



**HAL**  
open science

## Modélisation Stochastique de Réseaux Radio

Jialiang Lu, Fabrice Valois

► **To cite this version:**

Jialiang Lu, Fabrice Valois. Modélisation Stochastique de Réseaux Radio. RR-5518, INRIA. 2005, pp.41. inria-00070488

**HAL Id: inria-00070488**

**<https://inria.hal.science/inria-00070488>**

Submitted on 19 May 2006

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

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



INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE

## *Modélisation Stochastique de Réseaux Radio*

Jialiang LU — Fabrice Valois

**N° 5518**

Février 2005

Thème COM

A large, light gray, stylized letter 'R' is positioned to the left of the text 'Rapport de recherche'.

*Rapport  
de recherche*



## Modélisation Stochastique de Réseaux Radio

Jialiang LU \* † , Fabrice Valois \* ‡

Thème COM — Systèmes communicants  
Projet ARÈS

Rapport de recherche n° 5518 — Février 2005 — 44 pages

**Résumé :** La modélisation stochastique permet à de nombreux travaux d'étudier les réseaux fixes et d'évaluer leurs performances. Aujourd'hui la modélisation et l'évaluation de performance est souvent étendue aux problématiques des réseaux radio. Les variations spatiales et temporelles du médium à partager opposent ces réseaux aux réseaux filaires de part la disponibilité à l'instant  $t$  d'une ressource. Cette caractérisation suffit à comprendre qu'un modèle issu d'un environnement fixe et étendu aux réseaux radio ne peut être satisfaisant. La plupart des propositions existantes font l'hypothèse que les canaux de transmission sont parfaits, l'aspect des caractéristiques radios sont rarement pris en compte. L'objectif de ce travail est de proposer une méthode pour intégrer la caractérisation de l'environnement radio dans un modèle analytique. Avec ce modèle, nous sommes en mesure d'évaluer les performances (taux d'utilisation bande passante en fonction du nombre de machine, probabilité de retransmission, etc.) d'un réseau 802.11b déployé en indoor suivant une couverture radio (issue de l'outil de planification *WILDE*, *Wireless Lan Designing Tool*, *C'est un outil de propagation indoor pour réseau 802.11b, développé au laboratoire CITI*). Dans ce mémoire nous proposons, en premier lieu, une analyse sur la carte de couverture radio. Elle nous permet d'exprimer certains paramètres stochastiques en fonction des caractéristiques radios. Puis dans un deuxième temps, nous intégrons ces paramètres dans un modèle analytique bien connue dans le domaine de l'évaluation de performances des réseaux radio. Nous illustrons aussi les problématiques d'une modélisation d'un réseau radio dans un environnement réel.

**Mots-clés :** 802.11, modélisation, performances, environnement radio

\* Laboratoire CITI, INSA Lyon – INRIA ARES

† jia-liang.lu@insa-lyon.fr

‡ fabrice.valois@insa-lyon.fr

## A stochastic model of Wireless Networks

**Abstract:** Stochastic models are widely used in the fields of performance evaluations of networks. Today, the performance researches are especially found linked to wireless networks. Comparing to wire networks, the wireless network suffer the shadow and Rayleigh fading which make its performance difficult to predict. Most of the existing performance model assume that the radio channel is ideal, so that the radio environment is not considered. However, we find that deploying a real wireless LANs (especially an indoor WLAN) in different environments leads to quite different performance results. Hence We propose a method integrating these radio characterization in an analytical performance model. Taking advantage of our model, we are able to predict the performance of a wireless network (Throughput, global capacity, etc.) of an indoor WLANs of 802.11b type, whose radio planning chart is known (through radio planning tool WILDE). We also analyse the special scenarios as: a network with more than one access point; hidden terminal, etc.

**Key-words:** 802.11, stochastic model, performances, radio environment

## Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>État de l'art</b>	<b>5</b>
2.1	Présentation de la norme IEEE 802.11 . . . . .	5
2.1.1	Protocole d'accès au médium . . . . .	5
2.1.2	Collision et Retransmission . . . . .	10
2.2	Introduction à l'évaluation de performances de réseau . . . . .	11
2.2.1	Grandeurs quantitatives . . . . .	11
2.2.2	Outils de modélisation . . . . .	12
2.3	État de l'art . . . . .	13
2.3.1	Modélisation du Backoff . . . . .	13
2.3.2	Modèles SPNs . . . . .	14
2.3.3	Autres analyses . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Problématique transmission sans fil</b>	<b>16</b>
3.1	Problématique réseau indoor . . . . .	16
3.1.1	Présence d'obstacles . . . . .	16
3.1.2	Nœuds cachés . . . . .	16
3.1.3	Interférences . . . . .	17
3.2	Difficultés posées aux modélisations . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Modélisation analytique</b>	<b>19</b>
4.1	Caractérisation de l'environnement radio . . . . .	19
4.2	Modélisation . . . . .	21
4.2.1	Un seul point d'accès . . . . .	23
4.2.2	Extension . . . . .	27
4.2.3	Effet des nœuds cachés . . . . .	29
<b>5</b>	<b>Résultats</b>	<b>29</b>
5.1	Évaluation de la bande passante utile . . . . .	30
5.1.1	En fonction du nombre de stations . . . . .	30
5.1.2	En fonction de la probabilité d'erreurs sur le paquet . . . . .	31
5.2	Évaluation de la capacité d'un réseau 802.11 indoor . . . . .	34
5.2.1	Un seul point d'accès . . . . .	34
5.2.2	Deux point d'accès indépendants . . . . .	38
5.2.3	Deux point d'accès non-indépendants . . . . .	39
5.2.4	Effet des nœuds cachés . . . . .	39

<b>6</b>	<b>Experimentation</b>	<b>40</b>
6.1	Description de l'experimentation . . . . .	40
6.2	Stations, cartes, AP . . . . .	40
6.3	Topology du réseau . . . . .	40
6.4	Logiciel du test . . . . .	40
6.5	Results . . . . .	40
<b>7</b>	<b>Perspectives et Conclusions</b>	<b>41</b>
7.1	Modelisation . . . . .	42
7.2	Conclusion . . . . .	42

## 1 Introduction

Depuis les années 2000, les réseaux sans fil prennent une part croissante dans le monde des réseaux. Les réseaux locaux sans fil régis par la norme IEEE 802.11 ([4]) constituent une solution de connexion réseau pratique et intéressante offrant mobilité, flexibilité ainsi que des réductions potentielles des coûts de déploiement et d'utilisation. Dans les réseaux locaux d'entreprise ou domestique, les réseaux sans fil peuvent compléter les réseaux existants en offrant plus de souplesse et mobilité. Ils permettent également de couvrir des lieux où le câblage est difficile et cher.

Évidemment, la généralisation des WLAN dépend de la standardisation de l'industrie. L'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) a ratifié la spécification 802.11. La norme IEEE 802.11 (ISO/IEC 8802-11) [4] est un standard international décrivant les caractéristiques d'un réseau local sans fil (WLAN). 802.11 s'adressant à la couche Physique (PHY) et la couche Medium Access Control (MAC), a le but aussi de maintenir l'interopérabilité entre les matériels sans fil de différents constructeurs. Depuis lors cette norme a connu des évolutions ou des améliorations donnant naissance à plusieurs variantes. Des révisions ont été apportées à la norme originale afin d'optimiser le débit (c'est le cas des normes 802.11a, 802.11b et 802.11g, appelées normes 802.11 physiques) ou bien préciser des éléments afin d'assurer une meilleure sécurité ou une meilleure interopérabilité. La technique la plus répandue étant actuellement Wi-Fi, issue de la norme IEEE 802.11b, qui fournit un débit maximum théorique de 11 Mbps.

Bien que le déploiement d'un réseau sans fil du type 802.11 est rapide, les pré-études sont indispensables. Ces études consistent en l'analyse de l'environnement radio, l'évaluation de performances du réseau, la sécurité, etc. Nous nous intéressons dans ce projet à l'étude des performances d'un réseau 802.11 dans le cadre d'un déploiement réel.

L'évaluation de performances peut être réalisée de deux manières. Soit à l'aide d'un outil de simulation, soit en utilisant une modélisation analytique. Le problème de la simulation est multiple : certes elle permet d'évaluer des scénarios complexe mais le coût en développement et en ressources de calcul est très gourmand. De plus, il n'existe pas de simulateur de réseaux radio en environnement *réel*, *i.e.* prenant en compte la couverture radio et l'environnement physique. La modélisation analytique a l'avantage d'offrir un temps

de calcul faible et demande moins de développement informatique. Par contre un modèle analytique est toujours soumis à certaines hypothèses. C'est pour quoi les résultats sont approximatifs, ce qui peut conduire à des incertitudes importantes si les hypothèses n'ont pas été correctement validées. Malgré cela, nous pouvons obtenir une idée générale sur le comportement du réseau que nous allons déployer.

Les performances d'un réseau IEEE802.11 sont, avant tout, liées au protocole d'accès au médium (détaillé dans la partie 2.1.1) décrit dans la norme. Il limite le débit réel d'un réseau même s'il fonctionne en condition idéale. Ensuite le phénomène de collisions est un élément essentiel influençant les performances d'un réseau 802.11. Une collision signifie que, sur le même médium, plusieurs nœuds émettent en même temps. Les paquets sont perturbés entre eux et quand ils arrivent à la destination, ils sont erronés. Les stations sont obligées d'attendre la fin de transmission pour savoir si une collision a eu lieu (i.e. absence d'acquittement), sachant qu'une antenne radio ne peut pas émettre et recevoir les signaux au même temps. A cause du temps de perdu pour (re)transmettre des paquets entrés dans les collisions, le débit du réseau sans fil est ainsi dégradé.

Les nombreuses études de performance du réseau 802.11 reposent sur CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance*) et la présence de collisions ([7] [6] [10]). L'ensemble de ces travaux reposent sur l'hypothèse d'un canal de transmission parfait. De toute évidence, et dans le cas d'un déploiement réel, cette hypothèse n'est pas justifiée. Or, nous nous intéressons à la modélisation analytique et à l'évaluation des performances d'un réseau avant son déploiement réel. Pour cela, les études existantes ne sont pas suffisantes car ils ne tiennent pas compte la qualité de transmission.

Des lors, il est clair que l'environnement radio influence la performance. L'objectif de notre étude est donc d'analyser quantitativement cet effet de dégradation des performances d'un réseau 802.11b afin de proposer un modèle analytique intégrant l'aspect radio. Nous essayons d'intégrer les paramètres radios dans un modèle analytique, voir de quelle façon et jusqu'à quel niveau ils influencent la performance d'un réseau 802.11b.

La suite de ce rapport de recherche est composé des 6 parties. La section 2 dresse un état de l'art sur la norme 802.11 et les études existantes de performances de réseaux sans fil. La section 3 illustre la problématique radio dans un contexte réel. Notre modèle analytique sera proposé dans la section 4, suivi par la section 5 où nous exploitons les résultats de l'évaluation de performance dans les différents scénarii. Dans la section 6, les résultats expérimentaux sont donnés pour valider notre modèle. Enfin nous présentons les perspectives de nos travaux.

## 2 État de l'art

### 2.1 Présentation de la norme IEEE 802.11

#### 2.1.1 Protocole d'accès au médium

Il existe deux mode d'accès au niveau MAC de 802.11 : DCF (Distributed Coordination Function) et PCF (Point Coordination Function).

PCF, appelé mode d'accès sans contention, est un mode d'accès complémentaire au DCF. Il est utilisé pour implémenter des services temps réel, comme la transmission de voix ou de vidéo. Ce système met en œuvre un accès contrôlé en réservation. Le point d'accès, fonctionnant également en mode PCF, est nécessairement une station qui dispose de la fonction de point de coordination centralisée. La fonction de coordination utilise une structure temporelle de supertrame. Cette supertrame permet de régir le partage du temps d'accès au canal de communication entre DCF et PCF. Cette fonction met en œuvre un système d'interrogation successive des stations de façon à organiser les transmissions suivant un multiplexage temporel du canal. Les périodes de CFP (Contention Free Period, où l'accès au médium est successive) et CP (Contention Period, où l'accès au médium est en concurrence) se présentent d'une façon alternative. Il faut souligner que PCF est un option de 802.11 et que peu de réseaux l'utilisent. En plus du fait qu'il y a des réservations d'accès, le débit réel d'un réseau utilisant PCF est plus faible que si DCF est utilisé.

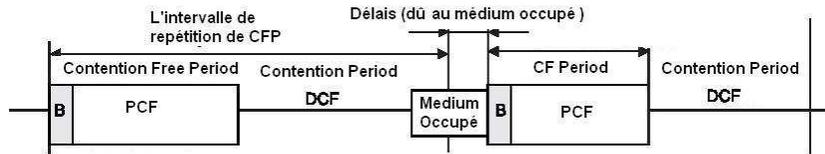


Figure 1: Alternance de CFP et CF dans le mode PCF

Dans notre travail, nous nous concentrons sur la modélisation et l'évaluation de performances d'un réseau 802.11 en mode DCF.

DCF dispose de deux modes : l'accès en mode base et le mode RTS/CTS. Le mode DCF est composé de plusieurs éléments : le mécanisme CSMA/CA, les interframes IFSs et la tirage aléatoire de backoff. Par la suite, nous détaillons chacun de ces points.

**CSMA/CA** (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) [4] est la technique d'accès au médium retenue par le standard IEEE 802.11. CSMA est une technique classique de détection de porteuse. Supposons qu'une station A dispose d'un paquet à émettre. Elle commence par écouter le canal de communication. Si le canal est libre pendant une durée inter-trame DIFS (Distributed Inter-Frame Spacing), c'est-à-dire aucune activité ne se présente sur ce dernier, alors la station A tire au sort une durée d'attente supplémentaire (Temps de Backoff). Cette durée est calculée sous forme d'un nombre entier d'une durée élémentaire, appelée slot de collision ( $20 \mu s$ ). Ce nombre est tiré d'une façon aléatoire entre 0 et la taille de fenêtre de contention (CW).

Si une station B a une trame à émettre, elle tire son temps de Backoff. Si la durée d'attente de B est supérieure à celle de A alors A est la première à expirer son temps de Backoff et à transmettre sa trame. Avant la transmission de A, et pendant la période où le

canal est libre, B décrémente sa durée d'attente. Durant la transmission de A, B suspend la décrémentation du backoff. A la fin de la transmission de A, B reprend le backoff résiduel. Lorsque cette durée d'attente se termine, donc sur une période où le canal est libre, la station B débute sa transmission. Si deux stations tirent la même durée d'attente, cela produit des transmissions simultanées et donc une collision. Les deux stations multiplient le  $CW_{max}$  (la taille maximale de la taille de fenêtre de contention) par 2, relancent le procédé de backoff, ainsi suite jusqu'à le paquet est bien reçu au niveau du destinataire; ou atteint le nombre maximal de retransmission, et le paquet sera détruit. Cette technique d'accès est le cœur du mécanisme CSMA/CA ; la figure 2 illustre son fonctionnement.

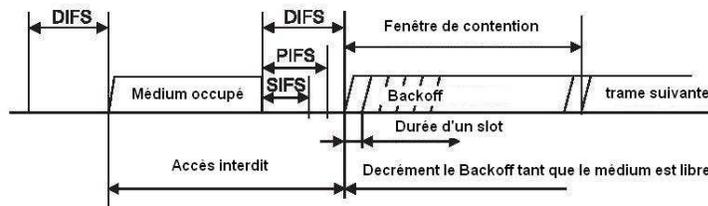


Figure 2: CSMA/CA et IFSs

**L'accusé de réception et les IFSs** En radio, une station ne peut pas transmettre et recevoir en même temps, donc la détection de collisions pendant une transmission est impossible. La technique de détection de collisions utilisée dans la norme IEEE 802.11 est une technique indirecte, par l'absence d'accusé de réception. Par contre pour les paquets de diffusion, l'émetteur ne demande pas un accusé de réception. Il n'est valable que pour les trames envoyées en point à point. L'accusé de réception dans un cas d'une transmission réussie doit intervenir juste après la transmission (ou semble immédiat pour les stations qui écoutent le canal). Pour cela la norme IEEE 802.11 utilise une technique d'intertrame variable, qui permet de faire varier la priorité d'accès au médium. Plus l'intertrame est courte pour une station, plus son accès est prioritaire car le temps mis pour accéder au médium est plus faible.

Les quatre durées IFSs utilisées dans la norme 802.11 sont les suivantes :

- SIFS (Short Inter-Frame Spacing) : c'est la durée la plus courte. Elle permet à l'accusé de réception de précéder toute autre transmission qui veut débiter en même temps. De la sorte, on garantit que l'accusé de réception sera transmis avant tout autre paquet en attente.
- DIFS (Distributed Inter-Frame Spacing): durée plus longue que SIFS et PIFS. DIFS est utilisée avant l'envoi d'un paquet dans le mode d'accès DCF.

- PIFS (Point coordination Inter-Frame Spacing) : Elle est utilisée pour l'envoi d'un paquet dans le mode d'accès PCF.
- EIFS (Extented Inter-Frame Spacing) : Elle est utilisée sous la condition que la couche PHY indique qu'une trame n'est pas reçue correctement, c'est-à-dire que la trame reçue est erroné au niveau de la couche PHY. EIFS assure la transmission d'accusé de réception d'autre station. C'est la durée la plus longue parmi tous les IFSS. Pendant cette durée, dès la réception d'une trame correcte, EIFS est arrêtée. La station resynchronise à l'état du canal en utilisant le mode normal (DIFS).

Les durées IFSS sont les éléments important dans l'évaluation de performances de 802.11. Ces valeurs influencent directement le résultat tel que l'utilisation de la bande passante, etc.

**Temps de Backoff** Le tirage au sort du temps de Backoff est un moyen de lutter contre les collisions dans la norme 802.11. Il est calculé sous la forme suivante:

$$BackoffTime = Random() \times aSlotTime$$

Où  $aSlotTime$  est la durée d'un slot de temps qui est défini par la couche physique ( $20\mu s$  pour DSSS). Le  $Random()$  est un nombre aléatoire entre 0 et la taille de la fenêtre de contention ( $CW$ ). Sachant que ce  $CW$  varie suivant le nombre de retransmission du paquet. La valeur initiale de  $CW$  est nommée  $aCWmin$  (32 dans la norme IEEE 802.11) qui égale à  $2^5$ .  $CW$  est multipliée par 2 en cas d'échec de la transmission d'un paquet. Le  $Random()$  de la retransmission est donc tiré au sort entre 0 et la nouvelle valeur de  $CW$ . Une autre valeur spécifique de  $CW$ ,  $aCWmax$ , est aussi défini. Une fois  $CW$  atteinte  $aCWmax$ , elle stabilise sur  $aCWmax$ . Au bout de nième ( $4^{ième}$  pour mode basique et  $7^{ième}$  pour mode RTS/CTS) retransmission, si l'émission est toujours issue d'un échec, le paquet ne serait jamais renvoyé. La station traite le paquet suivant dans sa file d'attente.

La modélisation de Backoff est une partie importante dans notre étude. La variation de la taille du fenêtre de contention influence les performances d'un réseau 802.11.

**RTS/CTS** RTS/CTS est une technique de contrôle spécifique du canal par échange de paquets d'appel. Cette technique est optionnelle et est lié aux situations de nœuds cachés que l'on expliquera par la suite. Avant d'envoyer un paquet de données, la station source envoie à la station destination un paquet spécial d'appel RTS (Request To Send). Si ce paquet est reçu par la station destination, cette dernière répond par un paquet CTS (Clear To Send). Si la station source reçoit convenablement ce dernier paquet, elle peut prendre la main à la fin de la transmission du CTS et envoyer son paquet de données. En cas de réception correcte, un accusé de réception est acquitté par la station destination. S'il y a échec de transmission du RTS ou du CTS ou absence d'accusé de réception, toute la procédure doit être reprise.

Un autre mécanisme, le vecteur d'allocation, NAV (Network Allocation Vector) est associé au RTS/CTS, qui a pour rôle d'améliorer le contrôle de l'accès au canal. Les paquets

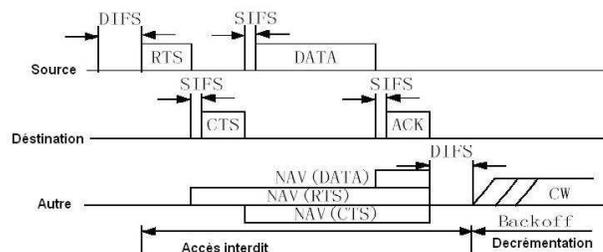


Figure 3: Mode d'accès RTS/CTS

RTS et CTS portent dans leurs champs une indication spéciale, qui donne la durée du cycle de transmission complet RTS/CTS, trame de données et accusé de réception. Cela permet aux stations dans le voisinage de connaître la durée du cycle complet de la transmission à venir. Chaque station met à jour son vecteur d'allocation NAV. Une station ne peut transmettre une trame avant la fin complète du cycle de transmission (voir figure 3).

### 2.1.2 Collision et Retransmission

La collision et la retransmission sont les deux éléments importants dans l'évaluation de performances des réseaux IEEE 802.11. Malgré l'efficacité du mécanisme CSMA/CA, une collision peut avoir lieu quand deux stations ont tiré le même nombre de slot de temps de Backoff. En conséquence, l'échec de transmission impose la retransmission du paquet. Le temps passé pour la transmission en échec est donc inutile. Il n'est pas servi pour l'émission de données. De plus, une retransmission peut être provoquée par une autre raison liée à la qualité de réception non *convenable*. Effectivement, une station décide de retransmettre un paquet s'il y a absence d'accusé de réception. Le taux de collision et le taux de retransmission sont également deux paramètres qui influencent les performances du réseau.

## 2.2 Introduction à l'évaluation de performances de réseau

Les performances du réseau sont des grandeurs qualitatives et quantitatives pour caractériser le fonctionnement d'un réseau. Le but d'une évaluation de performances est de trouver des indicateurs représentant le comportement du réseau. Les grandeurs quantitatives sont par exemple le taux de blocage, le débit de bout en bout, la gigue, etc. Tandis qu'une grandeur qualitative est souvent une propriété comme *Est-ce que le système converge?* ou *Est-ce que ce réseau est stable?* Ces types de questions doivent être posés avant d'entrer dans une étude quantitative. Or le protocole 802.11 est un standard d'IEEE, les bonnes propriétés du protocole ont déjà été prouvées. Ici, nous nous intéressons uniquement aux grandeurs quantitatives.

### 2.2.1 Grandeurs quantitatives

On dit souvent qu'un réseau 802.11 fonctionne à 11 Mbps, (ou 5.5 Mbps, 2Mbps et 1Mbps). Les gens confondent ces valeurs avec le débit réel de 802.11. En fait ces débits théoriques sont largement supérieur au débit réel de 802.11, à cause du mécanisme de CSMA/CA, des entêtes physiques, des durées inter-trames IFSs, de la gestion des collisions et des retransmissions. Dans le domaine de l'évaluation de performances, la notion que nous rencontrons le plus souvent est l'utilisation de bande passante (*Throughput*). Elle est le rapport de la bande passante utile (consacrée à la transmission des données) et de la bande passante totale. Elle est équivalent à la fraction du temps où le médium est occupé par la transmission des données par rapport à la durée moyenne d'un cycle de temps ([7], [8], [16], et [10]).

$$S = \frac{E[\textit{Payload}]}{E[\textit{durée d'un slot}]}$$

Nous nous intéressons à quantifier cette grandeur dans notre étude. Cela permet de comparer les résultats existants soulignés dans l'état de l'art qui suivra avec le notre.

Dans un réseau 802.11 déployé, suivant la qualité en réception, les stations fonctionnent à une vitesse de transmission différente, que ce soit 11Mbps ou 5.5Mbps, 2 Mbps, 1Mbps. La notion de l'utilisation de bande passante devient floue dans ce cas là, parce que nous ne connaissons pas la bande passante totale. Une simple façon pour analyser le comportement global du réseau est de directement l'exprimer en terme de débit. Il faut distinguer le débit du réseau de celui des stations. Le débit d'un point de vue du réseau possède un sens global représentant la densité de trafic de données dans le réseau. Cela correspond à la notion de capacité du réseau (*Network Capacity*) lorsqu'on évalue le débit sur le réseau soumis à un trafic en régime saturé. L'analyse de cette grandeur est une des principales contributions des travaux que nous avons effectués dans ce projet.

Le débit individuel est un paramètre qui caractérise le comportement de chaque station. Or notre objectif initial est d'évaluer les performances globales d'un réseau 802.11. Nous n'avons donc pas fait un approche sur cette grandeur. Malgré tout, il reste un paramètre important à analyser dans un réseau. Parmi les études existantes sur le débit individuel, nous détaillons [9] plus loin (2.3.3) dans ce rapport de recherche.

### 2.2.2 Outils de modélisation

Nous disposons des outils adéquats pour réaliser l'évaluation de performance d'un système, que ce soit la modélisation analytique ou la simulation.

La modélisation analytique est une manière de faire un modèle abstrait du système en proposant, à l'aide d'un formalisme mathématique, une représentation fidèle du système et de ses paramètres d'entrée. Plusieurs approches de modélisations analytiques existent dans la littérature ([6], [7], [11], [3], etc.) dépendant de la nature du système à étudier ainsi que des grandeurs de performance à évaluer.

### Chaînes de markov

Les Chaînes de Markov ([15]) sont un formalisme mathématique simple pour analyser un phénomène stochastique. Un modèle est basé sur des états et des transitions (taux de passage ou probabilité de transition). Sa simple structure permet de modéliser une large classe de systèmes. Les Chaînes de Markov sont des outils bien connus où les nombreux résultats théoriques permettent d'analyser finement le comportement du système modélisé. Les Chaînes de Markov sont donc un des plus importants outils d'analyse des processus aléatoires dans le domaine de la modélisation. Dans le cadre d'une modélisation et évaluation de performances, les chaînes de Markov présentent une simplicité et une efficacité incontournable. Dans la littérature, la plupart des modélisations de 802.11 utilisent les Chaînes de Markov comme outil de modélisation ([7], [8] et [10]). Notre étude est également réalisée à l'aide de cet outil.

### Réseaux de Pétri stochastiques

Les réseaux de Pétri stochastique [13](SPN) sont un outil que nous rencontrons souvent pour modéliser les systèmes repartis avec en particulier, la prise en compte des notions de simultanéité, de non déterminisme, de communication et de synchronisation. Dans une évaluation de protocole, les SPN présentent l'avantage de décrire les délais ou les synchronisations entre les différents états d'un protocole, tandis que dans une Chaîne de Markov il est difficile de présenter une synchronisation. La modélisation avec un SPN est relativement immédiate. Par contre le schéma peut être facile à construire mais très complexe. En conséquence les analyses ne sont pas toujours évidentes. Les SPN sont davantage liés au problème de sûreté de fonctionnement, de validation de protocole plutôt qu'au problème d'analyse stochastique.

### Analyses probabiliste

C'est une méthode basée sur le théorème fondamental de probabilité et statistique. Grâce à l'ensemble des hypothèses et des analyses et démonstrations mathématiques, les expressions des paramètres de performance d'un réseau sont obtenues. Dans le cadre d'étude de 802.11, Cali et Grgori [6] ont estimé la borne supérieure de la capacité de 802.11 en posant certaines hypothèses sur les paramètres d'entrées (ex. la taille de paquet suit une loi géométrique).

Les analyses à l'aide d'un simulateur de réseaux sont une autre piste pour évaluer les performances du réseau. Il faut consacrer plus de temps au développement pour proposer un modèle pour un simulateur plutôt qu'un modèle analytique. Par contre, la simulation permet de détailler le fonctionnement de chaque élément dans le système. Souvent un modèle analytique est suivi par une validation de simulation. Concernant notre étude, nous nous intéressons les performances d'un réseau 802.11 indoor. A notre connaissance, aucun simulateur de ce type n'existe. Vu la durée de ce projet DEA, nous n'avons non plus le temps d'en développer un.

## 2.3 État de l'art

De nombreuses analyses ont été faites sur les performances du protocole 802.11. Parmi ces études, trois familles d'analyse peuvent être distinguées :

- la modélisation des états du Backoff en utilisant une Chaîne de Markov. L'intérêt de se focaliser uniquement sur le backoff est lié au fait que le Backoff de CSMA/CA représente la propriété de *l'accès concurrent au médium* de 802.11. C'est aussi pendant cette période que les collisions pourraient avoir lieu.
- l'analyse à l'aide des réseaux de Pétri stochastiques [13]. L'analyse combine l'aspect analytique et l'aspect simulation. La construction des schémas SPN est suivie par une implémentation via une simulation.
- Nous trouvons également quelques études intéressants utilisant l'analyse probabiliste. [11], [9] utilise les approximations mathématiques pour obtenir les performances en moyenne d'un réseau sans fils. Ils sont assez efficaces et simple à comprendre.

### 2.3.1 Modélisation du Backoff

En 2000, Bianchi a proposé un modèle analytique pour la modélisation des états du backoff [7]. L'étude est réalisée pour une topologie de réseau fixée soumis à un trafic saturé et dans un environnement radio tel que les conditions de transmission sont idéales. Dans un premier temps l'auteur modélise le comportement d'une station individuelle avec une chaîne de Markov à deux dimensions représentant ses états de backoff. Grâce à ce modèle, il obtient la probabilité de transmission qu'une station transmette dans un slot de temps choisi aléatoirement. Ensuite il étudie les événements qui peuvent se produire dans un slot de temps générique afin d'exprimer l'utilisation de bande passante du réseau en fonction du taux de transmission obtenu en première partie. Au final il propose une analyse sur les différents éléments (ex. nombre de stations, longueur du paquet et taille du fenêtre de contention) jouant sur l'utilisation de bande passante. Cette étude propose également une comparaison entre le mode point d'accès et le mode accès RTS/CTS. Depuis la publication de cet article, cette méthode a été utilisée et étendue à d'autres études de réseaux 802.11. Une partie de ces études essaient d'affiner les résultats de Bianchi [16]. Tandis qu'autres utilisent le méthode pour évaluer les performances de nouveaux protocoles d'accès au médium et éventuellement l'amélioration de 802.11 ([8]). [10] propose également d'étudier le délai de service d'un réseau soumis à un trafic non saturé.

Par contre, toutes ces études sont sous l'hypothèse que les canaux de transmission sont parfaits. Or, dans un réseau sans fil réel, cette hypothèse est très fragile. Parce que dans un environnement radio, la qualité du signal varie beaucoup. L'hypothèse d'un support de transmission parfait est recevable dans le cas de réseaux fixes mais elle n'est pas adaptée aux réseaux sans fil. Nous nous intéressons à l'étude des performances d'un réseau 802.11 qui est déployé ou sera déployé. Le simple modèle de Bianchi n'est pas capable de tenir compte de cette réalité. Le modèle que nous proposerons devra intégrer l'aspect radio.

### 2.3.2 Modèles SPNs

Heindl et German ont modélisé la couche MAC de 802.11 à l'aide d'un réseau de Pétri Stochastique dans [1]. Leurs travaux consistent en deux parties : d'abord ils ont proposé un simulateur implémentant plusieurs modèles de SPNs pour un réseau 802.11. Puis ils ont simplifié le simulateur en retirant les éléments EIFS et la trame de synchronisation dans le modèle initial. Et ils ont alors obtenu un modèle plus léger. Néanmoins par rapport au modèle de Bianchi utilisant une chaîne de Markov, leur modèle SPN reste complexe. Comme leur but est de proposer un modèle SPNs, les interprétations des résultats me semble insuffisante. Leur étude reste au niveau théorique. Vue la complexité de leurs modèles, les réseaux de Pétri sont peut-être moins adapté que les chaînes de Markov pour une évaluation de performances du réseau 802.11. Comme nous l'avons précisé précédemment, les SPNs sont plus adaptés à la validation de contraintes temporelles dans un réseau.

### 2.3.3 Autres analyses

A côté de ces deux outils fondamentaux de modélisation, d'autres recherches ont étudié les performances d'un réseau 802.11 en utilisant soit les analyses probabilistes soit les mesures expérimentales. [6] est un article datant de 1998, juste après la sortie de la première version de la norme 802.11. Les auteurs proposent un analyse de la capacité du réseau 802.11 avec les estimations des espérances de certains paramètres : le nombre de collisions dans un slot de temps donné, la durée d'une collision, la durée pendant laquelle le canal est libre et la taille de la fenêtre de contention. Finalement ils s'intéressent à l'influence de la taille de paquet sur la capacité du réseau : plus la taille de paquet est grande, plus la capacité est importante. Leurs résultats sont vérifié expérimentalement par les travaux de [2]. Dans cet article ils ont aussi montré que leurs résultats de mesure dépendent de la carte 802.11b utilisé. Ce point montre que les performance du réseau 802.11 dépendent non seulement du protocole mais aussi de l'aspect physique et radio.

Foh et Zukerman [3] analysent le délai d'un réseau 802.11. Ils ont utilisé une file d'attente pour modéliser l'état du réseau (chaque état représente le nombre de stations voulant transmettre dans le réseau). Et ils font l'hypothèse que la durée entre les transmissions successives pour une station suit une distribution exponentielle et que le temps de service suit un loi d'Erlang. Avec cette approximation et l'analyse de la file d'attente, ils montrent que l'utilisation de RTS/CTS pour les paquets de grande taille peut nettement améliorer les performances du réseau.

Les stations dans un réseau 802.11 peuvent fonctionner à 4 débits différents. [9] essaie de mettre en évidence l'effet de cette coexistence des stations travaillant en différents débits. Au résultat: la présence de machine lente dans un réseau 802.11b, dégrade les débit de toutes les stations. Mais la performance globale du réseau n'est pas évalué dans cet article.

Dans [11], les auteurs essaient d'intégrer la probabilité d'erreur des paquets dans leur modèle. Cette dernière est basée sur une analyse mathématique permettant d'exprimer l'utilisation de la bande passante en fonction de la probabilité de collision et de la probabilité des erreurs dans les paquets. Ils ont aussi défini un paramètre  $q = \frac{n-1}{W}$ , appelé *gap inversé*.

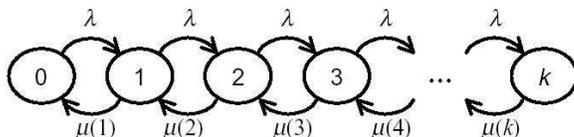


Figure 4: File d'attente de Foh-Zuckman

La capacité du réseau dépend de la taille initiale de la fenêtre de contention  $W$  et le nombre de stations seulement par la paramètre  $q$ .

Les études de performances d'un réseau 802.11 sont multiples mais souvent elles reposent sur l'hypothèse d'un médium idéal. Or pour une étude dans le cas d'un déploiement réel, cette hypothèse n'est plus valable. Par la suite nous détaillons plusieurs éléments venant caractériser le canal radio et qui n'ont pas été pris en compte dans les études précédentes. Nous discuterons aussi de l'intérêt de les intégrer dans notre modèle.

### 3 Problématique transmission sans fil

#### 3.1 Problématique réseau indoor

Le phénomène de propagation d'une onde est complexe et difficile à maîtriser. L'irrégularité de la propagation d'une onde est liée à la configuration du lieu, les matériaux de construction, les localisations géométriques des stations de travail et à l'environnement électromagnétique. Beaucoup de problèmes, tels que les évanouissements, les nœuds cachés, les variations de puissance en réception en temps ont été identifiés. Le non-déterminisme de la qualité de signal est un problème essentiel dans une évaluation de performances de 802.11, parce qu'il introduit des erreurs sur les paquets de transmission. Nous allons identifier quelques problèmes typiques pour un réseau sans fil indoor.

##### 3.1.1 Présence d'obstacles

La présence d'obstacles introduit avant tout l'affaiblissement des signaux. Quand un signal traverse un obstacle, sa puissance est fortement atténuée (phénomène d'absorption). La puissance du signal reçu par le récepteur est faible et le rapport signal sur bruit est élevé. En conséquence les erreurs sur le paquet augmentent et cela peut entraîner des retransmissions. Sachant qu'une retransmission signifie que l'occupation de canal pour la transmission précédente est inutile vis-à-vis au réseau. Donc la présence d'obstacle a des impacts sur les performances du réseau.

De plus, quand un signal arrive sur un obstacle, il est en même temps diffracté et réfléchi. Ces phénomènes multiplient les chemins de propagation entre l'émetteur et le récepteur. Du fait qu'il y a des retards du signal, la difficulté de décodage du signal augmente. Si

la technique de codage et décodage ne tient pas compte des chemins multiples, alors les performances du réseau 802.11 seront fortement perturbés.

### 3.1.2 Nœuds cachés

Le problème des nœuds cachés est un scénario célèbre dans le monde de la transmission radio ([14]). Il est souvent associé à la présence d'obstacle. Supposons que nous ayons trois stations A, B et C utilisant la technique de CSMA/CA. A et B sont séparés par un obstacle (= mur) et sont en ligne directe de C (cf. figure 5). Supposons que l'obstacle atténue très fortement les signaux, de telle sorte que A ne voit pas B et inversement. Le mécanisme CSMA/CA n'est pas robuste à cette situation parce qu'il est possible que A et B transmettent simultanément vers C. Dans ce cas, il peut y avoir des collisions dites 'cachées', comme illustrées à la figure 5.

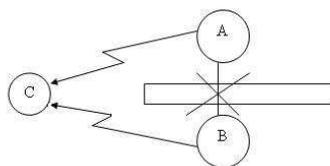


Figure 5: nœuds cachés

La présence de nœuds cachés augmente la probabilité de collision dans un réseau, donc dégrade le taux d'utilisation du canal. Nous nous intéressons dans cet étude à un réseau 802.11 fonctionnant en mode infrastructure, c'est-à-dire toutes les stations sont attachés à un point d'accès. Pour vérifier l'existence des nœuds cachés par rapport à une station, il suffit de regarder s'il y a des stations dans la zone qui n'est pas couverte par le signal de cette station. Il faut souligner que la présence de nœuds cachés est fortement lié à la configuration du site et à la distribution des stations sur le site. Exprimer le moyen d'une présence ou d'un niveau des nœuds cachés, est un problème difficile.

[18] analyse un simple scénario de nœuds cachés. Ils ont répartis l'ensemble des stations sur plusieurs groupes. Les stations appartenant au même groupe s'entendent entre elles et les stations dans les différents groupes sont considérés comme des paires de nœuds cachés. Avec ce modèle, ils ont analysé l'utilisation de bande passante et le taux de blocage du réseau. En revanche passant dans un contexte réel, le critère avec lequel on regroupe les stations en groupe reste à trouver.

### 3.1.3 Interférences

Deux signaux provenant de deux systèmes dans la même bande de fréquences peuvent interférer l'un sur l'autre. Cela implique des erreurs supplémentaires dans les paquets transmis. Pour un réseau 802.11, les situations d'interférences possibles sont :

- l'utilisation dans un réseau 802.11 de deux points d'accès utilisant le même canal de fréquence. On parle d'interférences co-canal.
- l'utilisation dans un réseau 802.11 de deux fréquences voisines dans deux points d'accès géographiquement voisin. On parle d'interférences de canaux adjacents.
- l'utilisation d'un équipement électronique qui travaille dans la même bande de fréquences, par exemple un équipement Bluetooth.

Dans ces trois cas, un signal qui interfère avec la transmission en cours est considéré comme un bruit radio supplémentaire. Notons  $C$  la puissance du signal utile,  $I$  l'ensemble des interférences et  $N$  le bruit. Le rapport signal sur bruit s'exprime alors comme un rapport  $C/(I + N)$ . Dans la réalité l'effet des interférences de canaux adjacents doit être très faible par rapport aux interférences co-canal. Lors de l'émission d'un paquet, les interférences sont souvent réduites aux interférences co-canal. Normalement ce type de problème peut être évité par une bonne allocation des fréquences sur différents points d'accès voisins. Mais le scénario est intéressant à analyser pour voir son impact sur les performances.

Dans [17] les auteurs ont traité le problème des interférences venant des équipements autre que de type 802.11 (Bluetooth dans l'article). Ils ont montré qu'avec la présence des interférences de Bluetooth, les performances d'un réseau 802.11 semblent être même amélioré quand il y a assez nombre des stations dans le réseau. Les résultats sont étonnants, néanmoins leurs explications sont intéressantes. Ils expliquent que c'est parce qu'une interférence peut être détectée par une partie des stations, mais pas toutes. Imaginons que deux stations tirent au sort un valeur de backoff avec la taille de la fenêtre de contention à 32. La probabilité qu'ils rentrent dans un collision est  $1/32$ . Or si l'une de ces deux stations détectent une interférence pendant sa décrémentation du backoff, alors elle considère que le canal est occupé et elle arrête de décrémenter son backoff. La probabilité de collision dans ce cas là est donc plus faible que  $1/32$ . Mais comme l'article était un rapport interne, les résultats n'ont pas été validé par d'autres travaux depuis. En plus l'effet des erreurs supplémentaires lié à la présence d'interférences n'est pas exprimé dans l'article, ce qui à notre avis dégrade les performances.

En résumé, la présence d'interférences peuvent introduire deux conséquences sur le comportement d'un réseau 802.11:

- elles peuvent augmenter le taux d'erreurs dans les paquets, et générer des retransmissions supplémentaires. L'impact dans ce sens est négatif sur les performances.
- elles peuvent diminuer le taux de collisions du fait que la détection d'interférences n'est pas identique pour tout le monde. L'impact est donc positif sur les performances.

La question que nous nous posons est la suivante: est-ce que ces deux impacts s'annulent, ou l'un a-t'il plus d'influence que l'autre? Nous en discuterons dans la partie de modélisation puis dans les résultats.

### 3.2 Difficultés posées aux modélisations

Il est clair que les problèmes radios (tel que nœuds cachés et les interférences) influencent sur le comportement des stations individuelles. Mais si nous nous intéressons aux performances globales d'un réseau sans fil, en analysant par exemple la capacité et le délai moyen d'un réseau, nous ne pouvons rien conclure. D'où la motivation de notre étude. En fait le passage entre un monde réel lié à un environnement radio et un monde de modélisation et d'analyse de performances restent difficiles et complexes.

La modélisations et l'évaluation de performances est toujours basée sur les théorèmes fondamentaux de probabilité. Nous devons analyser tous les événements qui peuvent se produire sur le médium. Chaque événement est lié à une probabilité de réalisation. Notre volonté est d'exprimer ces probabilités en fonction de la qualité du signal au niveau de la réception. Or la qualité du signal dépend de l'environnement radio en tenant compte de la présence d'obstacles, des nœuds cachés et des interférences. Suivant le lieu de déploiement et la distribution des stations, ces problèmes sont identifiés différemment (par ex. le phénomène de nœuds cachés, les interférences co-canal et des canaux adjacents). Donc la difficulté revient à caractériser une probabilité moyenne pour chaque événement lié à l'environnement radio.

Pour caractériser ces variables aléatoires, l'idée est de modéliser le canal de transmission à aide d'un outil mathématique. Dans [19] et [12] une chaîne de Markov à deux états est proposé pour modéliser le canal. Malheureusement ces travaux ne sont pas allés jusqu'à l'évaluation de performances au niveau réseau. Leurs modèles ne sont pas validés par des mesures expérimentales non plus.

L'autre idée c'est de faire des mesures réelles puis de les exploiter. Notre travail consiste alors à faire une proposition de modèle prenant en compte l'aspect radio. Et ce modèle analytique est validé par un mesure de débit réel d'un réseau 802.11b.

## 4 Modélisation analytique

Notre travail consiste à proposer un modèle analytique d'un réseau Wifi dont la planification radio est connue, et de prévoir les performances associées à une telle planification radio. Nous exprimons les paramètres du modèle en fonction des propriétés radios de la carte, du nombre de machine et aussi de la position des stations. Nous discutons aussi du problème des nœuds cachés et les interférences co-canal dans ce rapport. Nous proposons de diviser l'étude en deux parties : d'abord construire un modèle standard basé sur le scénario avec un seul point d'accès dans la carte de couverture; ensuite nous y ajoutons des analyse sur les nœuds cachés et l'interférence. Dans cette partie, nous utilisons une carte de couverture radio obtenue à l'aide de l'outil WILDE. WILDE permet de calculer les niveaux du champs sur chaque point de la carte. La Figure 6 représente une carte avec un point d'accès Wifi **A**.

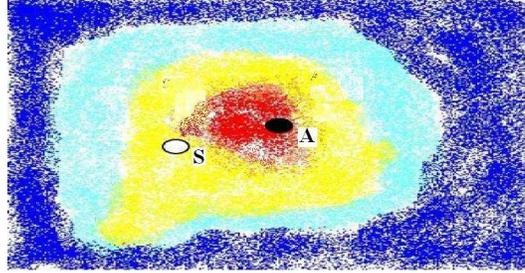


Figure 6: carte de couverture radio

#### 4.1 Caractérisation de l'environnement radio

Nous procédons avant tout à une analyse sur la qualité radio de la carte. Les différentes couleurs représentent les différents niveaux de puissance reçue dans un espace qui est couvert par un point d'accès A. La zone rouge présente un niveau de puissance en réception plus élevé. Quand les machines s'éloignent de A, elles reçoivent un niveau de champ radio moins élevé. Donc la zone bleue est une zone qui est couverte par un signal plus faible. Le point noir A représente le point d'accès du réseau, et le point S est une station.

Les stations dans un réseau 802.11b peuvent fonctionner en 4 paliers de débit: 11Mbps, 5,5Mbps, 2Mbps, 1Mbps. Le choix de débit est lié à la puissance du signal en réception et le rapport SNR de chaque machine. Les valeurs de ces deux derniers critères sont différents suivant le type de chipset de la carte 802.11. Par exemple, une carte Orinoco travaille en 11Mbps si la puissance de signal en réception est supérieure à -82dbm. Si la puissance en réception se trouve au dessous de ce seuil, elle n'est plus capable de travailler en 11Mbps. Elle va donc décider de passer en 5,5Mbps ou encore 2Mbps, 1Mbps en fonction de la puissance de signal reçu. C'est le même principe pour le SNR. Chaque débit est lié à un seuil SNR pour assurer une bonne réception.

Il n'est pas difficile de comprendre que pour un même canal, suivant le différent débit de transmission (quelque soit 11Mbps ou 5,5Mbps), l'utilisation du canal est différent. Il vient du fait que la vitesse de transmission est différente, ce qui veut dire que le temps consacré pour transmettre un paquet est différent. Or les IFSs (interframe space) qui sont liés à chaque transmission restent les mêmes. Pour une transmission donnée, l'utilisation du canal peut s'exprimer comme:

$$\frac{T_{donnees}}{T_{donnees} + T_{IFSs}}$$

Dans un réseau où les machines travaillant à différent débit de transmission coexistent, les stations partagent un seul canal. Il n'y a plus de sens de parler l'utilisation de bande passante (Throughput dans [7]) ici, puisque les machines ne disposent pas la même bande passante. Du coup nous introduisons la notion **taux d'occupation du canal**. Il représente le rapport entre le temps effectif réservé pour une transmission de données sur le canal et un temps moyenne d'un slot. Suivant la répartition des machines travaillant à chaque débit, le

taux d'occupation du canal pour chaque type de machines est différent. Donc dans la carte de couverture, nous séparons les zones dans lesquelles les machines ont la même vitesse de transmission. Admettons que 802.11 est un protocole équité (ie. toutes les machines ont la même probabilité d'accès au médium), alors nous pouvons calculer pour chaque type de machine (11Mbps, 5,5Mbps, etc.), leur taux d'occupation du canal.

Sachant que la carte de couverture est obtenue à l'aide de l'outil WILDE, la présence des obstacles physique (les murs, les fenêtres) est prise en compte et représentée par les niveaux de champs dans l'espace. Nous partons de ces informations radio, pour tracer les zones, appelées Zone de 11Mbps, Zone de 5.5Mbps, Zone de 2Mbps et Zone de 1Mbps. Suivant la planification radio et la configuration du point d'accès, il est tout à fait possible que seulement un sous ensemble de zones soit présentés dans la carte. La figure 7 représente une découpage de zone dans une carte de couverture radio.

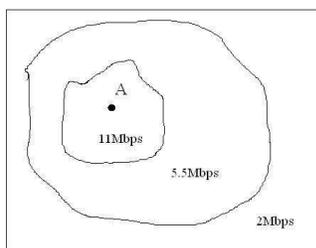


Figure 7: Une carte couverture découpé en multi-zone

Le choix de ce découpage est simple: nous prenons les seuils des sensibilités de chaque débit pour une carte 802.11b donnée (c'est la carte de Orinoco qui est choisi dans notre étude). Par exemple la puissance de sensibilité requise est  $-82\text{dBm}$ , nous considérons que tous les points sur lesquels la puissance de réception est supérieurs à  $-82\text{dBm}$  sont dans la Zone de 11Mbps. C'est-à-dire, si la position d'une stations est dans cette zone, alors la stations fonctionne à 11Mbps. C'est sur ce même principe que nous définissons les autres zones (cf. annexe 1, pour plus d'informations).

Dans cette partie nous ne tenons pas compte des problèmes des nœuds cachés, ni des interférences. Nous procédons une analyse supplémentaire dans la partie 4.2.2.

## 4.2 Modélisation

Notre modélisation s'inspire du modèle de Bianchi. Notre modèle est composé d'une chaîne de Markov à deux dimensions modélisant les états de backoff, et une analyse des événements dans le médium.

Nous définions avant tout les paramètres utilisés dans le modèle. Parmi ces paramètres, certains sont décrits dans la spécification de la norme 802.11 comme:

- $W$ . La taille minimale de la fenêtre de contention (égale à 31 pour DSSS).
- $m'$ . La taille maximale de la fenêtre de contention est  $2^{m'}W$  (égale à 5 pour DSSS).

- $m$ . Le nombre maximal de retransmission (égale à 7 dans la norme standard).
- $T_{SIFS}$ . La durée d'un SIFS. (égale à  $10\mu s$  pour DSSS)
- $T_{DIFS}$ . La durée d'un DIFS. (égale à  $50\mu s$  pour DSSS)
- $T_{EIFS}$ . La durée d'un EIFS. (égale à  $354\mu s$  pour DSSS)
- $T_{ACK}$ . La durée d'une accusé de réception. (suivant le vitesse de transmission;  $112\mu s$  pour 1Mbps)
- $T_{slot}$ . La durée d'un slot vide. (égale à  $20\mu s$  pour DSSS)
- $T_H = T_{PHYh} + T_{MACh}$ . La durée d'une entête Physique et une entête MAC.
- $P$ . Taille de la partie de donnée dans une paquet (nous utilisons des paquets de taille identique).
- $\delta$ . Le délai de propagation sur le canal.

Nous supposons ensuite qu'il y a  $n$  stations dans le réseau. Chaque station a un taux identique de transmission  $\tau$  dans un slot de temps donné. Un bon protocole d'accès au médium doit assurer l'équité de l'entité qui implémente ce protocole. C'est pour cette raison nous supposons que le taux de transmission est identique pour toutes les stations (déjà dit dans 4.1). Quelques études récentes montrent que dans certains scénarii spécifiques les inéquités apparaissent, néanmoins nous conservons l'hypothèse d'équité. Parce que nous nous intéressons au comportement moyenne d'un réseau 802.11. Or en moyenne la propriété d'équité est vraie pour 802.11.

Il y a trois probabilités qui sont importantes dans notre étude. Tout d'abord, la probabilité de collision:  $p_c$ . Dans toutes les études de performances d'un réseau 802.11, l'importance de ce paramètre a été bien identifié. Donc elle est indispensable dans notre modèle. A côté de la probabilité de collision, nous avons défini une probabilité des paquets erronés:  $p_e$ . Sa signification est la probabilité qu'un paquet est erroné après une transmission. Comme nous l'avons expliqué dans la partie 3, la qualité du signal a des impacts sur la performance. Ce paramètre représente en quelque sorte la qualité du signal pendant la transmission. Plus cette probabilité est grande, et moins la qualité est bonne. Les erreurs que nous définissons ici sont les erreurs remontés au niveau MAC depuis les couches inférieures (couche LLC et Physique). Ce sont les erreurs qui n'ont pas pu être corrigées, malgré la technique de codage en place et les auto-corrections. La troisième notion est la probabilité de retransmission. Nous pensons qu'une collision ou une erreur dans le paquet sont suivis par une retransmission. C'est la retransmission qui est la source directe de la dégradation des performances du réseau. Nous considérons donc la probabilité de retransmission  $p_r$  comme le somme de la probabilité de collision et la probabilité des erreurs dans le paquet. En fin, Le taux d'occupation du canal est représenté par le paramètre  $S$ . Voici la liste des définitions de ces paramètres.

- $\tau$ . La probabilité d'une station transmet dans un slot de temps donné.
- $n$ . Le nombre de stations dans le réseau.
- $p_c$ . La probabilité de collision.
- $p_e$ . La probabilité qu'un paquet soit erroné.
- $p_r$ . La probabilité de retransmission.
- $S$ . Le taux d'occupation du canal.

### 4.2.1 Un seul point d'accès

Dans un première temps, nous nous concentrons sur un scénario où il y a qu'un seul point d'accès dans la carte. Les hypothèses liées à ce scénario sont: nous négligeons les problèmes des nœuds cachés; il n'y a pas d'interférences; nous choisissons d'utiliser le DSSS pour la couche Physique. Et les stations travaillent sous un trafic saturé, c'est-à-dire, à chaque l'instant elles ont toujours un paquet à envoyer.

**Modèle de Chaîne de Markov** Nous construisons une Chaîne de Markov pour modéliser les états de backoff. Elle est représenté sur la figure 8.

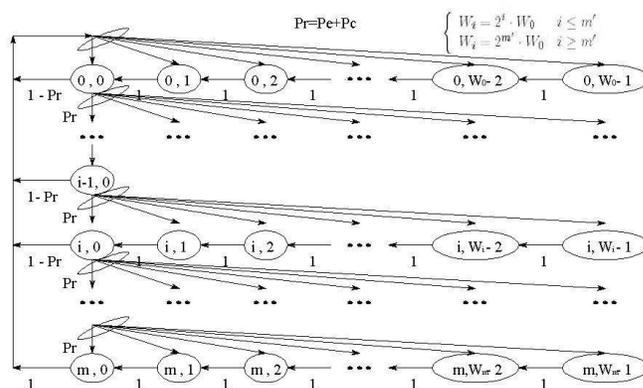


Figure 8: Chaîne de Markov pour les états de backoff

Dans ce modèle, nous définissons  $b(t)$  comme le processus stochastique qui représente le slot de temps du procédé de backoff; tandis que  $s(t)$  est le processus stochastique qui représente l'état de backoff pour une station donnée à un instant donné. Chaque état de la chaîne représente un état du processus  $\{s(t), b(t)\}$  (en deux dimensions).

Nous définissons les  $W_i$  la taille de la fenêtre de contention pour chaque état de backoff. Elles ont les expressions suivants:

$$\begin{cases} W_i = 2^i \cdot W_0 & i \leq m' \\ W_i = 2^{m'} \cdot W_0 & i \geq m' \end{cases} \quad (1)$$

Où  $W_0 = (CW_{min} + 1)$ , et  $2^{m'} W_0 = (CW_{max} + 1)$ , pour DSSS  $m' = 5$ .

Dans cette chaîne de Markov, les probabilités de transitions non nulles sont:

$$\begin{cases} P\{i, k|i, k+1\} = 1 & k \in [0, W_i - 2] i \in [0, m] \\ P\{0, k|i, 0\} = (1 - p_r)/W_0 & k \in [0, W_0 - 1] i \in [0, m - 1] \\ P\{i, k|i - 1, 0\} = p_r/W_i & k \in [0, W_i - 1] i \in [1, m] \\ P\{0, k|m, 0\} = 1/W_0 & k \in [0, W_0 - 1] \end{cases} \quad (2)$$

Le probabilité  $p_r$  dans notre chaîne représente la probabilité de retransmission au lieu de la probabilité de collision dans tous les modèles existantes.

Supposons que  $b_{i,k} = \lim_{n \rightarrow \infty} P\{s(t), b(t)\}$ , où  $i \in [0, m] k \in [0, W_i - 1]$  est la distribution stationnaire de cette Chaîne de Markov, alors nous pouvons calculer l'expression de la probabilité  $b_{i,k}$ . Nous obtenons les relations suivantes:

$$b_{i,0} = p_r \cdot b_{i-1,0}, \quad 0 < i \leq m \quad (3)$$

Après simplification

$$b_{i,0} = p_r^i \cdot b_{0,0}, \quad 0 \leq i \leq m \quad (4)$$

Comme la chaîne est régulière, pour chaque  $k \in [0, W_i - 1]$ , nous obtenons:

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} \cdot \begin{cases} (1 - p_r) \cdot \sum_{j=0}^{m-1} b_{j,0} + b_{m,0}, & i = 0 \\ p_r \cdot b_{i-1,0}, & 0 < i \leq m \end{cases} \quad (5)$$

Cela peut être simplifié à:

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} \cdot b_{i,0}, \quad 0 \leq i \leq m \quad (6)$$

Nous appliquons la condition que le somme des probabilités de tous les états est égale à 1:

$$1 = \sum_{k=0}^{W_i-1} \sum_{i=0}^m b_{i,k} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \sum_{k=0}^{W_i-1} \frac{W_i - k}{W_i} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \cdot \frac{W_i + 1}{2} \quad (7)$$

En combinant le (4) et le (6), nous déterminons l'expression de  $b_{0,0}$  comme la suivante:

$$b_{0,0} = \begin{cases} \frac{2 \cdot (1-2p) \cdot (1-p_r)}{W \cdot (1-(2p)^{m+1}) \cdot (1-p_r) + (1-2p) \cdot (1-p_r)^{m+1}}, & m \leq m' \\ \frac{2 \cdot (1-2p) \cdot (1-p_r)}{W \cdot (1-(2p)^{m'+1}) \cdot (1-p_r) + (1-2p) \cdot (1-p_r)^{m'+1} + W \cdot 2^{m'} \cdot p_r^{m'+1} \cdot (1-2p) \cdot (1-p_r)^{m-m'}}, & m \geq m' \end{cases} \quad (8)$$

Nous exprimons la probabilité qu'une station transmette dans un slot de temps donné,  $\tau$ , comme la somme de tous les états  $b_{i,0}$ , parce qu'une station peut transmette si et seulement elle est dans ces états.

$$\tau = \frac{1 - p_r^{m+1}}{1 - p_r} b_{0,0} \quad (9)$$

Où

$$p_r = p_c + p_e \quad (10)$$

Or nous pouvons considérer  $p_c$ , la probabilité de collision comme la probabilité qu'il y a au moins deux stations transmettant en même temps ([7]), ce qui donne:

$$p_c = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (11)$$

Maintenant il reste à exprimer le  $p_e$ . On peut trouver un paramètre BER (Bit Error Rate) dans la fiche de description d'une carte 802.11b. Il signifie le taux d'erreur sur chaque bit quand la carte travaillent dans des conditions normales (température, humidité). En connaissant la taille du paquet, il est possible d'obtenir le taux des erreurs du paquet à partir de BER. D'où l'expression de  $p_e$ :

$$p_e = 1 - (1 - BER)^{L_P} \quad (12)$$

Où  $L_P$  est la taille d'un paquet avec l'entête de Mac et Physique:  $L_P = P + L_{MAChead} + L_{PHYhead}$ . Par ex. le BER d'une carte Orinico PCMCIA 802.11b égale à  $10^{-5}$ , avec une trame de donnée 1000 octets,  $p_e$  est à peu près de 0.08.

A partir des équations (9), (10), (11) et (12), nous obtenons un système d'équation avec deux variable  $p_r$  et  $\tau$ :

$$\begin{cases} \tau = \frac{1-p_r^{n+1}}{1-p_r} b_{0,0} \\ p_r = 1 - (1 - \tau)^{n-1} + 1 - (1 - BER)^{L_P} \end{cases} \quad (13)$$

Nous sommes capable de trouver les expressions numériques de  $p_r$  et  $\tau$  avec la valeur numérique de  $n$  (d'après [7] il est trop difficile de trouver une expression générale de  $p_r$  et  $\tau$  sans donner la valeur numérique de  $n$ ).

**Analyse du débit** Supposons que  $P_{tr}$  la probabilité qu'il y a au moins une transmission dans le réseau pendant un slot de temps donné. Et  $P_s$  la probabilité qu'une transmission est réussit sachant  $P_{tr}$ . Il est possible de les exprimer en fonction de  $\tau$ :

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n \quad (14)$$

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1} \cdot (1-p_e)}{P_{tr}} \\ &= \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1} \cdot (1-p_e)}{1-(1-\tau)^n} \end{aligned} \quad (15)$$

Or nous avons décidé de séparer les types de machine, il faut donc exprimé ces deux probabilités suivant la zone. Par exemple, supposons qu'il y a  $n_{11}$  machines émettent à 11Mbps, alors  $P_{tr}$  et  $P_s$  ont les expressions suivantes :

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^{n_{11}} \quad (16)$$

$$P_s = \frac{n_{11}\tau(1-\tau)^{n_{11}-1} \cdot (1-p_e)}{1-(1-\tau)^{n_{11}}} \quad (17)$$

Ainsi pour les  $P_{tr11}$ , et  $P_{s11}$  associés à chaque zone de débit. Le taux d'occupation du canal  $S$  peut s'exprimer comme le ratio de la durée moyenne pour la transmission de la partie donnée du paquet (Payload) sur la durée complet d'un slot de temps:

$$S = \frac{E[\text{Payload}]}{E[\text{duree un slot}]} = \frac{P_s P_{tr} T_P}{(1 - P_{tr}) T_{slot} + P_s P_{tr} T_s + (1 - P_s) P_{tr} T_r} \quad (18)$$

Ici,  $T_s$  (*resp.*  $T_r$ ) est la durée moyenne que le canal est occupé par une transmission réussie (*resp.* une retransmission).  $T_P$  est le temps d'émission de Payload, sachant que  $T_P$  est différent suivant les débit d'émission. Les relations entre  $T_s$ ,  $T_r$  et  $T_P$  sont les suivantes:

$$\begin{cases} T_s^{bas} = T_{DIFS} + T_H + T_P + \delta + T_{SIFS} + T_{ACK} + \delta \\ T_r^{bas} = T_{DIFS} + T_H + T_P + \delta \end{cases} \quad (19)$$

en mode Basic Access.

Les expressions de ces paramètres sont modifiés par rapport celles dans [7] (voir annexe 2) ou [8]. Notamment dans l'expression de  $T_r$ , nous pensons que  $T_{ACK}$  ne doit pas être compté dans le cycle. Parce que l'accusé de réception n'est pas présenté sur le médium. C'est vrai que la station de source attend une durée plus longue que DIFS après la transmission pour recevoir l'accusé de réception. Mais une fois DIFS est écoulée, les autres machines dans le réseau ont le droit d'émettre une trame (si leur backoff est épuisé). Comme nous étudions le scénario du trafic saturé, donc il est raisonnable de considérer que le canal a des chances d'être pris par une autre station.

Dans notre cas, les paramètres  $T_P$ ,  $P_{tr}$ ,  $P_s$ ,  $T_s$  et  $T_r$  dans l'expression de  $S$  dépendent le débit. Sachant que le dénominateur représente le temps moyen d'un slot, le  $P_s P_{tr} T_s$  devient  $\sum P_{s_i} P_{tr_i} T_{s_i}$  et  $(1 - P_s) P_{tr} T_r$  devient  $\sum (1 - P_{s_i}) P_{tr_i} T_{r_i}$ . Où:

$$\begin{cases} T_{s_i}^{bas} = T_{DIFS} + T_H + T_i + \delta \\ \quad + T_{SIFS} + T_{ACK} + \delta \\ T_{r_i}^{bas} = T_{DIFS} + T_H + T_i + \delta \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad Di = 11, 5.5, 2, 1 \quad (20)$$

En fin le taux d'occupation du canal pour un type de machine est:

$$S_i = \frac{P_{s_i} P_{tr_i} T_i}{(1 - P_{tr}) T_{slot} + \sum P_{s_i} P_{tr_i} T_{s_i} + \sum (1 - P_{s_i}) P_{tr_i} T_{r_i}} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad Di = 11, 5.5, 2, 1 \quad (21)$$

Pour obtenir le débit moyen du réseau, il suffit de multiplier le débit de transmission par leur taux d'occupation du canal. Cela permet de calculer la répartition de la charge dans chaque zone. Et la somme de ces valeurs donne le débit moyen du réseau.

$$D_{moyen} = \sum S_i * Di \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad Di = 11, 5.5, 2, 1 \quad (22)$$

Nous avons procédé une deuxième méthode pour calculer le débit moyen. Après obtenir les taux d'occupation du canal de chaque type de machine, en faisant la somme nous obtenons

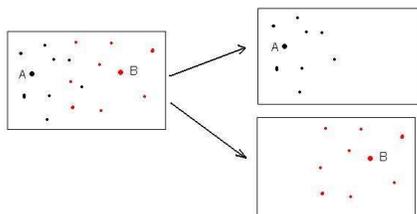


Figure 9: Décomposition de la carte

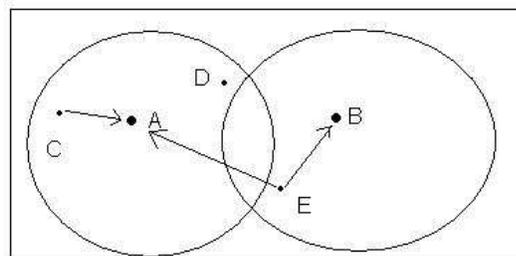


Figure 10: Interférence entre deux transmissions

l'utilisation total du canal du réseau  $S_t$ . Nous calculons ensuite le débit moyen de transmission dans le réseau,  $D_t$ , qui égale l'inverse du temps moyen pour transmettre un bit dans le réseau:  $\sum \frac{1}{\frac{n_i}{n} \cdot \frac{1}{D_i}}$ . En faisant le produit de  $S_t$  et  $D_t$ , nous obtenons le  $D_{moyen}$  du réseau. J'insiste ici que avec deux méthode, nous retrouvons exactement la même valeur de  $D_{moyen}$ .

#### 4.2.2 Extension

Notre modèle de base modélise un réseau 802.11 fonctionnant sans interférence ni problème des nœuds cachés. Pour prendre en compte tous ces problèmes, nous ajoutons les analyses supplémentaires pour compléter l'étude.

**Deux point d'accès indépendants** Nous discutons tout d'abord sur une zone de service couverte par deux points d'accès travaillant dans les canaux différents non adjacents. Les stations dans la carte sont configuré pour se connecter à un point d'accès ou l'autre, mais pas les deux en même temps.

Ici, la configuration des canaux de transmission fait en sorte qu'il n'y a pas d'interférence entre les transmissions simultanées en fréquences différentes. Nous pouvons simplifier ce problème en considérant qu'il y a deux réseaux fonctionnant indépendamment. Chaque point d'accès s'occupe des stations qui lui sont attachés. En appliquant notre modèle de base sur chaque réseau, nous obtenons les performances de chacun.

**Deux point d'accès non-indépendants** La situation change complètement quand dans une zone de couverture il y a deux points d'accès fonctionnant dans le même canal de fréquence. Du fait que toutes transmissions sont modulées et envoyées avec la même fréquence, alors toutes les stations utilisent le même médium d'accès radio. Or ce dernier est partiellement vrai, parce que chaque station a une portée radio limitée. Autrement dit elles n'ont pas la même vision du réseau. Elles ne voient que les stations dans leurs portées radios. la Figure 10 illustre un exemple. La station C et D sont attachés au point d'accès A, or la station E dialogue avec point d'accès B. Suivant la localisation de ces stations, C et

E ne se détectent pas mutuellement. Tous les trois fonctionnent avec CSMA/CA classique. En effet C croit qu'il partage le médium que avec D, et E pareil. Supposons que A est dans la portée de radio de E. Il peut se passer un scénario lorsque C est en transmission avec A, E envoie une trame vers B aussi. Au niveau de A, le signal provenant de E vient interférer le paquet de C. Ainsi la qualité de réception est diminué.

Nous constatons que les problèmes de l'interférence influencent une partie des stations dans chaque réseau associé avec le point d'accès. Ces stations vont tomber le plus souvent en retransmissions. En conclusion l'interférence joue comme un facteur de la probabilité de retransmission. Nous définissons ainsi le paramètre  $p_i$ , la probabilité de retransmission avec la présence de l'interférence. Donc l'équation (10) devient:

$$p_r = p_i + p_c + p_e \quad (23)$$

En résolvant les systèmes des équations (9), (26), (11) et (12), nous pouvons trouver l'expression de  $\tau$ , qui nous permet de calculer les débits de chaque réseau (celui lié à point d'accès A et celui de B). Il est clair que les performances sont moins bonnes que celles obtenues dans le scénario de 4.2.2, dû l'introduction des retransmission supplémentaires. Donc il est recommandé de configurer ses point d'accès dans les canaux bien séparés dans un site pour assurer une meilleure performance.

### 4.2.3 Effet des nœuds cachés

Pour nous, la présence des nœuds cachés dans le réseau fait apparaître un paramètre  $p_{cc}$  dans notre modèle, qui caractérise les collisions cachés. La valeur de ce paramètre dépend la configuration de lieu et les localisations des nœuds. Pour déterminer quels sont les nœuds cachés pour une station donné, il faut tracer une carte de couverture en plaçant la source du signal sur sa position comme figure 11. Nous pouvons identifier les zones (en bleu) de nœuds cachés pour cette station. C'est-à-dire les stations dans ces zones sont les nœuds cachés pour la station.

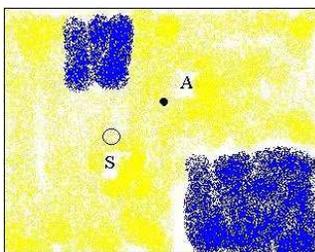


Figure 11: la carte couverture pour déterminer la zone de nœuds cachés

Par contre pour utiliser cette méthode, il faut l'appliquer sur toutes les stations. Cela sort du cadre d'un modèle analytique. Elle sera plutôt réalisable dans une simulation. Donc nous préférons laisser le  $p_{cc}$  comme un paramètre du modèle. Suivant la valeur que nous

donnons au départ, il représente le niveau de la présence des nœuds cachés dans le réseau. Ajuster l'équation (10) à:

$$p_r = p_{cc} + p_c + p_e \quad (24)$$

Avec toujours la même méthode, nous obtenons les performances d'un réseau 802.11b avec la présence des nœuds cachés. Elle est légèrement au-dessous des performances sans prise en compte des nœuds cachés (voir détail dans la partie 5.2.4).

Payload Application	1000 octets
En-tête UDP	8 octets
En-tête IP	20 octets
Payload MAC	1028 octets
En-tête MAC	34 octets
Sync PHY	192 bits à 1Mbps
ACK	14 octets
RTS	20 octets
CTS	14 octets
Délai de propagation	1 $\mu$ s
Durée de slot vide	20 $\mu$ s
SIFS	10 $\mu$ s
DIFS	50 $\mu$ s

Figure 12: tableau de paramètres pour l'analyse

## 5 Résultats

Nous avons développé la partie d'analyse de notre modèle 4.2.1 sous Matlab. La visualisation des résultats de différent scénario sous forme des courbes nous permet de comprendre de quelle manière les performances d'un réseau 802.11 évoluent. Nous discutons par la suite :

- les influences de la probabilité d'erreur dans le paquet sur l'utilisation de bande passante.
- l'évolution de l'utilisation de bande passante en fonction du nombre de stations.
- les influences de la configuration de lieu sur la capacité du réseau.

Pour les analyses, nous utilisons **DSSS** comme la couche PHY. Les paramètres associés sont décrits dans le tableau 12.

La figure 13 représente les événements pendant la transmission d'une trame en cas de succès; La figure 14 représente les événements pendant la transmission d'une trame en cas d'échec.

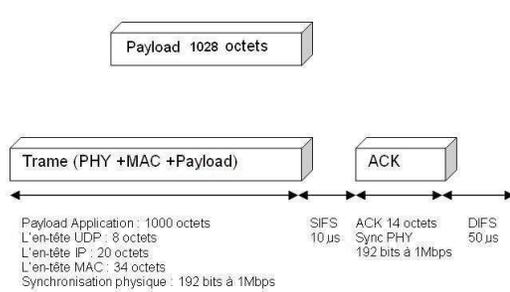


Figure 13: Une transmission réussit

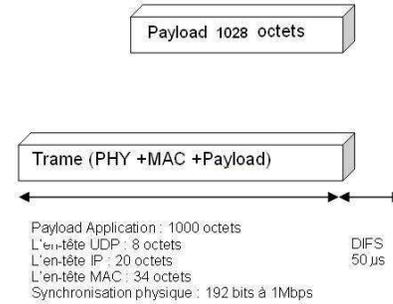


Figure 14: Une transmission en échec

## 5.1 Evaluation de la bande passante utile

Dans un premier temps, nous analysons le nombre de stations et les probabilités  $p_e$ ,  $p_{cc}$ ,  $p_i$ . Ce sont les quatre principaux facteurs qui influencent la performance dans un réseau 802.11b. Afin de comparer nos résultats avec ceux de [7], dans cette partie la vitesse de transmission de toutes les stations est fixée à 1Mbps (les résultats de G.Bianchi sont obtenus avec cette vitesse de transmission). Comme toutes les machines travaillent à même débit, alors le taux d'occupation de canal représente aussi l'utilisation de bande passante.

### 5.1.1 En fonction du nombre de stations

Nous reprenons notre modèle de base. Nous utilisons l'expression (15) pour calculer l'utilisation. Voici deux courbes que nous obtenons avec la valeur de  $p_e$  à 0 et 0,2:

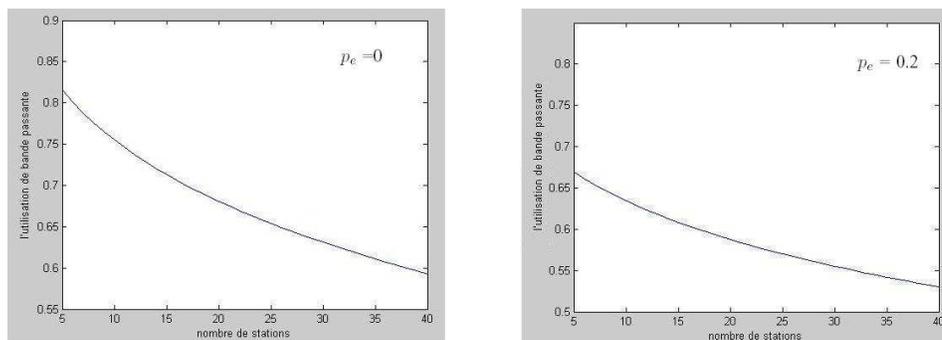


Figure 15: L'utilisation de bande passante vs nombre de stations

L'utilisation de bande passante est dégradé quand le nombre de stations dans le réseau augmente. Plus il y a des stations dans le réseau, et plus la probabilité de collision est élevé. La courbe de  $p_e = 0$  est très proche du résultat de [7], alors que la prise en compte de la probabilité d'erreur  $p_e$  a une influence évidente sur l'utilisation de bande passante. En revanche, la pente de courbe est moins tendu quand  $p_e$  est grande. Les courbes ont tendance à se stabiliser à la fin. Cela montre que dans une scénario avec le trafic d'entrée saturé, l'utilisation de bande passante est assurée (environ 0.5 pour 1Mbps).

### 5.1.2 En fonction de la probabilité d'erreurs sur le paquet

Il est évident que plus la probabilité d'erreur est grande, plus des retransmissions de paquet produisent. Donc l'utilisation de bande passante décroît quand la probabilité  $p_e$  augmente. Cet effet est visible sur la figure 16.

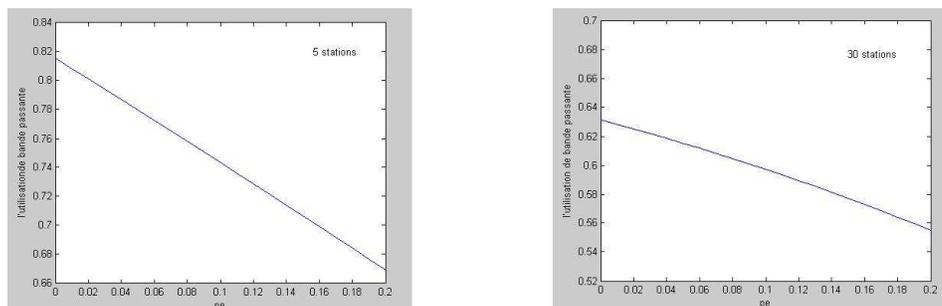


Figure 16: l'utilisation de bande passante *vs*  $p_e$

Nous constatons que cette relation est pratiquement linéaire. Nous nous apercevons aussi que plus il y a de stations dans le réseau, moins la pente sera tendu. Intuitivement cela vient du fait que plus il y a de machines dans le réseau et plus la probabilité de collision est grande ; or c'est le rapport  $\frac{p_e}{p_e + p_c}$  qui influence le taux de l'utilisation. Ainsi l'augmentation du taux de collision fait croître  $p_c$  qui fait diminuer le rapport (influencé sur la pente de la courbe).

## 5.2 Evaluation de la capacité d'un réseau 802.11 indoor

Nous avons appliqué notre modèle sur une carte couverture du réseau 802.11b au CITI. Cette carte est réalisée grâce à l'outil WILDE, qui est développé par CITI. Dans ce logiciel, chaque carte générée est associée à un point d'accès donné (pour voir une carte WILDE voir annexe). Cet outil est désigné pour la planification du réseau radio indoor. Nous allons voir la capacité (débit utile) d'un réseau 802.11b dans les différents scénarii.

### 5.2.1 Un seul point d'accès

Nous avons d'abord réparti les stations d'une façon uniforme dans une zone de service avec un seul point d'accès (la puissance d'émission est fixé en 100mW). Nous calculons un exemple avec 25 machines dans la carte. Dû la configuration des locaux CITI, il y a 19 stations qui sont capables de s'échanger des paquets avec le point d'accès, alors que 6 stations ne sont pas présentes dans le réseau WIFI. Parmi les 19 stations, 12 fonctionne à 11Mbps, 3 à 5,5Mbps, 2 à 2Mbps et 2 à 1Mbps. Ce choix est déterminé en fonction de la surface de chaque zone par rapport la surface totale de la carte. Les nombres de stations sont arrondis aux entiers. Le débit obtenu est de l'ordre de **2,12Mbps**.

Nous traçons les évolutions de débit moyen du réseau en fonction du nombre de stations. (*Remarque:* les valeurs de la deuxième courbe en \*, sont calculé directement à partir des pourcentages de stations dans chaque zone par rapport au nombre total de stations dans le réseau. Sur cette courbe l'étape de arrondi des nombres de station par zone n'est pas mise en place. Son but est d'obtenir une courbe lissée pour voir l'ordre de grandeur du débit.)

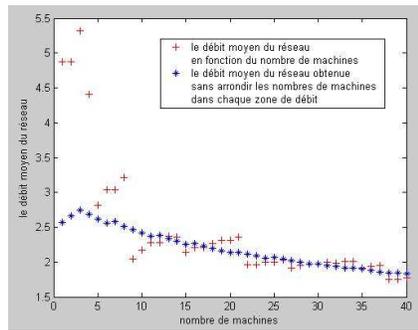


Figure 17: Evolutions de débit en fonction de nombre de station

Nous constatons une discontinuité sur la courbe de débit moyen; les arrondis sur le nombre de stations par zones impliquent que la répartition des stations n'est plus parfaitement uniforme. Pour peu de machines dans la carte de couverture (valeur de 1 à 3), la probabilité d'avoir toute les stations dans la zone à 11Mbps est très importante dû à la taille de la zone de service (;50% de la couverture totale). C'est pour cette raison qu'ils atteignent un débit largement supérieur. Pour les valeurs supérieure à 4 stations, des stations apparaissent dans les zones de faible débit, le débit du réseau chute beaucoup. Cela signifie que la présence de machine lente (débit de transmission moins rapide) dans le réseau dégrade non seulement le débit individuel de stations [9] et aussi le débit global du réseau. En gros nous pouvons prévoir le débit du réseau CITI fonctionne avec un seul point d'accès est de l'ordre 2Mbps.

Pour montrer que la performance d'un réseau est fortement liée à la topologie des lieux, nous avons construit deux cartes qui ont la même taille que celle de la carte CITI. Une présente un espace libre, l'autre un espace confiné. Nous positionnons sur un point d'accès toujours au même coordonnée avec 100mW de puissance en émission. Nous constatons que

toute la carte est couverte avec une puissance de réception supérieure à  $-82\text{db}$ , le seuil de réception pour 11 Mbps. En conséquence toutes les stations transmettent les paquets à 11 Mbps. Le débit d'un tel réseau est donc identique à une courbe de l'utilisation de bande de passante à 11Mbps (Voir annexe).

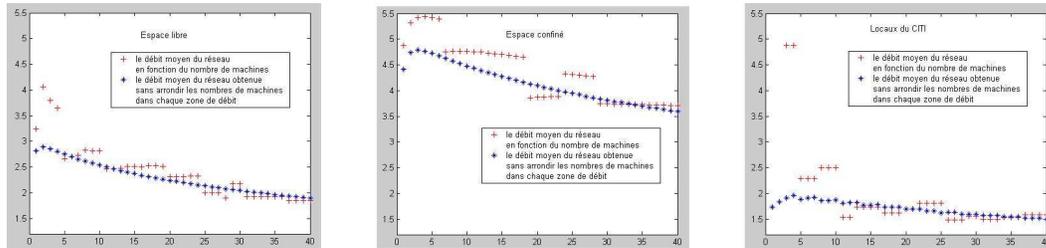


Figure 18: Influence Topologie

Nous réglons la puissance d'émission pour faire apparaître les multi-zones dans toutes les cartes (l'espace libre, l'espace confiné et carte de CITI). Nous constatons dans la figure 18 que avec la présence des tous les zones, les débits moyens des trois scénarios sont totalement différents. Ces derniers montrent bien que la topologie des lieux a des impact important sur les performances du réseau 802.11.

Pendant notre étude, nous constatons que le débit global dépend de la distribution de stations sur la carte. Nous l'appelons l'influence lié à la topologie du réseau. Nous mettons 20 stations sur la carte. Nous calculons le débit du réseau suivant les répartitions différentes de stations. Nous soulignons une grande variance. La variation du niveau de champ radio indoor est la raison principale de cette variance en terme de débit. Plus il y a des stations qui sont localisé dans une zone de faible débit, plus la performance est dégradée. Figure 19 représente le tableau de résultats de différents scénarii.

Nb 11Mbps	Nb 5.5Mbps	Nb 2Mbps	Nb 1Mbps	Débit (Mbps)
20	0	0	0	4.89
0	20	0	0	2.97
0	0	20	0	1.25
0	0	0	20	0.65
5	5	5	5	1.39
19	1	0	0	4.74
19	0	1	0	4.27
19	0	0	1	3.70
15	5	0	0	4.24

Figure 19: Débit moyen suivant la distribution

Pour visualiser l'effet de stations à faible débit sur le débit global du réseau, nous traçons l'évolution de performance en fonction de nombre de stations à faible débit dans le réseau.

Nous prenons à la base 10 stations qui fonctionnent à 11Mbps. Et nous y ajoutons des stations à 11Mbps, 5.5Mbps et 2Mbps respectivement dans trois cas. Les résultats sont présentés sur la figure 20.

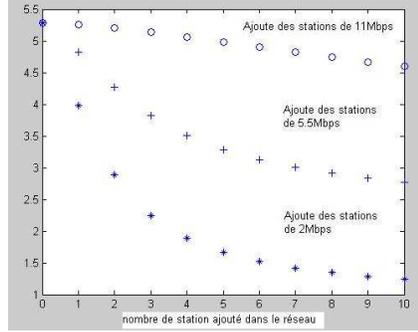


Figure 20: Présence des stations lentes

Sur le graphe la dégradation du débit global par la présence des stations est assez visible. Nous comparons ce résultat sur l'effet de stations lent dans le réseau avec celui dans [9]. Les auteurs ont essayé de caractériser cet effet à l'aide des expérimentations. Ils disent que intuitivement le débit de chaque stations individu, chute en proportion de  $\frac{1}{\sum n_i/D_i}$ . Où  $D_i$  sont les quatre paliers de débit théorique pour 802.11b, et  $n_i$  sont les nombres de stations fonctionnant à ces débit. Supposons que 10 utilisateurs disposent potentiellement du meilleur débit dans la zone de couverture d'un point d'accès, car s'en trouvant proche, soit 11 Mbit/s. Pour le moment le débit réel de chaque station est  $D_{vite}$ . Un utilisateur entre dans cette zone de couverture et, se situant relativement loin, est donc connecté à 5.5 Mbit/s. Lorsque ce dernier utilisera le canal radio pour communiquer, c'est-à-dire qu'il transmettra des données, cette activité provoquera une chute de débit pour tous les autres, ramenant ceux-ci à un débit apparent identique au sien. Et le rapport du débit individu de tous les stations  $D_{lente}$  sur  $D_{vite}$  égale à  $\frac{n_{11}/D_{11}}{n_{11}/D_{11} + n_{5.5}/D_{5.5}}$ . Pour valider notre modèle dans le scénario de *machine lente*, nous avons donc comparé notre courbe avec la courbe théorique.

Nous choisissons de prendre 10 stations à 11Mbps, et d'introduire 10 stations fonctionnant à 5.5Mbps une par une. Sachant notre modèle permet de prédire le débit global, il faut le diviser par le nombre de stations, en fin de comparer avec le courbe théorique dans la figure 21. Nous constatons que les forme de deux courbes sont quasi identiques, et les valeurs sont très proche. Ce qui montre que notre modèle est juste dans le scénario de machine lente.

### 5.2.2 Deux point d'accès indépendants

Dans le même site, il est évident que la performance du réseau est amélioré si deux points d'accès sont installés au lieu d'un. Nous plaçons cette fois deux point d'accès sur la carte

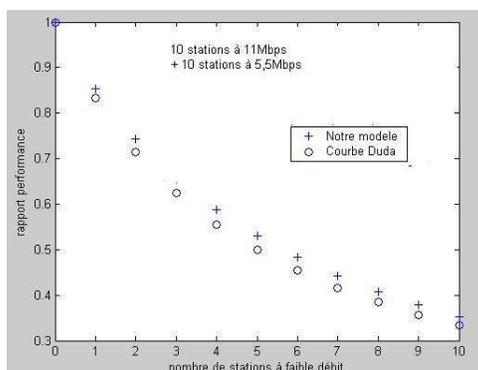


Figure 21: L'effet de station à 5,5mbps dans un réseau de 11Mbps sur le débit individuel

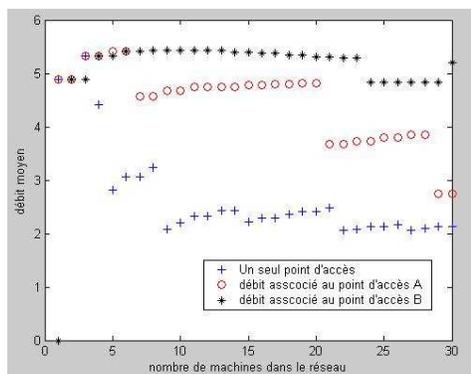


Figure 22: Comparaison des débit

couverture de CITI. Nous distribuons un ensemble des machines d'une façon uniforme sur la carte. Chaque station est attaché au point l'accès dont la puissance en réception est plus élevé. Dans la figure 22 nous présentons les performances obtenues aussi que celles avec un seul point d'accès.

Les performances individuelles de chaque réseau lié au point d'accès (A et B) sont nettement meilleurs que la performance du réseau où il n'y a qu'un point d'accès. D'ailleurs le débit du réseau lié au point d'accès B est plus élevé que celui lié à A. C'est parce que la majorité des stations lié à B ont une bonne puissance de réception. Quasiment tous les stations travaillent à 11 Mbps. Si la bande passant du lien entre A et B est suffisamment large (qui n'est pas le goulet d'étranglement de l'ensemble des réseaux), alors nous concluons que nous obtenons une meilleure performance avec deux point d'accès indépendants.

### 5.2.3 Deux point d'accès non-indépendants

En plus de la réalisation précédente, nous ajoutons une probabilité d'interférence dans chaque réseau associé avec un point d'accès. Nous plaçons 30 stations dans la carte. En faisant varier cette probabilité d'interférence, nous comparons les valeurs de la performance avec le débit du réseau avec un seul point d'accès, figure 23.

Nous constatons que jusqu'à la probabilité d'interférence égale à 0.2, deux point d'accès travaillant dans le même fréquence fournissent une meilleur performance qu'un seul point d'accès. Suivant cette valeur de l'interférence, nous pouvons choisir entre un point d'accès ou deux point d'accès pour obtenir une meilleur performance. Il faut noter que la figure 22 est associé avec une configuration donnée. Sous l'hypothèse de répartition uniforme des stations, en ajoutant un point d'accès supplémentaire, beaucoup de stations travaillant dans une zone de débit faible avant, ont une débit d'émission plus élevé (ex. passe de 2Mbps à 11Mbps). C'est la principale raison pour laquelle le débit du réseau est beaucoup amélioré.

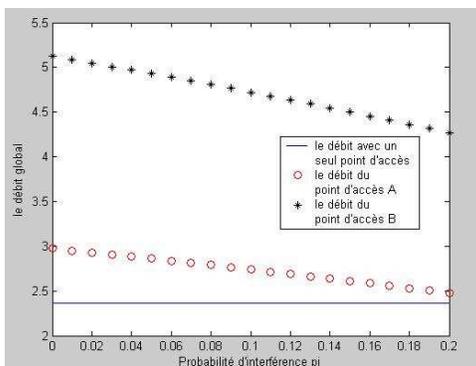


Figure 23: Débit avec 30 stations

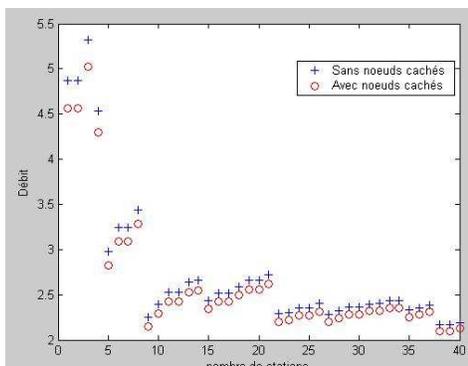


Figure 24: Comparaison des débit

#### 5.2.4 Effet des nœuds cachés

La figure 24 montre les différences entre le débit global sans nœuds cachés et celui avec une probabilité de collision caché de 0.05 introduit par les nœuds cachés. La performance est un peu dégradé à cause de la présence des nœuds cachés. Sachant que la probabilité de collision caché est normalement assez faible, finalement nous admettons que dans une évaluation du débit globale du réseau les problèmes des nœuds cachés sont négligeable.

## 6 Experimentation

### 6.1 Description de l'experimentation

Nous avons construit un 802.11b wLAN avec un seul point d'accès. Nous caractérisons la bande passant instantanée du wLAN en fonction du nombre de stations, qui partagent ensemble des ressources radio. Les mesures ont été rassemblées au moyen de sniffer le milieu. Cette méthode fournit les résultats en temps réel, ainsi non problème de synchronisation entre le transmetteur et le récepteur.

### 6.2 Stations, cartes, AP

Nous avons introduit 6 postes dans le wLAN. Chacune dispose une carte 802.11b de Lucent Orinoco. Le point d'accès relié avec un sink PC, était configuré dans le canal 11 avec la fréquence à 2.462 GHz. Le RTS/CTS et le fonctionnement WEP étaient désactivés, parce qu'il dégradent significativement la performance du couche MAC [5].

### 6.3 Topology du réseau

Une plage d'adresse IP, 192.168.0.\*, est assigné manuellement à chaque poste de travail, aussi bien que le point d'accès et le sink PC. Sink PC était le passerelle du réseau de test.

### 6.4 Logiciel du test

Le système d'exploitation du sink PC et du sniffer était Windows Xp, et les stations fonctionnent sous Linux avec le kernel version 2.4.27. Nous avons employé le mgen comme le générateur du trafic. Il génère du trafic UDP/IP avec certain paramètres. Toutes les stations envoient les paquets le plus vite possible vers sink PC via AP. D'autre part, le mgen est installer sur le sink PC pour recevoir et collecter les valeur des analyses. Nous avons utilisé *ethereal* sur le PC sniffer pour capturer tous les paquets sur sa interface sans fil. Nous avons placé la carte wLAN du sniffer très près de l'antenne du AP de sorte que nous ayons pu considérer que le sniffer capture tout le trafic reçu par AP.

### 6.5 Results

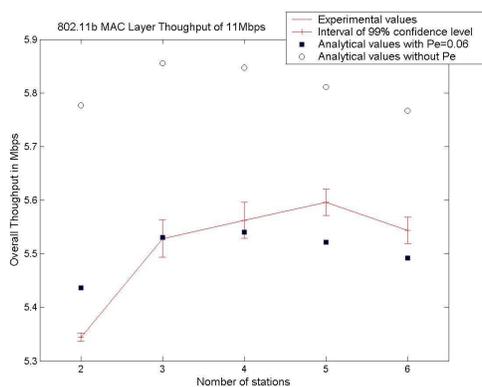


Figure 25: Débit moyen du réseau à 11Mbps

Nous avons conduit notre expérimentation avec différents scénarii. Dans chaque scénario, nous avons calculé la débit moyenne du réseau avec son intervalle de confiance sur les échantillons rassemblés pendant le période de mesure. En comparant la courbe expérimentale à notre courbe analytique, nous constatons que nous pouvons corrélérer les deux courbes en ajustant le paramètre  $p_e$ . Par exemple, dans le scénario où toutes les stations transmises à 11Mbps, quand  $p_e$  égale à 0.06, la courbe analytique est vraiment très proche à celle d'expérimentation (figure 25). Nous observons également que plus le taux de transmission est inférieur, plus le  $p_e$  est petit. Nous pouvons expliquer ce phénomène en effet que la

qualité de SNR demandée est lié au taux de transmission. Quand un poste de travail transmettre à un bas débit, le SNR demandé pour une bonne transmission est inférieur aussi, ce qui rendent la probabilité de l'erreur de transmission plus petite. Dans chaque graph, l'apparence de la courbe analytique est presque identique que la courbe expérimentale (figure 26), ce qui montre que notre modèle analytique correspond à ce qui s'est produit sur le médium radio.

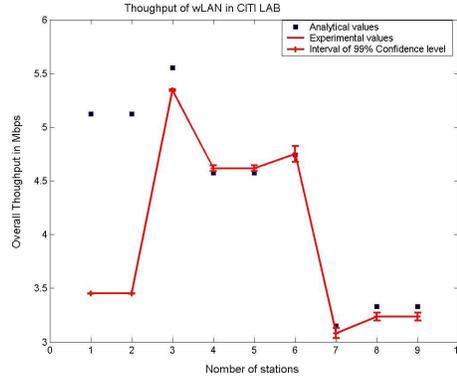


Figure 26: Debit du wLAN au laboratoire CITI

## 7 Perspectives et Conclusions

Nous avons proposé un modèle analytique d'évaluation des performances du niveau MAC d'un réseau 802.11b. Notre modèle prend en compte les caractéristiques de l'environnement radio. Nous avons également comparé les résultats des performances avec les différentes configurations. Nous avons montré aussi que les performances d'un réseau 802.11b sont non seulement liées au protocole d'accès au médium et au nombre de stations, mais elles dépendent également de la topologie des lieux et de la topologie du réseau. Nous avons identifié les problèmes qui ont des impacts sur les performances du réseau sans fil telles que les interférences et les nœuds cachés. Le modèle analytique que nous avons retenu à la fin de notre projet est plus qu'un simple modèle analytique. Il s'agit aussi des analyses sur les différents problèmes spécifiques qui ne sont pas forcément présents dans tous les réseaux.

### 7.1 Modélisation

Nous avons intégré la probabilité d'erreur dans une transmission  $p_e$ ; la probabilité d'interférence  $p_i$ ; et la probabilité de collision cachée  $p_{cc}$  dans notre modèle. Ces dernières n'ont pas été traitées dans les modélisations analytiques existantes. Nous avons montré que ces paramètres ont des impacts sur les performances du réseau 802.11b. Nous avons aussi analysé jusqu'à

quel niveau, les performances sont influencés. Nous avons réussi à exprimer la  $p_e$  à partir des caractéristiques de carte WIFI. Nous avons montré que  $p_i$  et  $p_{cc}$  dépendent la topologie des lieux et la topologie du réseau. Or la méthode pour les exprimer dans un réseau sans fil reste à généraliser. Nous proposons de faire des mesures réelles, caractériser les différences entre les performances dans différentes scénarii. Puis comparer avec les courbes tracé dans nos analyses, afin de trouver une expression approximative de ces paramètres. Cela reste comme une suite de nos travaux.

## 7.2 Conclusion

Nous considérons que nous avons proposé un modèle analytique d'évaluation des performances d'un réseau 802.11b. Il s'agit d'un modèle non seulement construit sur les propriétés du réseau 802.11b, mais aussi intégrant les caractéristiques radios de la topologie de l'environnement et la topologie du réseau. Nous avons aussi fournit un ensemble d'analyses complètes pour les différentes scénarii du réseau (soumis d'interférence, avec la présence des nœuds caché). Grâce à nos résultats d'analyse, nous avons montré que la prise en compte des facteurs de l'environnement est nécessaire pour évaluer les performances d'un réseau 802.11b réel.

## References

- [1] Reinhard German Armin Heindl. Performance modeling of iee 802.11 wireless lans with stochastic petri nets. *Performance Evaluation* 44:139-164, 2001.
- [2] A. Udaya Shankar Arunchandar Vasan. An empirical characterization of instantaneous throughput in 802.11b wlans. *Technical Report of University of Maryland*, 2002.
- [3] Moshe Zukerman Chuan Heng Foh. Performance analysis of the iee 802.11 mac protocol. *EW 2002 Conference*, 2001.
- [4] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee. Iee standard for wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. 1999.
- [5] Dominique Dhoutaut. *Etude du standard IEEE 802.11 dans le cadre des réseaww ad hoc : de la simulation à l'expérimentation*. PhD thesis, INSA de LYON, 2003.
- [6] E.Gregori F.Cali, M.Conti. Iee 802.11 wireless lan: Capacity analysis and protocol enhancement. *IEEE Infocom*, 1998.
- [7] G.Bianchi. Performance analysis of the iee 802.11 dcf. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 2000.
- [8] Keping Long Haitao WU, Yong Peng. Performance of reliable transport protocol over iee 802.11 wireless lan: Analysis and enhancement. *IEEE INFOCOM 2002*, 2002.

- 
- [9] Martin Heusse, Franck Rousseau, Gilles Berger-Sabbatel, and Andrzej Duda. Performance anomaly of 802.11b. *IEEE Infocom 2003*, 2002.
  - [10] Yuguang Fang Hongqiang Zhai. Performance of wireless lans based on ieee 802.11 mac protocols. *the 14th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'03)*, 2003.
  - [11] Ashok Agrawala Jihwang Yeo. Packet error model for the ieee 802.11 mac protocol. *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2003.
  - [12] Radha Khayam. Markov-based modeling of wireless local area networks. *ACM Mobi-com Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*, 2003.
  - [13] G.Conte S.Donatelli G.Franceschinis M.A.Marsan, G.Balbo. *Modeling with Generalized Stochastic Petri Nets*. Wiley, 1995.
  - [14] Paul Muhlethaler. *802.11 et les réseaux sans fil*. EYROLLES, 2002.
  - [15] J. R. Norris. *Markov Chains*. Cambrigde University Press, 1997.
  - [16] V.Vitas A.C. Boucouvalas P.Chatzimisios. Throughput and delay analysis of ieee 802.11 protocol. *IEEE International Workshop on Network Appliances*, 2002.
  - [17] Richard A. Raines Michael A. Temple Randall B. Noel, Rusty O. Baldwin. Wireless lan performance in the presence of bluetooth interferers. *Australian Telecommunications, Networks and Applications Conference (ATNAC)*, 2003.
  - [18] S. K. S. Gupta S. Khurana, A. Kahol and P. K. Srimani. Performance evaluation of distribution co-ordination function for ieee 802.11 wireless lan protocol in presence of mobile and hidden terminals. *IEEE MASCOTS*, 1999.
  - [19] Michael Krappel Hayder Radha Shirish Karande, Syed A. Khayam. Analysis and modeling of errors at the 802.11b link layer. *IEEE ICME2003*, 2003.



---

Unité de recherche INRIA Rhône-Alpes  
655, avenue de l'Europe - 38334 Montbonnot Saint-Ismier (France)

Unité de recherche INRIA Futurs : Parc Club Orsay Université - ZAC des Vignes  
4, rue Jacques Monod - 91893 ORSAY Cedex (France)

Unité de recherche INRIA Lorraine : LORIA, Technopôle de Nancy-Brabois - Campus scientifique  
615, rue du Jardin Botanique - BP 101 - 54602 Villers-lès-Nancy Cedex (France)

Unité de recherche INRIA Rennes : IRISA, Campus universitaire de Beaulieu - 35042 Rennes Cedex (France)

Unité de recherche INRIA Rocquencourt : Domaine de Voluceau - Rocquencourt - BP 105 - 78153 Le Chesnay Cedex (France)

Unité de recherche INRIA Sophia Antipolis : 2004, route des Lucioles - BP 93 - 06902 Sophia Antipolis Cedex (France)

---

Éditeur  
INRIA - Domaine de Voluceau - Rocquencourt, BP 105 - 78153 Le Chesnay Cedex (France)  
<http://www.inria.fr>  
ISSN 0249-6399