations à utiliser le délai EIFS.

Notre étude porte sur la généralisation de ce scénario à un nombre quelconque de paires, formant une chaîne de  $n$  paires (figure 1). Nous montrons par simulation sous ns-2 [ns] que i) les chances d'accès au

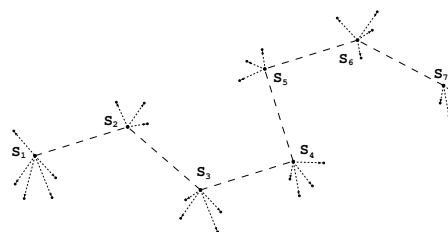


FIG. 1: Chaîne de stations 802.11.

<sup>†</sup> Toutes les données numériques concernant la modulation DSSS, utilisée en Wi-Fi. Voir [DKM05] pour de plus amples détails.

médium pour la  $i^{\text{ème}}$  paire dépendent de la parité de  $n$ , ii) l'équité augmente avec  $n$ , notamment au centre de la chaîne, iii) il existe un comportement asymptotique. La modélisation proposée dans [CGLTG04] est difficilement extensible à un nombre quelconque de paires. Nous proposons donc un modèle analytique plus simple paramétré par un coefficient  $\alpha$ , qui reste très fidèle aux simulations. Le paramètre  $\alpha$  correspond à la probabilité d'émission alors que les voisins sont silencieux. Cette probabilité n'est pas 1 à cause de l'attente préventive. Le modèle permet de calculer la probabilité d'accès au canal des différentes paires pour  $n$  petit en fonction de  $\alpha$ . De plus, il permet de montrer l'existence de l'état stationnaire et du comportement asymptotique, confirmant les simulations. Nous montrons aussi que certaines valeurs de  $\alpha$  permettent de maximiser l'équité exprimée *via* l'entropie. Nous montrons également que pour  $n$  large, l'équité est quasi maximale au centre de la chaîne, et que les simulations tendent vers cet idéal. Finalement, nous faisons le lien entre le paramètre  $\alpha$  et les données numériques liées à la norme IEEE 802.11. En guise d'application, nous maximisons l'équité dans le scénario des trois paires en jouant sur la taille des paquets.

Dans la section 2, nous donnons quelques résultats de simulation. Dans la section 3, nous résumons l'étude analytique. Nous terminons par l'application de notre étude au scénario des trois paires, et par quelques conclusions.

## 2 Étude par simulation

Les simulations ont été faites sous *network simulator* v.2.28 avec le modèle de propagation *two-ray ground* et les paramètres d'une carte Lucent Orinoco 802.11b émettant à 2Mbit/s avec des trames MAC de 1500 octets [DKM05]. La topologie est celle d'une chaîne rectiligne de paires, comportant chacune un unique récepteur, bien que le phénomène soit identique avec plusieurs récepteurs par émetteur et une chaîne non rectiligne telle que présentée sur la figure 1.

Nos simulations confirment les résultats de [DGL02] pour 3 paires (figure 2). Nous trouvons un débit de 1.55 Mbits/s pour les paires extérieures et de 0.04 Mbits/s pour la paire centrale (sachant que le débit d'une paire seule est de 1.59 Mbits/s dans les mêmes conditions).

L'équité s'améliore avec 4 paires car lorsque la paire 1 émet, la paire 2 attend et cela enlève un compétiteur pour la paire 3. Les paires centrales ont donc plus d'opportunité d'émettre que la paire centrale dans la chaîne de 3 paires. Globalement, l'équité est meilleure pour un nombre pair de paires. Dans le cas d'un nombre impair de paires, les paires de numéro d'ordre pair dans la chaîne ont un débit très inférieur, le cas extrême étant donné par la chaîne de 3 paires. La situation s'améliore lorsqu'on se rapproche du centre de la chaîne. Enfin, lorsque  $n$  augmente, on constate l'apparition d'un pallier dès 20 paires dans la chaîne. La figure 2 en bas à droite donne la courbe des débits pour 100 paires.

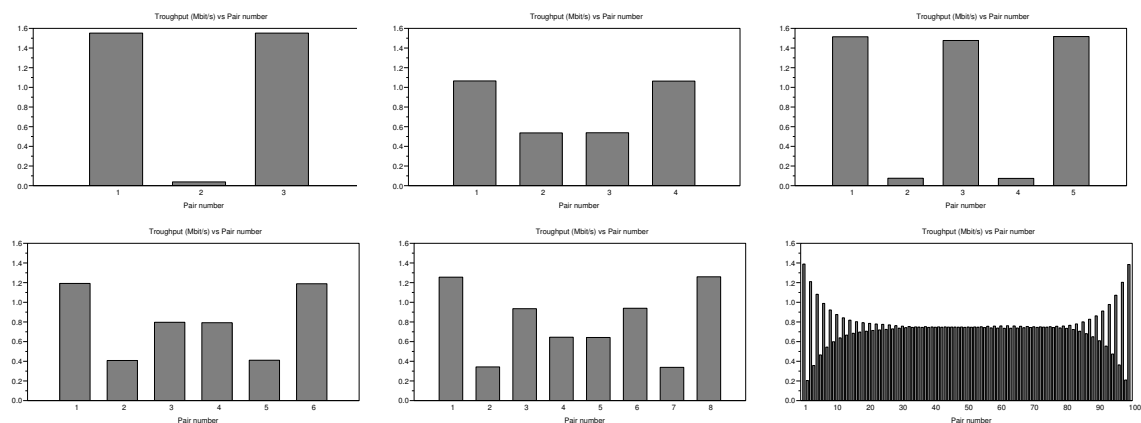
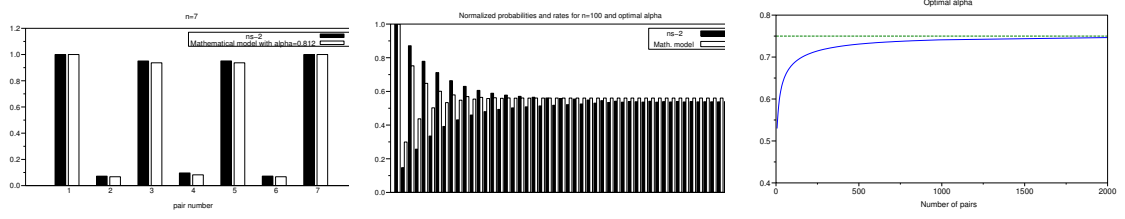


FIG. 2: Débits (non normalisés) dans une chaîne de 3, 4, 5, 6, 8 et 100 paires (simulations sous ns-2).



**FIG. 3:** À gauche : comparaison des résultats de ns-2 et du modèle mathématique pour  $n = 7$ . Au centre : probabilités d'émission normalisées pour  $n = 100$  et  $\alpha = \hat{\alpha}$  et débits normalisés simulés avec ns-2 (première moitié de la courbe symétrique). À droite : valeur de  $\hat{\alpha}$  en fonction de  $n$  (et en pointillés, le seuil de 0.75).

### 3 Étude analytique

On considère une chaîne de  $n$  paires à laquelle on ajoute une paire 0 et une paire  $n + 1$  n'émettant jamais à des fins de normalisation. Notre modélisation est basée sur un système d'équations non linéaires dont la solution donne les probabilités d'émission de chaque paire  $i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) de la chaîne à l'état stationnaire. Pour cela nous considérons tout d'abord le processus aléatoire  $y_i(t)$  prenant la valeur 1 si la paire  $i$  est en train d'émettre au temps  $t$  et 0 si la paire est muette. Puisqu'une paire ne peut émettre que si les paires voisines sont muettes, nous avons l'implication  $y_i(t) = 1 \implies y_{i-1}(t) = y_{i+1}(t) = 0$ . Le processus d'attente supplémentaire est modélisé par le processus  $z_i(t)$  tel que  $P(z_i(t) = 1 | y_{i-1}(t) = y_{i+1}(t) = 0) = \alpha$ , où  $0 < \alpha < 1$  et la paire  $i$  ne peut émettre que si  $z_i(t) = 1$ . Nous avons donc finalement la relation algébrique

$$y_i(t) = z_i(t) (1 - y_{i-1}(t)) (1 - y_{i+1}(t)), \quad i = 1 \dots n.$$

L'étude du comportement stationnaire conduit à considérer l'espérance mathématique  $x_i = \mathbb{E}[y_i(t)]$ , et nous obtenons, en faisant l'hypothèse de l'indépendance des processus  $y_{i-1}(t)$  et  $y_{i+1}(t)$ , le système d'équations non linéaires

$$x_i = \alpha(1 - x_{i-1})(1 - x_{i+1}), \quad i = 1 \dots n, \quad (1)$$

où  $x_i$  est égal à la probabilité que la paire soit en train d'émettre. Nous montrons que ce système admet une solution unique en considérant la méthode itérative  $x_i^{(k+1)} = \alpha(1 - x_{i-1}^{(k)})(1 - x_{i+1}^{(k)})$ ,  $i = 1 \dots n$ , où les  $x_1^k \dots x_n^k$  sont les valeurs à l'étape  $k$  des probabilités d'émission. La convergence vers la solution est assurée pourvu que  $|x_i^{(0)} - 1| < \frac{1}{2\alpha}$ ,  $1 \leq i \leq n$  (il s'agit d'une condition suffisante utilisant un résultat de point fixe).

Cette modélisation est utilisée de manières complémentaires. Tout d'abord nous procédons avec la méthode des moindres carrés à une identification de  $\alpha$  à partir des résultats obtenus avec ns-2. Par exemple, pour  $n = 7$ , nous obtenons  $\alpha = 0,812$ . Ces valeurs de  $\alpha$  conduisent à une bonne approximation des débits normalisés obtenus avec ns-2 (figure 3-gauche). Cela valide notre modélisation qui ne fait appel qu'à un seul paramètre scalaire pour un nombre de paires quelconque.

En second lieu, et puisque le paramètre  $\alpha$  est relié avec les temps d'attente et d'émission dans une paire donnée, nous recherchons la valeur de  $\alpha$  qui maximise l'équité pour un  $n$  fixé. Différents critères d'équité sont envisageables (cf. [DKM05] et les références citées); nous avons retenu l'entropie de la distribution des probabilités d'émission [Jay57] :  $E(x) = -\sum_{i=1}^n x_i \log x_i$ . Le problème d'optimisation consiste alors à trouver  $\hat{\alpha}$  maximisant la fonction  $J(\alpha) = \frac{1}{n} E(x(\alpha))$  où  $x(\alpha)$  est la solution du système (1) et  $1/n$  est un facteur permettant de comparer l'équité indépendamment de la valeur de  $n$ . Il s'agit d'un problème d'optimisation différentiable que nous résolvons avec une méthode de quasi-Newton. Par exemple pour  $n = 10, 20, 100$  et  $500$  nous obtenons respectivement  $\hat{\alpha} = 0,5536, 0,5977, 0,6826$  et  $0,7309$ .

Troisièmement, nous étudions le comportement asymptotique des probabilités d'émission pour  $n$  grand et  $\alpha = \hat{\alpha}$  maximisant l'équité. Dans ce cas, les probabilités d'émission montrent un large plateau dont la valeur est proche de  $\frac{1}{3}$ .

Quatrièmement, on observe que, pour  $n$  grand, les probabilités d'émission normalisées obtenues avec  $\alpha = \hat{\alpha}$  fournissent une bonne approximation des débits normalisés simulés avec ns-2 (figure 3-centre).

Cela tendrait à dire que lorsque  $n$  augmente, l'équité dans la chaîne tend vers l'optimal selon le critère de l'entropie. Ce résultat mérite d'être souligné.

Cinquièmement, la valeur de  $\hat{\alpha}$  semble converger vers  $3/4$  quand  $n \rightarrow \infty$  (figure 3-droite).

## 4 Conclusion et perspectives

Dans cet article, nous avons résumé notre étude de l'équité dans une chaîne de stations 802.11. Les résultats obtenus avec trois paires dans [DGL02] apparaissent comme un cas particulier d'un phénomène plus général. En effet, dans une telle chaîne de  $n$  paires, les chances d'accès au médium pour la  $i^{\text{ème}}$  paire dépendent de la parité de  $n$ . L'équité générale augmente avec  $n$ , et il existe un comportement asymptotique aisément observable dès 20 paires dans la chaîne. L'équité devient alors très bonne au centre de la chaîne.

La simplicité de notre modèle analytique a permis tout à la fois le calcul du débit des paires pour  $n$  petit, et l'étude asymptotique pour  $n$  grand. En particulier, nous montrons l'existence de l'état stationnaire (quelque soit  $n$ ) et du comportement asymptotique. Nous avons également étudié le lien entre le paramètre  $\alpha$  du modèle et l'équité. Certaines valeurs de ce coefficient permettent d'obtenir l'équité optimale exprimée via l'entropie. De plus, lorsque  $n$  augmente, la chaîne converge vers cet état optimal.

En perspective, on peut remarquer que l'équité peut être optimisée via la taille des paquets. En effet, le paramètre  $\alpha$  représente la probabilité d'émission d'une paire sachant que ses voisines se taisent. Cette probabilité est liée au rapport des temps d'attente obligatoires pendant une communication (*cf.* § 1) et du temps de transmission proprement dit, qui lui dépend de la taille de la trame. L'étude numérique donne une équité maximale pour un paquet de 250 octets (figure 4) correspondant à  $\alpha = 0,6$ , ce qui est très proche du  $\alpha$  optimal pour la chaîne de 3 paires, qui vaut 0,655.

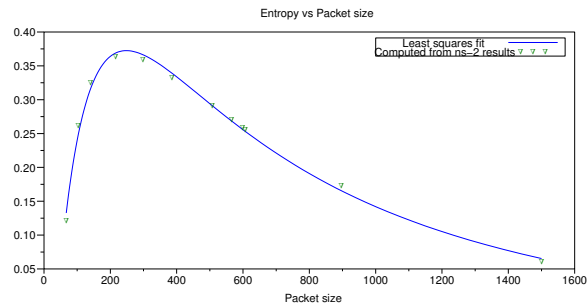


FIG. 4: Entropie en fonction de la taille des paquets.

Outre les explications qu'ils apportent sur le phénomène des paires, et la compréhension des propriétés de la fonction DCF, nos travaux trouvent donc une application dans l'optimisation de l'équité dans la chaîne. Mais par sa simplicité, notre modèle pourrait se rendre utile dans d'autres situations, plus générales.

## Références

- [CDGL05] C. Chaudet, D. Dhoutaut, et I. Guérin Lassous. Experiments of some performance issues with IEEE 802.11b in ad hoc networks. In *Proc. of WONS*, St Moritz, janvier 2005.
- [CGLTG04] C. Chaudet, I. Guérin-Lassous, E. Thierry, et B. Gaujal. Study of the impact of asymmetry and carrier sense mechanism in IEEE 802.11 multi-hops networks through a basic case. In *PE-WASUN*, Venise, septembre 2004.
- [DGL02] D. Dhoutaut et I. Guérin-Lassous. Impact of heavy traffic beyond communication range in multi-hops ad hoc networks. In *International Network Conference*, Plymouth, juillet 2002.
- [DKM05] B. Ducourthial, Y. Khaled, et S. Mottelet. Fairness issue in a chain of ieee 802.11 stations. Rapport Technique UTC, juillet 2005 ([http://www.hds.utc.fr/~ducourth/bib/rap\\_pairs.pdf](http://www.hds.utc.fr/~ducourth/bib/rap_pairs.pdf)).
- [Jay57] E. T. Jaynes. Information theory and statistical mechanics. *Phys. Rev.*, 106(4) :620–630, 1957.
- [LAN99] LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. Part 11 : Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. The IEEE, juin 1999.
- [ns] Network simulator 2 : <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.