

# *Ordonnancement du trafic dans un réseau maillé sans fil*

Anis Ouni — Hervé Rivano — Fabrice Valois

**N° 7189**

January 2010

---

 *Rapport  
de recherche*



## Ordonnancement du trafic dans un réseau maillé sans fil

Anis Ouni<sup>\*†</sup>, Hervé Rivano<sup>‡†</sup>, Fabrice Valois<sup>†</sup>

Thème : 1  
Équipes-Projets SWING

Rapport de recherche n° 7189 — January 2010 — 32 pages

**Résumé :** Dans un réseau radio maillé multi-saut où tous les routeurs émettent une quantité de trafic vers la passerelle, le goulot d'étranglement autour de cette passerelle représente la majeure contrainte. Ceci limite les performances du réseau, particulièrement la capacité du réseau. Dans ce travail, nous étudions l'ordonnancement autour de la passerelle afin d'améliorer les performances du réseau. Deux catégories de nœuds sont définies. La première se compose de nœuds situés dans le k-voisinage de la passerelle et fonctionnant avec un protocole d'accès au médium qui se base sur la technique TDMA. La deuxième catégorie contient tout le reste de nœuds fonctionnant avec le protocole d'accès au médium CSMA/CA. Nous nous intéressons à deux approches que nous avons proposées : la première vise à augmenter le nombre de slots (Durée de temps pour envoyer un paquet) dans la zone TDMA après avoir déterminé son ordonnancement optimal. La deuxième vise à augmenter la taille de la région TDMA. En se basant sur un large éventail de simulations, nous montrons que ces deux approches permettent d'obtenir des performances du réseau (en termes de trafic écoulé, taux de perte, capacité du réseau, etc.) meilleures que celle d'un réseau sans ordonnancement.

**Mots-clés :** Réseau maillé sans fil, capacité du réseau, performance du réseau, qualité de service, ordonnancement, TDMA, CSMA/CA.

\* Corresponding author - Partially supported by ANR VERSO ECOSCells

† Université de Lyon, INRIA, INSA Lyon, CITI, F-69621, France

‡ CNRS-INRIA-Université de Nice-Sophia Antipolis Mascotte

## Traffic scheduling in a Wireless Mesh Networks

**Abstract:** The major constraint in a multi-hop wireless mesh network where all routers emit a traffic to the gateway is the bottleneck around this one. This problem limits the network performance, particularly the network capacity. To improve network performance, we studied in this work the scheduling around the gateway. We defined two types of nodes ; the first one contains k-hops gateway-distant nodes which are working with the TDMA medium access protocol. The second type contains the remaining nodes that are functioning with CSMA/CA. We focus on two approaches that we suggested : the first aims to increase the number of slots in the TDMA area after having determined its optimal scheduling. The second aims to increase the TDMA area. We'll show through simulation, that more relevant network performances (carried traffic, loss rate, network capacity, etc.) are obtained using these approaches than a network without scheduling.

**Key-words:** Wireless mesh network, network capacity, network performance, quality of service, scheduling, TDMA, CSMA/CA.

# 1 INTRODUCTION

## 1.1 Contexte et problématique

Au cours de ces dernières années, les technologies de communications sans fil se sont imposées de façon indéniable dans notre vie quotidienne. Grâce à leur utilité et leur souplesse, les réseaux sans fils ont connu un véritable essor et un engouement de la part du grand public. Ainsi, ils ont motivé les chercheurs vers le déploiement de nouvelles solutions sans fil. L'une des plus importantes est l'apparition des réseaux maillés sans fil (WMN : Wireless Mesh Networks) [1], qui consistent à interconnecter plusieurs dispositifs sans fil entre eux en constituant ainsi un maillage sans recours au câblage.

Ces dernières années, les réseaux radio maillés ont représenté un centre d'intérêt qui intéresse un nombre de plus en plus important de travaux de recherche. Malgré ces travaux, plusieurs problèmes restent encore à résoudre. Ces derniers tournent autour du routage adaptatif [2], des mécanismes d'autonomie, de l'auto-organisation [3], de l'auto-configuration, de la capacité du réseau [4], etc. Durant la dernière décennie, plusieurs recherches ont été conduites pour étudier la capacité du réseau qui présente la quantité maximale du trafic que peut écouler le réseau pendant une période de temps. Ainsi, beaucoup de travaux ont montré que les performances du réseau deviennent plus médiocres vis-à-vis l'augmentation de la taille du réseau [5]. Aussi, ils ont signalé l'existence d'un goulot d'étranglement autour de la passerelle<sup>1</sup> qui limite la capacité du réseau. Dans ces genres de problème, un ordonnancement autour de la passerelle est conseillé [6].

C'est dans ce contexte que s'articule notre travail intitulé « Ordonnancement du trafic dans un réseau maillé sans fil ». Ce travail fait partie, d'une part, du projet ARC CARMA<sup>2</sup> (Capacité des Réseaux Maillés) hébergé au laboratoire CITI (Centre d'Innovation en Télécommunications et Intégration de Services) à l'INSA de Lyon. Ce dernier s'intéresse à la capacité des réseaux radio maillés. Il cherche à combiner des approches théoriques complémentaires (bornes déterministes, outils stochastiques, théorie des graphes, etc.) pour développer des méthodes et outils pertinents pour la modélisation et l'évaluation de la capacité fournie par un réseau maillé. Ensuite il vise à optimiser cette capacité pour améliorer le comportement du réseau. D'autre part, ce travail fait partie aussi du projet Mascotte<sup>3</sup> (Méthodes algorithmiques, simulation, combinatoire et optimisation des télécommunications) actuellement hébergé au Centre de recherche INRIA Sophia Antipolis où j'ai passé deux semaines dans le but d'intégrer et de collaborer avec les chercheurs<sup>4</sup> afin de déterminer un ordonnancement optimal pour le tester au sien de simulateur WSNNet [7].

## 1.2 Contributions

Dans ce travail, nous considérons un réseau radio maillé multi-sauts et synchrone, fonctionnant avec un seul canal radio partagé entre tous les points d'accès. Chaque routeur (points d'accès) injecte périodiquement dans le réseau une

1. points d'accès spécifique permettant de collecter et d'envoyer tous les trafics du réseau vers Internet

2. <http://www-sop.inria.fr/mascotte/Contrats/carma>

3. <http://www.inria.fr/recherche/equipes/mascotte.fr.html>

4. Dr. Hervé Rivano et les doctorants : Cristiana Gomes, Christelle Molle et Patricio Reyes

quantité du trafic qui correspond au trafic agrégé de ses clients mobiles. Nous étudions le cas d'une grille où une passerelle est située au centre pour écouler tous les trafics du réseau vers Internet. Nous voulons étudier l'impact de l'ordonnement du trafic autour de la passerelle sur les performances du réseau. Deux catégories de nœuds sont définies, la première se compose de nœuds situés dans le  $k$ -voisinage de la passerelle et fonctionnant avec un protocole d'accès au médium qui se base sur la technique TDMA, la deuxième catégorie contient tout le reste de nœuds du réseau fonctionnant avec le protocole d'accès au médium CSMA/CA. Nous proposons deux approches principales, la première vise à étudier les performances du réseau face à l'augmentation progressive de nœuds de la première catégorie. La deuxième vise à fixer une région, après avoir déterminé son ordonnancement optimal, ensuite augmenter le nombre de slots alloué dans cette région. Afin de lancer les simulations des scénarios nécessaires, nous avons développé et implémenté au sein du simulateur WSNNet toute une plateforme constitué principalement d'un protocole TDMA adapté pour communiquer avec un nœud utilisant la technique d'accès au médium CSMA/CA et de quelques modules pour le calcul statistique en terme de performance du réseau (capacité du réseau, taux de perte, etc.).

A l'aide de simulations, nous montrons que notre solution permet d'obtenir des performances du réseau (en termes de trafic écoulé, taux de perte, capacité du réseau, etc.) meilleures que celle d'un réseau sans ordonnancement.

### 1.3 Structure du rapport

Ce rapport est organisé comme suit : la section 2 est consacrée à l'état de l'art, où nous passerons en revue les concepts de base des réseaux maillés sans fil ainsi que les résultats fondamentaux des travaux existant étudiant la capacité du réseau. La section 3, décrit la méthodologie du travail où nous détaillerons nos hypothèses, les solutions proposées ainsi que les scénarios à simuler. Nous décrivons par la suite les principales fonctionnalités de protocole TDMA que nous avons implémenté. Nous consacrons la section 5 à l'étude des scénarios de simulation et à l'analyse des résultats. Enfin, la dernière section conclut notre travail et présente les perspectives et les orientations pour la poursuite de ce travail de recherche.

## 2 Etat de l'art

### 2.1 Présentation des réseaux maillés sans fil

Les réseaux maillés sans fil ont connu un succès et une évolution permanents. Grâce à leur utilité, leur faible coût d'installation et de déploiement, ils sont de plus en plus mis en œuvre au sein des réseaux que ce soit à petite ou à grande échelle. Ils permettent de servir un nombre très important de clients mobiles, ce qui les rend favorisés vis-à-vis des réseaux mobiles.

Le réseau maillé sans fil est un réseau radio d'infrastructure basée sur une collaboration distribuée entre les points d'accès. Les communications entre deux points d'accès sont supportées par plusieurs nœuds intermédiaires (multi-sauts) dont le rôle est de relayer l'information d'un point à un autre. Ainsi, certains points d'accès possèdent une fonctionnalité spécifique : ils sont reliés à un réseau

de transport fournissant un accès à Internet. Les clients sont rattachés par un réseau sans fil sur les points d'accès, qui sont de même reliés entre eux par des liaisons sans fil (voir figure 1). On trouve une grande variété des nœuds clients, ils peuvent être un ordinateur portable, PC de bureau, PDA, téléphone IP, lecteur RFID, etc. [1].

Dans notre travail, nous nous sommes plus intéressés aux performances de dor-

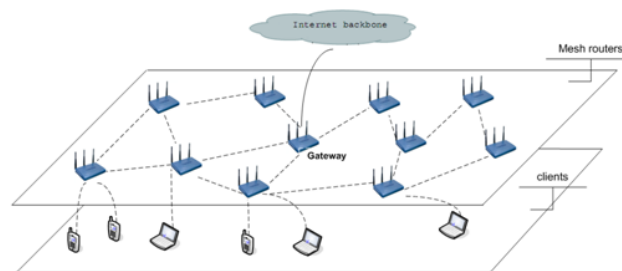


FIGURE 1 – Architecture du réseau maillé sans fil

sale (réseau maillé routeurs) qu'à celles du réseau de clients. La dorsale sans fil est la partie la plus importante du réseau maillé puisqu'elle subit la totalité du trafic des nœuds client. De plus, les routeurs sont immobiles (les points d'accès peuvent être montés sur des supports fixes, murs de bâtiments, etc.), ce qui facilite l'étude de performances du réseau.

## 2.2 Quelques objectifs et applications de réseau maillé sans fil

Les réseaux maillés sans fil sont souvent déployés à petite ou à large échelle pour répondre à plusieurs objectifs. Parmi ces objectifs nous pouvons citer :

- La fourniture d'un accès Internet de service public au moyen de Hot-spots, positionnés en général au centre-ville ou dans les zones commerciales, pour répondre au besoin des usagers.
- Facilite les tâches des agences territoriales : par exemple, relevé de compteurs ou services d'urgence dans le but d'améliorer le service rendu aux citoyens, de réduire des postes de dépenses (factures de téléphone ou d'accès Internet, réduction des déplacements de personnels).
- Connexion des endroits inaccessibles : un réseau maillé sans fil peut être utilisé pour créer des réseaux là où le câblage est difficile à réaliser. Ainsi, on peut interconnecter plusieurs zones inaccessibles entre eux en évitant l'utilisation de câbles.
- Élimination du câblage : ces réseaux peuvent couvrir une zone géographique importante, sans le recours à l'utilisation de câbles. Par exemple, sur un grand campus, on peut installer les points d'accès sur les toits des différents bâtiments afin de servir le maximum des usagers.

## 2.3 Quelques problèmes des réseaux maillés sans fil

Malgré les travaux et les recherches menés sur les réseaux maillés sans fil, plusieurs problèmes restent encore à résoudre. Parmi les facteurs critiques qui

influent sur la performance des réseaux maillés sans fil, nous pouvons citer :

**Passage à l'échelle :** Les protocoles MAC et de routage qui existent ne sont pas assez fiables lors du passage à l'échelle : le débit diminue considérablement avec l'augmentation importante du nombre de nœuds et de sauts dans le réseau. En effet, dans ces conditions, les interférences, les collisions et la concurrence pour l'accès au médium deviennent plus importants, ce qui laisse la mission de ces protocoles plus difficile, surtout pour le partage de ressource. Des problèmes similaires existent avec d'autres protocoles. Par conséquent, plusieurs protocoles qui existent (couche transport, réseau, MAC, et physique) doivent être améliorés ou revus [1].

**Connectivité du réseau :** Afin de garantir une fiable connectivité du réseau, des algorithmes d'auto-organisation et du contrôle de topologie sont nécessaires.

**Qualité de service :** Afin d'assurer une qualité de service acceptable, surtout pour les applications à temps réel (vidéo streaming, voix sur IP, vidéo surveillance, etc.), différentes métriques doivent être considérées par les protocoles de communication à savoir : la gigue, le délai de transmission, le débit par utilisateur, assurer une bonne équité, le taux de perte des paquets, etc.

**Sécurité :** Bien que les efforts et les travaux qui déjà fait dans le domaine de sécurité des réseaux sans fil, ce domaine reste encore ouvert et nécessite plus des recherches pour améliorer et trouver d'autres solutions adaptées aux réseaux maillés sans fil. En effet, les techniques de sécurité qui ont été proposés au cours de ces dernières années pour les réseaux locaux sans fil ne sont pas encore applicables pour les réseaux maillés sans fil. Par exemple, il n'y a pas d'autorité de confiance centralisée pour distribuer les clés publiques dans un réseau maillé sans fil à cause de l'architecture distribuée de système [1].

**Problèmes d'interférence et de collision :** Similairement aux autres réseaux sans fil, la présence d'interférences spatiales entre les communications présente l'un des problèmes majeurs dans les réseaux maillés. En effet, le médium radio est partagé, ce qui signifie que lorsqu'un mobile émet un signal, tous les mobiles dans un même périmètre ne peuvent pas transmettre des données simultanément sans provoquer des interférences à la réception.

## 2.4 Capacité du réseau maillé sans fil

La capacité du réseau fait partie des critères les plus importants dans la qualité de service pour un réseau maillé sans fil. Dans cette partie nous définissons, dans un premier point, la capacité de réseau. Nous passons par la suite à détailler les principaux résultats des travaux existants traitants cette métrique.

### 2.4.1 Définition de la capacité du réseau

Dans notre travail, nous définissons la capacité du réseau comme étant la quantité maximale de trafic que peut écouler un réseau pendant une période de temps. Cette métrique est calculée au niveau de la passerelle et prend en compte tous les paquets de données émis par tous les nœuds du réseau (trafic montant) et qui vont être écoulés vers Internet.

**Résultats des travaux existants :** Durant la dernière décennie, de nombreux travaux ont été conduits pour étudier la capacité des réseaux ad hoc. Ces recherches peuvent être adoptées pour examiner la capacité des réseaux maillés

sans fil.

Les travaux de Kumar et Gupta [5], confirmés par d'autres études [8,9], mettent en lumière le caractère fortement contraint de la capacité des réseaux radio. Ils ont montré que la capacité d'un nœud dans un réseau ad-hoc sans fil aléatoire décroît en  $\frac{1}{\sqrt{n}}$  lorsque la taille du réseau,  $n$ , augmente. À la différence des réseaux ad-hoc, les réseaux maillés sont fixes et possèdent des points d'étranglement, localisés autour des points d'accès, où se concentre le trafic. Par conséquent, la capacité disponible en chaque nœud est réduite à  $1/n$  [4].

Toutefois, la capacité d'un réseau maillé multi-sauts est supérieure à la capacité d'un réseau mono-saut si on tire parti de la réutilisation spatiale et que l'on applique un schéma d'ordonnement des trafics [6]. De plus, même avec un ordonnancement optimal des appels, la capacité du réseau reste limitée à cause d'un goulot d'étranglement autour du point d'accès (passerelle) [6, 10].

Des modélisations en programmation linéaire des réseaux radio maillés ont été développées dans le but de calculer des allocations optimales de ressources et des bornes sur leur capacité. Il apparaît que le facteur majeur dans la valeur de ces bornes est l'existence d'une zone critique, centrée sur les passerelles, et caractérisée par une forte congestion [10, 11]. Une conséquence directe sur le positionnement des passerelles est l'existence d'une contrainte liée à la distance entre ces passerelles pour assurer une capacité maximale.

Tous ces travaux confirment l'existence d'un goulot d'étranglement autour de la passerelle causé par un énorme trafic dans cette région qui entraîne une faible capacité du réseau. Ceci nous a poussés à nous plonger dans l'étude de l'ordonnement et de chercher des résultats qui peuvent aider à l'évaluation et à l'amélioration des performances du réseau maillé sans fil.

D'autres travaux nous ont intéressés qui traitent la problématique de l'ordonnement autour d'un point d'accès. Une étude de problème d'ordonnement des rounds (RSP : Rounds Scheduling Problem) a été mise en œuvre dans [12]. Les auteurs ont étudié le problème de la collecte d'informations dans une grille avec une passerelle au centre pour collecter les données émises par tous les nœuds du réseau. Les auteurs supposent que toutes les portées de communications sont égales à 1 ( $dt=1$ ), la taille de données est constante pour tous les nœuds, et ils ont travaillé avec un modèle d'interférence asymétrique. Dans ce travail, les auteurs cherchent à minimiser le nombre des rounds<sup>5</sup>. Des formules ont été mises en œuvre qui donnent le nombre minimal de rounds en fonction de la distance d'interférence.

Dans [13], les auteurs ont étudié le problème de pondération des rounds<sup>6</sup> (RWP : Round Weighting Problem) dans le cas d'une topologie en grille où la passerelle est située au centre ou au coin de la grille. Les auteurs ont se basé sur un modèle d'interférence symétrique, chaque nœud émet un paquet par période. Leur objectif est la minimisation de la somme totale des poids des rounds afin d'avoir un ordonnancement optimal qui permet de maximiser la capacité du réseau. À partir d'un modèle mathématique, les auteurs ont tiré des formules qui donnent le poids optimal d'un round en fonction de la quantité du trafic total du réseau. Ce travail est très intéressant pour notre travail puisqu'il nous permet de déterminer l'ordonnement optimal autour de la passerelle après avoir adapté les résultats à notre modèle d'interférence.

5. Un round est un ensemble des liens qui ne s'interfèrent pas entre eux

6. déterminer le nombre d'activation d'un round. Donner un poids à un round : définir la durée d'activation des liens appartenant à ce round.

## 2.5 Protocoles d'accès au médium

Nous avons vu, d'après les travaux existants, que les performances du réseau deviennent plus médiocres lorsque la taille du réseau devient de plus en plus importante. Nous avons vu aussi qu'il existe un goulot d'étranglement autour de la passerelle qui limite la capacité du réseau. L'un des éléments les plus déterminants dans la capacité du réseau est le protocole d'accès au médium. Donc, une bonne compréhension de ce protocole est nécessaire. Nous détaillons, dans un premier temps, la technique d'accès au médium CSMA/CA. Nous passons, par la suite, à présenter une autre technique d'accès au médium, TDMA.

### CSMA/CA : Accès Multiple avec Écoute de Porteuses/Évitement de Collisions

Le CSMA/CA est une technique d'accès au médium utilisée dans les réseaux sans fil IEEE 802.11 [14]. Il a été conçu pour s'occuper de la gestion du contrôle d'accès au canal dans le but de limiter les risques de collision entre les paquets de données. Afin d'assurer ce défi, un seul émetteur est autorisé à transmettre dans une zone géographique définie. Pour ce faire, lorsqu'un mobile veut émettre un paquet, il commence par scruter le canal radio afin de déterminer s'il est libre. Si le canal radio est occupé, il remet la transmission à plus tard.

Pour détecter les collisions, le protocole 802.11 impose l'envoi d'un acquittement pour chaque réception d'un paquet de données. En cas de non réception d'un acquittement, le nœud retransmet le paquet. Il faut noter que les acquittements ne sont pas utilisés dans le cas d'une diffusion. Ceci pour éviter les collisions sur les acquittements puisque les nœuds vont envoyer simultanément les acquittements.

Cependant, ce type de mécanisme présente plusieurs défauts. Les principaux problèmes le plus connus sont : problème d'équité, Problème de la station exposée, Problème de la station cachée et Problème de trois paires (voir Annexe ??).

#### 2.5.1 TDMA (Time Division Multiple Access)

TDMA (Time Division Multiple Access) est une technique d'accès au médium permettant de transmettre plusieurs signaux sur un seul canal sans interférence. Cette technique consiste à diviser le temps disponible entre les différents utilisateurs en petits intervalles, appelé slots. Ainsi, chaque utilisateur émet sur des intervalles de temps différents. Il faut noter que dans cette technique il n'y a pas la notion d'écoute du canal, un nœud émet directement si son slot est arrivé. Pour éviter les collisions, une forte synchronisation entre les utilisateurs est obligatoire. Dans la littérature, plusieurs techniques ont été proposées pour maintenir la synchronisation dans un réseau sans fil, on peut citer également le travail [15], où les auteurs ont proposé un algorithme distribué basé sur le consensus entre les nœuds afin d'avoir une synchronisation fine dans un réseau de capteurs.

#### 2.5.2 Protocoles Mac hybride CSMA/TDMA

Dans la littérature, plusieurs recherches ont été intéressées à combiner ces deux techniques d'accès au médium afin de profiter de leurs points forts : la

simplicité de CSMA et son efficacité dans le cas d'un faible trafic et l'utilisation optimale de la bande passante de TDMA dans le cas d'un trafic important. On peut citer par exemple le protocole Z-MAC [16], un protocole d'accès au médium pour les réseaux de capteurs, qui a pour but principal l'optimisation de la consommation de l'énergie en offrant une bonne utilisation de la bande passante. Dans [17], les auteurs proposent un protocole Mac hybride (Funneling-MAC) basé sur l'intégration de TDMA et de CSMA. Dans ce travail, le défi des auteurs est l'amélioration des performances du réseau, en particulier l'augmentation de la bande passante et la minimisation de la consommation d'énergie. Il faut noter que dans ces travaux, l'utilisation de TDMA et CSMA sont combinés dans un seul nœud : un nœud peut utiliser à la fois les fonctionnalités de TDMA et de CSMA. Ce qui n'est pas le cas dans notre travail : nous définissons deux catégories des nœuds, la première se compose des nœuds situés dans le  $k$ -voisinage de la passerelle et fonctionnant avec un protocole d'accès au médium qui se base sur la technique TDMA, la deuxième catégorie contient tout le reste de nœuds du réseau fonctionnant avec le protocole d'accès au médium CSMA/CA. Ainsi, un nœud utilise soit le TDMA, soit le CSMA.

### 3 Méthodologie du travail

Dans cette section, nous passons plus en détails sur toutes les tâches et les approches de notre travail. Nous commençons tout d'abord par présenter les principales hypothèses simplificatrices que nous avons considérées. Ensuite, nous décrivons les approches qu'on va suivre afin de trouver les meilleures performances. Nous passons par la suite à définir les différentes métriques qui nous intéressent. Enfin, nous détaillons la méthode de l'ordonnancement que nous avons utilisée.

#### 3.1 Hypothèses et environnement du travail

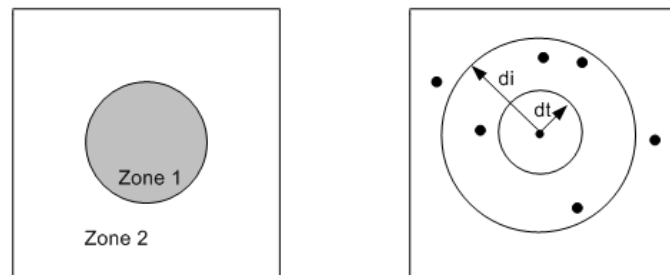
Dans notre travail nous avons considéré un réseau radio maillé synchrone fonctionnant avec un seul canal radio. Nous étudions le cas d'une topologie constituée de 121 nœuds ( $11 \times 11$ ) où une passerelle est située au centre pour écouler tous les trafics du réseau vers Internet. Les demandes dans le réseau étaient réparties uniformément entre les points d'accès : à chaque période, un routeur (points d'accès) injecte dans le réseau une quantité du trafic qui correspond au trafic agrégé de ses clients mobiles. Ce trafic est routé jusqu'à la passerelle par des chemins multi-saut.

Dans toutes nos simulations, nous avons considéré un réseau radio avec une couche physique tenant compte du phénomène d'évanouissement en espace libre. Nous travaillons avec un modèle d'interférence géométrique limité à deux sauts. Nous expliquons ce modèle de propagation en se basant sur la figure 2. On voit également deux zones principales présentées par la figure 2(a), la zone 1 contient les nœuds pour lesquels la communication est parfaite (le SNR est supérieur à un certain seuil de référence). La zone 2 contient au contraire tous les nœuds situés à une distance pour laquelle la réception est nulle (on peut détecter le signal mais on ne peut pas recevoir des paquets). La figure 2(b) illustre l'interférence à 2-sauts. Chaque nœud se situe à une distance inférieure à 2-sauts ( $d_i$  : distance d'interférence) du récepteur perturbe ce dernier. Si la somme de toutes

les interférences dépasse un seuil bien déterminé, alors le récepteur n'arrive pas à comprendre le signal (interférence additive).

Il faut noter qu'il n'y a pas d'interférence entre la communication routeur-routeur et la communication routeur-utilisateur. D'autre manière, le routeur dispose de deux interfaces radio l'une pour communiquer avec les autres routeurs (WIFI) et l'autre pour communiquer avec les utilisateurs.

Il faut noter aussi que les approches et l'ordonnancement qu'on va utiliser sont adaptés avec n'importe quel modèle d'interférence. Nous avons choisi ce modèle d'interférence pour simplifier le travail (détermination des rounds, affectation de nombre de slots, etc.).



(a) Modèle de propagation (zone 1 : portée de communication (signal fort), zone 2 : signal faible).

(b) Modèle d'interférence (dt : distance de transmission, di : distance d'interférence).

FIGURE 2 – Modélisation du canal radio.

### 3.2 Terminologies

Afin de simplifier les expressions utilisées dans ce manuscrit, nous définissons les notations suivantes :

- Zone TDMA/région TDMA : c'est la zone qui contient les nœuds du réseau utilisant la technique TDMA pour l'accès au médium (c'est son les nœuds autour de la passerelle).
- Zone CSMA/région CSMA : c'est la zone qui contient les nœuds du réseau utilisant la technique CSMA/CA pour l'accès au médium.
- Nœud TDMA : c'est un nœud qui utilise la technique TDMA pour l'accès au médium.
- Nœud CSMA : c'est un nœud qui utilise la technique CSMA/CA pour l'accès au médium.
- Niveau : c'est l'ensemble des nœuds qui ont la même distance en termes de nombre de sauts par rapport à la passerelle.
- Taille de la zone TDMA : c'est le nombre de niveaux dans la zone TDMA.
- Nœuds CSMA de la frontière : c'est sont les nœuds aux voisinages des nœuds TDMA.
- Nœuds TDMA de la frontière : c'est sont les nœuds aux voisinages des nœuds CSMA.
- Round : c'est un sous-ensemble de liens qui n'interfèrent pas entre eux. Ainsi, un lien peut être activé au cours de plusieurs intervalles d'une même période (dans plusieurs rounds).

- Poids d'un round : c'est le nombre d'activations d'un round. Il définit la durée d'activation des liens appartenant à ce round.
- $p(v)$  : c'est le poids d'un nœud, i.e, nombre d'activations d'un nœud  $v$ .
- $RG_{i-j}$  : région TDMA composée de «  $i$  » niveaux avec un poids= $j$  pour les nœuds de la frontière.

La figure 3 illustre ces différentes notions. Chaque carré en trait pointillé est un niveau. Les nœuds colorés en gris constituent la zone TDMA, le reste des nœuds (colorés en noir) c'est la zone CSMA.

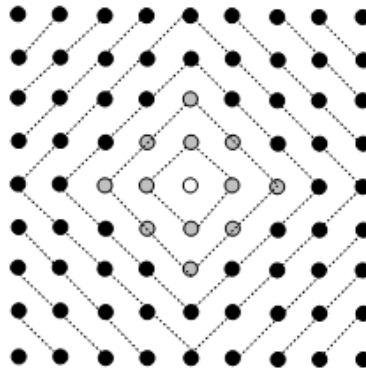


FIGURE 3 – Partition du réseau selon le type des nœuds : noeud gris=TDMA, noeud noir=CSMA.

### 3.3 Les approches proposées

Pour résoudre le problème de goulot d'étranglement autour de la passerelle afin d'améliorer les performances du réseau, nous avons proposé la solution suivante :

Tout d'abord, nous partageons le réseau en deux parties : la première contient les nœuds TDMA autour de la passerelle, la deuxième constitue le reste des nœuds du réseau qui utilise CSMA/CA. À ce niveau, beaucoup de questions que nous pouvons poser. Quelle est la taille de la zone TDMA qui permet d'avoir la bonne performance du réseau ? Est-ce que c'est mieux d'atteindre la zone TDMA sur tout le réseau ? On se pose aussi la question de savoir s'il n'existe pas «  $k$  » tel qu'un TDMA sur le  $k$ -voisinage attend un comportement asymptotique qui ne justifie pas l'utilisation d'un TDMA sur tout le réseau.

Nous avons proposé deux approches pour évaluer et améliorer les performances du réseau. La première vise, tout d'abord, à déterminer l'ordonnancement optimal pour la zone TDMA. Ensuite, augmenter le nombre de slots alloué à cette région afin de donner plus de chance aux nœuds CSMA pour écouler leurs trafics. La deuxième vise à étudier les performances du réseau face à l'augmentation progressive de la taille de la zone TDMA.

Il est évident que le fait d'atteindre la zone TDMA sur tout le réseau permet d'avoir des bonnes performances du réseau (taux de perte nulle, partage équitable de la bande passante, etc.). Mais le problème est que le TDMA sur tout le réseau est très coûteux (en termes de synchronisation de tous les nœuds, affectation des slots...), de plus l'exploitation de la bande passante ne sera pas efficace dans le cas où un nœud n'utilise pas son propre slot. Aussi, dans le cas

de disparition ou apparition d'un nœud dans le réseau il faut mettre à jour tout l'ordonnancement pour qu'il soit optimal. Pour cela, il est préférable d'ordonner la zone où il y a beaucoup de trafic afin de résoudre le problème de goulot d'étranglement (autour de passerelle), et garder le reste de réseau fonctionnant en CSMA, mais on garantissant une qualité de service (un faible taux de perte, une bonne bande passante, etc.) acceptable dans cette zone.

### 3.4 Définition des métriques à calculer

Afin d'évaluer les performances du réseau nous sommes intéressés aux métriques suivantes :

#### Capacité du réseau

Dans notre travail, la capacité du réseau est la quantité des trafics envoyés par tous les nœuds ( $\mathbb{N}$ ) du réseau et écoulé vers Internet à travers toutes les passerelles ( $\mathbb{K}$ ) pendant la durée de simulation. On peut la considérer comme étant la bande passante globale du réseau partagée entre tous les nœuds. Cette métrique représente la quantité maximale de trafic que peut écouler le réseau vers Internet. Une capacité plus importante du réseau permet d'offrir une meilleure qualité de service à un plus grand nombre d'utilisateurs.

Cette métrique est calculée de la façon suivante :

$$C_{\text{reseau}} = \frac{\sum_{k \in \mathbb{K}} \sum_{n \in \mathbb{N}} |\text{Paquets\_recus}(n \rightarrow k)|}{\text{Duree\_Simulation}}$$

Cette métrique ne permet pas d'illustrer l'équité du partage de la bande passante. Une vision plus détaillée est nécessaire pour prendre en compte la bande passante allouée à chaque flux.

#### Capacité du flux (pour chaque nœud)

La capacité de flux est la somme de tous les trafics émis par un nœud et reçus par les passerelles pendant la durée de simulation. Cette métrique permet d'étudier le problème d'équité du partage de la bande passante entre les flux. Ceci est un élément important pour un opérateur qui veut garantir une qualité de service acceptable à chaque nœud individuellement.

Cette métrique est calculée de la façon suivante :

$$C_{\text{flux}(n)} = \frac{\sum_{k \in \mathbb{K}} |\text{Paquets\_recus}(n \rightarrow k)|}{\text{Duree\_Simulation}}$$

Ces deux métriques sont complémentaires, pour mesurer les performances du réseau, puisque l'une donne une vision globale du réseau et l'autre donne une vue détaillée.

#### Taux de perte par nœud

Cette métrique est calculée pour chaque nœud dans le réseau, elle illustre le nombre de paquets perdu par collision ou à cause de l'interférence dans chaque lien. Ceci nous permet de déterminer la région délicate dans le réseau. Ceci est

calculé de la façon suivante :

Taux de perte =  $100 \times (1 - \text{nombre de paquets reçus} / \text{nombre de paquets émis})$ .

D'autres métriques sont ajoutées telles que le nombre de paquets envoyés/reçus par nœud, nombre de paquets traversant chaque lien, capacité de lien, etc. Ces métriques sont intéressantes dans le cas où nous voulons savoir des informations plus détaillées dans le réseau. Ils servent à trouver des explications des résultats de simulations par exemple.

### 3.5 Ordonnancement optimal

En considérant un réseau synchrone, nous cherchons à avoir un ordonnancement optimal en se basant sur le problème du « round weighting » où chaque sous-ensemble de communications (liens) compatibles, appelé round, doit être activé pendant une durée de temps bien déterminée. L'objectif étant de minimiser la somme des poids des rounds. Ceci se traduit par un ordonnancement des communications qui nous garantie d'écouler «  $p(v)$  » paquets par chaque nœud «  $v$  » dans le réseau pendant un minimum de durée possible (période  $T$ ). En minimisant l'amplitude de la période, le trafic de chaque nœud est ainsi transporté à un débit maximal «  $p(v)/T$  ».

Afin de respecter les contraintes d'interférences, les liens pouvant activés ensemble doivent être deux à deux sans interférence. Pour ce faire, les communications doivent être ordonnancées dans le temps. Une période est découpée en intervalles et chaque intervalle est ensuite alloué à un round.

La définition des rounds et la détermination des poids optimaux se sont basés sur les résultats proposés par le modèle linéaire présenté dans [11]. Il utilise un modèle d'interférence symétrique, ça veut dire, un lien interfère tous les liens à une distance «  $d$  ». Nous avons adopté ce résultat dans notre modèle d'interférence sans grands changements vu que la région TDMA significative est très restreinte pour une grille [13].

Ce modèle prend en entrée le graphe de liens, le graphe de conflit qui représente les liens interférant, et la bande passante requise pour chaque nœud. En sortie, nous obtenons les poids pour chaque lien qui représente sa bande passante. En parallèle, nous devons trouver l'ensemble des rounds avec leur poids qui satisfassent au besoin de chaque nœud en termes de bande passante.

Pour mieux comprendre, nous donnons un exemple simple illustré par la figure 4. Dans cet exemple tous les nœuds (1, 2, 3 et 4) envoient périodiquement un paquet vers la passerelle ( $p$ ). Comme illustre la figure seulement les nœuds 1 et 4 peuvent envoyer en même temps (interférence géométrique à 2-sauts). Après avoir déterminé les nœuds qui peuvent communiquer en même temps on peut construire tous les rounds, pour notre exemple, nous avons les rounds suivants :  $R1 = 4, 1$ ,  $R2 = 2$  et  $R3 = 3$ . Pour la détermination des poids, il faut déterminer, tout d'abord, pour chaque nœud le nombre d'activations minimal pour écouler son propre paquet et tous les paquets des nœuds qui le précèdent (contrainte de conservation du flux). Pour notre exemple, nous avons les poids suivants :  $W(R1) = 1$ ,  $W(R2) = 2$ ,  $W(R3) = 3$ . Donc pour écouler un paquet pour chaque nœud vers la passerelle il nous faut 6 slots. Enfin, on peut donner par exemple les numéros de slots suivants ;  $R1 = [1]$ ,  $R2 = [2,3]$ ,  $R3 = [4, 5, 6]$ .

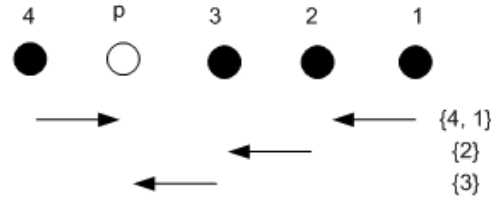


FIGURE 4 – Exemple d’ordonnancement avec 4 nœuds et une passerelle.

### 3.5.1 Solution optimale pour le cas de 24 nœuds autour de la passerelle

Dans cette partie nous voulons déterminer l’ordonnancement optimal pour un réseau constitué de 24 nœuds autour d’une passerelle. Ceci est très important pour la progression de notre travail. En effet, après avoir déterminé cet ordonnancement il suffit d’ajouter le reste des nœuds CSMA. Nous avons choisi cette zone de trois niveaux (24 nœuds) autour de la passerelle, parce qu’elle a une caractéristique spécifique du fait qu’à partir d’elle, les nœuds à un saut de la passerelle ne seront pas perturbés si on ajoute des nœuds CSMA.

La figure 5 illustre l’ordonnancement de cette région. Les « ri » inscrits sur les liens sont les rounds auxquels les liens appartiennent. On voit également que la majorité des liens appartiennent à plus qu’un round. Avec cet ordonnancement nous avons utilisé seulement 6 couleurs (pour la coloration du graphe) et nous avons obtenu 13 rounds. Les poids optimaux pour écouler un paquet émis par chaque nœud pendant une période T sont le suivant :

- $W(r1) = W(r3) = W(r4) = 4$
- $W(r2) = W(r5) = 5$
- $W(r7) = W(r8) = W(r9) = W(r10) = W(r6) = W(r11) = W(r12) = W(r13) = 1$

Au total nous obtenons 30 slots sachant que pendant un slot un nœud peut émettre un seul paquet. Donc la période minimale pour écouler un seul paquet par nœud est égale à 30 slots. Cet ordonnancement est optimal puisqu’il est obtenu à partir de modèle linéaire (solution de programme linéaire) présenté dans [11].

Avec ce réseau de trois niveaux autour de la passerelle et avec cet ordonnancement, nous avons obtenu une bonne capacité du réseau, une capacité de flux équitable pour tous les nœuds et un taux de perte nul.

## 4 Problématiques rencontrés et quelques solutions envisageables

Lors de l’ajout des nœuds CSMA autour de la zone TDMA, un certain nombre de problèmes se posent qui est lié à l’interconnexion entre ces deux catégories de nœuds : l’un, est bien ordonné est synchronisé (zone TDMA) et l’autre qui a un aspect aléatoire (zone CSMA). Dans cette section, nous mettons en œuvre les principaux problèmes et nous citons quelques solutions envisageables.

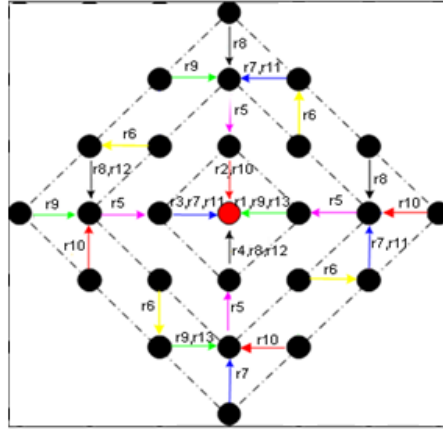


FIGURE 5 – Ordonnancement optimal pour les trois niveaux autour du point d'accès.

Ensuite, nous passons à l'exploitation des principales fonctionnalités du protocole TDMA que nous avons implémentées au sein du simulateur WSNNet [7].

#### 4.1 Problème d'ordonnancement

Après avoir déterminé la solution optimale pour la zone de trois niveaux, nous passons à l'étude de la grille de taille 11x11, en ajoutant les nœuds CSMA autour de cette zone. Le problème que l'ordonnancement que nous avons fait ne sera pas optimal avec cette nouvelle taille de grille. Le nombre de slots que nous avons trouvé ne peut servir que cette région (zone TDMA), il ne peut pas écouler tout le trafic émis par tous les nœuds du réseau. Pour résoudre ce problème, nous avons proposé deux solutions : la première, est basée sur l'augmentation du nombre des slots alloués à la zone TDMA. Ceci permet de donner plus de temps pour les nœuds CSMA pour passer leurs trafics dans la zone TDMA et par suite vers la passerelle.

La deuxième solution consiste à augmenter la taille de la zone TDMA autour du point d'accès en calculant à chaque fois la solution optimale jusqu'à atteindre des performances du réseau acceptables. Le fait d'augmenter la zone TDMA, augmente en premier lieu la frontière et donc ça sera plus facile pour les nœuds CSMA de passer plus de trafic. En deuxième lieu, l'interférence sur la zone TDMA sera plus faible.

#### 4.2 Problème de la frontière

La majeure difficulté est située à la frontière, là où deux catégories de nœuds différentes doivent communiquer ensemble sachant que chacun d'eux a son principe de communication : un nœud TDMA ne peut émettre que dans ses propres slots, l'autre (nœud CSMA) utilise le mécanisme RTS/CTS pour entrer en communication avec un autre nœud. Si un nœud CSMA ne reçoit pas un paquet CTS pendant la durée de Timeout après son émission d'un paquet RTS, il réémet un autre paquet RTS. Ainsi, il faut noter que la durée de timeout est très faible par rapport au temps d'inter slots d'un nœud TDMA. Pour cela, la

probabilité qu'un nœud TDMA réponde sur le RTS dans le bon temps est très faible, puisqu'il est obligé d'attendre son slot pour envoyer un paquet. Afin de résoudre ce problème, nous avons proposé deux solutions :

- Comme première solution nous proposons d'augmenter le timeout pour les nœuds CSMA de la frontière. Ceci donne plus de temps aux nœuds TDMA pour répondre par des paquets CTS ou Ack. De plus, on peut exploiter les slots alloués aux nœuds TDMA autour de la passerelle pour envoyer les CTS et les acquittements. Ceci est possible parce que les liens sortants (d'un nœud TDMA vers un nœud CSMA) n'interfèrent pas avec les liens autour de la passerelle.
- La deuxième proposition est d'éliminer le RTS/CTS à la frontière. L'avantage de cette solution est que nous pouvons gagner de la bande passante en évitant l'envoi de RTS et de CTS, par suite on peut envoyer plus de paquets de données. Dans le cas d'une collision, le paquet sera réémis une autre fois.

Ces deux propositions seront testées et comparées, après les avoir implémentées. Il faut noter aussi que le format d'un paquet de données émis par un nœud CSMA n'est pas la même que celle émise par un nœud TDMA (puisque l'entête de la couche MAC est différent). Pour résoudre ce problème, un nœud TDMA doit détruire le paquet reçu de la part d'un nœud CSMA après avoir construit un autre paquet avec son propre format en copiant toutes les informations nécessaires.

### 4.3 Implémentation de protocole TDMA

Avant de passer à la phase simulation, nous avons développé et implémenté quelques modules nécessaires pour notre travail au sein du simulateur WSNet. En effet, ce dernier ne contient pas un protocole TDMA qui est indispensable pour notre travail, de plus c'est nous qui devons agir sur la plupart des modules existants pour ajouter et implémenter des fonctionnalités afin d'extraire des statistiques en terme de performance du réseau. Nous détaillons, dans cette partie, les principales fonctionnalités du protocole TDMA que nous avons développées. Différentes versions ont été développées, nous présentons dans cette partie seulement les deux versions qui diffèrent au niveau de la méthode utilisée pour communiquer avec le protocole CSMA (utilisation ou non de mécanisme RTS/CTS). La figure 6 présente le diagramme d'états-transitions du protocole TDMA. Ce diagramme est décomposé en quatre parties principales :

- Partie I : lorsque la couche MAC reçoit un paquet de la part de la couche routage, elle l'enregistre dans une file d'attente (réservé que pour les paquets descendant des couches hautes).
- Partie II : lorsque la couche MAC reçoit un paquet RTS, si le nœud est bien la destination, alors il construit un paquet CTS ensuite il l'enregistre dans une file d'attente spécifique pour les CTS et détruit le paquet RTS, sinon (il n'est pas la destination) il détruit le paquet.
- Partie III : si la couche MAC reçoit un paquet de données avec son adresse MAC, alors si le type de ce paquet est TDMA (le nœud source utilise TDMA), il monte le paquet vers la couche routage. Sinon (paquet de type CSMA) il enregistre dans la file d'attente un paquet Ack, construit un nouveau paquet de données de type TDMA et il le monte vers la couche routage.

- Partie IV : cette partie est réservée pour envoyer les paquets selon la version du protocole. La différence entre les deux versions est la suivante : dans le cas de non-utilisation de mécanisme RTS/CTS, les nœuds TDMA de la frontière envoient au démarrage (phase initiale) des paquets hello pour déclarer son présence, par suite les nœuds CSMA désactivent l'utilisation de RTS/CTS. Pour envoyer un paquet de données, un nœud TDMA doit attendre ses slots pour émettre.

Les principales modifications sur le protocole 802.11-DCF que nous avons faites sont :

- Si un nœud CSMA de la frontière reçoit un paquet hello, alors il désactive le mécanisme de RTS/CTS et garde son fonctionnement classique avec les nœuds CSMA.
- Nous avons augmenté le timeout seulement pour les nœuds CSMA de la frontière.

**Remarque :** l'envoi d'un paquet d'Ack, pour chaque réception d'un paquet de données, est obligatoire pour toutes les versions entre les nœuds CSMA-CSMA et CSMA-TDMA. La communication entre TDMA-TDMA ne nécessite pas l'envoi d'un Ack puisque il n'y a pas de collision entre les nœuds TDMA.

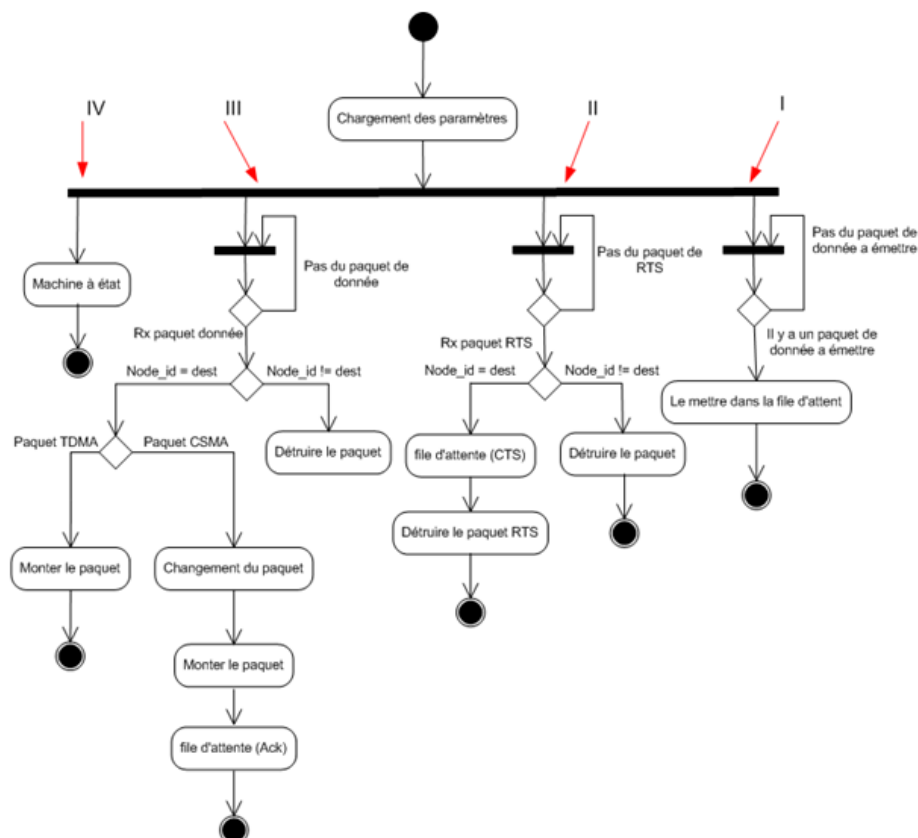


FIGURE 6 – Diagramme d'états-transitions général.

## 5 Etude des performances

Dans cette section, nous étudions les performances du réseau à travers plusieurs scénarios. Tous les résultats des simulations sont faits avec un intervalle de confiance de 95% (chaque simulation est répétée 20 fois). Nous avons utilisé le routage plus court chemin dans la zone CSMA avec des chemins séparés et en essayant de distribuer la charge sur toute la frontière.

### 5.1 Etude des performances dans le cas d'une grille n'utilisant que CSMA/CA

Avant d'attaquer la présentation et les interprétations des résultats de notre solution, nous mettons en lumière les problèmes et les limitations majeurs de l'utilisation de CSMA/CA dans tout le réseau à travers une série de simulations.

#### 5.1.1 Capacité de flux moyenne par niveau et capacité du réseau

La figure 7 illustre la variation de la capacité moyenne de flux par niveau. On voit également un problème d'inégalité importante dans le partage de la bande passante du réseau. Seuls les premiers nœuds (et en particulier le tout premier) utilisent une grande part de la bande passante pour envoyer des paquets, tandis que très peu de paquets de leurs successeurs arrivent à atteindre la passerelle. En effet, les paquets émis par les nœuds le plus loin ont une faible probabilité pour arriver à la passerelle à cause d'une forte interférence et collision tout au long de leur chemin. On voit juste après qu'il existe une grande perte autour de la passerelle, causée par le goulot d'étranglement dans cette région. Ceci entraîne une faible capacité de flux et par la suite une faible capacité du réseau.

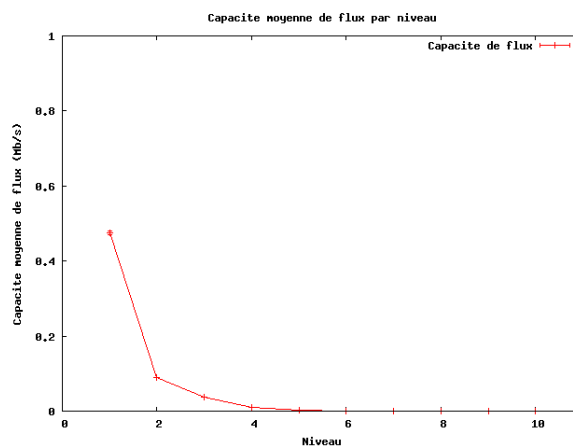


FIGURE 7 – Variation de la capacité moyenne par niveau (tous CSMA).

#### 5.1.2 Taux de perte

La figure 8 présente le taux de perte moyen par niveau. Plus on se rapproche du centre de la grille, plus le taux de perte devient important. Les facteurs majeurs qui ont contribué à cette augmentation du taux de perte sont la

concurrence accentuée entre les nœuds pour l'accès au médium, la collision et l'interférence. En effet, la région autour du point d'accès (deux ou trois premiers niveaux) est caractérisée par une forte densité du trafic émis par tous les nœuds du réseau, qui entraîne un goulot d'étranglement et par suite une forte perte des paquets. Ceci nous pousse à vouloir optimiser finement le comportement du réseau dans la zone centrée autour de la passerelle.

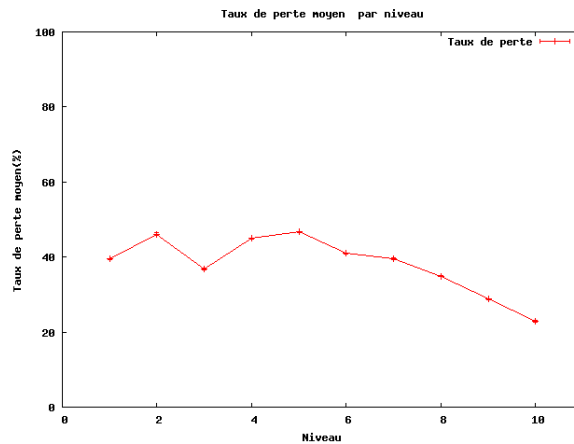


FIGURE 8 – Variation de taux de perte moyen par niveau (tous CSMA).

## 5.2 Comparaison entre l'utilisation et la non utilisation du mécanisme de RTS/CTS

Pour comparer les deux méthodes, il est important de voir deux métriques : le premier est la quantité du trafic émis par les nœuds CSMA de la frontière, c.-à-d. combien nous pouvons émettre en utilisant l'une de deux méthodes. La deuxième, c'est la quantité du trafic reçue par les nœuds TDMA.

Ces deux métriques sont illustrées dans la figure 9. En analysant cette figure, on voit également que l'utilisation du mécanisme RTS/CTS à la frontière a un impact négatif sur la performance du réseau. La quantité du trafic émis et reçu dans le cas de non-utilisation de RTS/CTS est plus importante par rapport à l'autre cas. Autrement, en éliminant le mécanisme de RTS/CTS on arrive à écouler plus de trafic de la zone CSMA vers la zone TDMA, ce qui est notre objectif.

Parmi les facteurs qui ont contribué à cet écart entre les deux approches, on trouve en premier lieu la dégradation de la bande passante dans le cas d'utilisation de mécanisme RTS/CTS. En effet, l'envoi des RTS/CTS consomme plus de bande passante et surtout plus du temps réservé aux nœuds CSMA pour envoyer leurs paquets de données. En deuxième lieu, on trouve l'impact de la durée de la période sur le taux d'émission des nœuds CSMA (de la frontière). En fait, si un paquet RTS est perdu, le nœud reste en attente jusqu'à la fin de la période pour réémettre ce paquet, et avec l'augmentation de la durée de la période un nœud de la frontière passe beaucoup de temps en attente.

Le temps entre l'envoi d'un RTS et la réception du CTS peut atteindre la durée de la période dans le cas où un nœud CSMA émet son paquet RTS juste

après la fin du slot de nœud TDMA. Tous ces facteurs entraînent un faible taux d'émission de paquets de données au niveau des nœuds CSMA de la frontière. Les RTS/CTS semblent donc dans ce contexte avoir un contre-effet et être particulièrement dommageables. Pour cela, nous avons choisi de travailler sans mécanisme RTS/CTS à la frontière dans le reste de nos travaux.

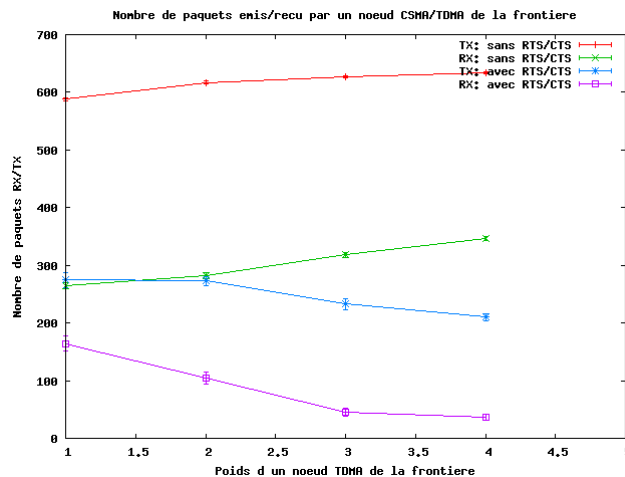


FIGURE 9 – Variation du nombre de paquets émis vers (respectivement reçu par) un nœud TDMA de la frontière en fonction de l'augmentation des poids dans le cas avec/sans RTS/CTS (avec RG3-1).

### 5.3 Etude des performances : augmentation des poids dans la région TDMA

Dans cette partie, nous voulons étudier l'impact de l'augmentation du nombre de slots de la zone TDMA sur les performances du réseau. Nous partons avec un ordonnancement de la zone TDMA, constituée de 24 nœuds autour du point d'accès. Nous augmentons à chaque fois le poids de chaque nœud TDMA de la frontière pour écouler plus de trafic envoyé par les nœuds de la région CSMA.

#### 5.3.1 Variation de la capacité du réseau

La variation de la capacité du réseau en fonction de l'augmentation des poids dans la région TDMA est présentée sur la figure 10. On voit également que la capacité du réseau diminue progressivement en augmentant les poids dans la zone TDMA. Le facteur majeur de cette décroissance est la perte de trafic au niveau des nœuds TDMA causée essentiellement par la perturbation des nœuds CSMA. En effet, si un paquet émis par un nœud TDMA subit une collision alors tous les slots de ses successeurs (qui ont été réservés pour acheminer ce paquet) seront non exploités. Ceci diminue le nombre de paquets reçus au niveau de la passerelle. Avec l'augmentation des poids dans la zone TDMA, la quantité des slots non exploitables augmente, ce qui explique la pente négative de la courbe.

Il faut signaler que si on arrive à éliminer les perturbations des nœuds CSMA sur les nœuds TDMA, la capacité du réseau sera constante en augmentant les poids dans la zone TDMA. Par exemple, on peut utiliser deux interfaces réseau différentes (deux fréquences) à la frontière, une pour la communication CSMA-TDMA et l'autre pour TDMA-TDMA.

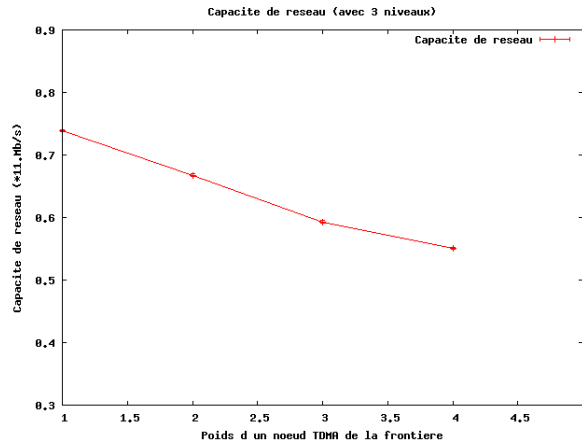


FIGURE 10 – Variation de la capacité du réseau en fonction de l'augmentation des poids à la frontière (de RG3-1 à RG3-4).

### 5.3.2 Taux de perte

Pour évaluer le taux de perte dans le réseau, nous avons tracé dans un premier temps une courbe qui exprime la variation de taux de perte moyen par niveau en fonction de l'augmentation du nombre de poids dans la région TDMA (voir figure 11). En premier lieu, on remarque que la majorité de pertes est située à la frontière, bien que dans la zone TDMA nous avons obtenu une faible perte et un peu de plus dans la zone CSMA. En fait, le trafic autour de la zone de la frontière est très important puisque tous les trafics émis par les nœuds CSMA passent à travers cette région et avec CSMA on va avoir beaucoup de collisions et donc de perte des paquets. Si on ajoute à ce facteur, le problème dû à la non-utilisation de mécanisme de RTS/CTS à la frontière (problème de nœud caché...), le taux de perte sera beaucoup plus important.

En deuxième lieu, on peut remarquer à travers cette figure que le taux de perte dans la zone CSMA et à la frontière a été diminué en augmentant les poids dans la zone TDMA. En fait, à chaque fois qu'on augmente les poids, la période augmente avec et par la suite le taux d'émission diminue ce qui diminue un peu la charge dans la zone CSMA et donc atténue les phénomènes de collision. Bien que le taux de perte dans la zone TDMA reste indépendant de la période, il ne dépend que de l'interférence des nœuds de la frontière. Un facteur qui explique la diminution du taux de perte à la frontière est le fait qu'à chaque augmentation des poids, les nœuds CSMA de la frontière trouvent plus de temps pour envoyer leurs trafics sans avoir de collision ou d'interférence avec les nœuds TDMA.

La figure 12 montre deux points intéressants : la première est qu'en augmentant le nombre de slots, les nœuds CSMA de la frontière trouvent plus de temps pour

émettre leurs trafics et par suite la quantité du trafic reçu par la zone TDMA devient de plus en plus importante. Ceci augmente la capacité de flux pour les nœuds dans la zone CSMA (voir figure 13). Concernant le deuxième point, en analysant la croissance de deux courbes, on voit bien que la pente de la courbe verte (RX) est plus grande que celle de la courbe rouge (TX) ce qui montre la décroissance de taux de perte à la frontière.

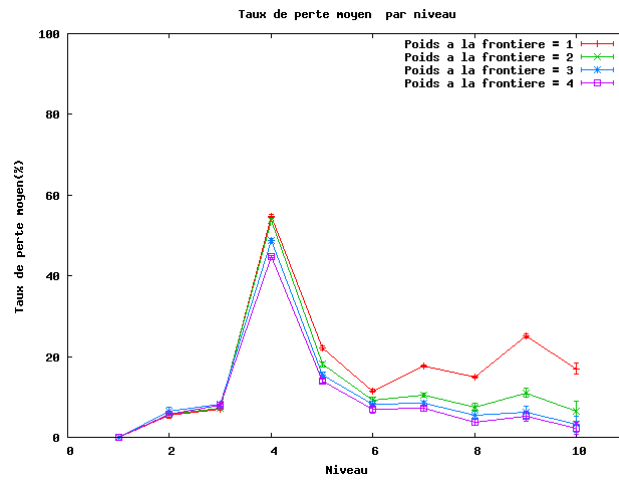


FIGURE 11 – Variation de taux moyen de perte par niveau en fonction de l'augmentation des poids à la frontière (de RG3-1 à RG3-4).

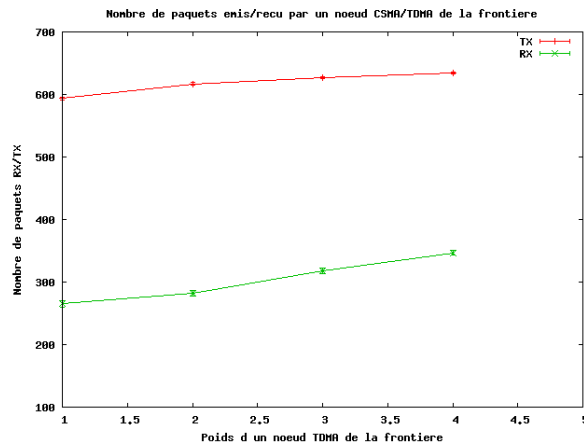


FIGURE 12 – Variation du nombre de paquets émis vers (respectivement reçus par) la frontière par nœud en fonction de l'augmentation des poids (de RG3-1 à RG3-4).

### 5.3.3 Capacité moyenne de flux par niveau

La figure 13, illustre la variation de la capacité moyenne de flux par niveau en augmentant à chaque fois le nombre de slots dans la région TDMA afin de donner plus de chance aux trafics des nœuds CSMA pour atteindre la passerelle. Ceci diminue la capacité de flux pour les nœuds TDMA puisque la période va augmenter et par suite la fréquence d'émission des paquets de données diminue (voir figure 13, niveau 1 à niveau 3). En contrepartie, nous constatons une faible amélioration de la capacité de flux pour la région CSMA. En fait, la quantité de nœuds TDMA est très faible par rapport à celle de CSMA, c'est qui explique pourquoi la décroissance dans la zone TDMA est plus grande que la croissance de la capacité de flux dans la zone CSMA. Un nœud TDMA va perdre de sa capacité pour la partager entre plusieurs nœuds CSMA. On peut remarquer aussi que les nœuds CSMA de la frontière sont ceux qui profitent le plus de cette augmentation du nombre des slots, puisqu'ils sont les plus proches de la zone TDMA.

À noter que le problème de collision et d'interférence dans la zone CSMA reste une contrainte qui limite la capacité de flux de certains nœuds puisque la probabilité qu'un paquet émis par un nœud CSMA situé à l'extrémité de la grille (une grande distance, en termes de nombre de sauts, par rapport au Gateway) est plus faible que celle d'un nœud plus proche de la passerelle.

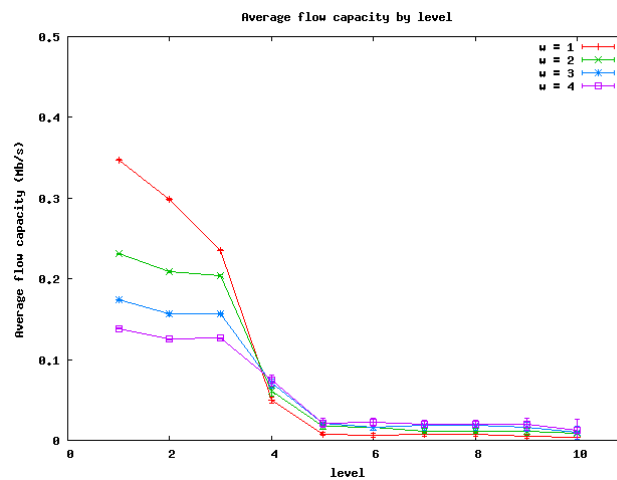


FIGURE 13 – Variation de la capacité moyenne par niveau en fonction de l'augmentation des poids (de RG3-1 à RG3-4).

### 5.3.4 Synthèse

D'après tous les résultats que nous avons trouvés, on voit également qu'on peut améliorer les performances du réseau en augmentant les poids de la région TDMA. Mais il s'avère que la région TDMA avec trois niveaux est incapable de servir tout le réseau : la capacité de flux reste faible pour les nœuds CSMA malgré le fait que la capacité du réseau soit acceptable. Ceci s'explique par le fait que le nombre de nœuds TDMA est très faible par rapport à celle de CSMA,

et donc un nœud TDMA paye beaucoup de sa propre capacité pour augmenter la capacité des nœuds CSMA. Pour cela, nous pensons qu'on peut faire mieux si la région TDMA est plus grande.

## 5.4 Etude des performances : augmentation de la région TDMA

Dans cette partie, nous voulons étudier l'impact de l'augmentation de la zone TDMA sur les performances du réseau. Nous commençons par un scénario où tous les nœuds du réseau n'utilisent que le CSMA/CA, et nous passons par la suite à d'autres scénarios en augmentant progressivement la zone TDMA d'un niveau.

Il faut rappeler que pour ces scénarios, le nombre des slots alloués sont le nombre optimal pour servir les nœuds de la zone TDMA (poids=1 pour les nœuds TDMA de la frontière, indépendamment des nœuds CSMA). Exclusivement, nous avons pris en compte les nœuds CSMA du deuxième niveau, dans le calcul du nombre de slots, dans le cas de RG1 (région TDMA constituée d'un seul niveau). Ceci, c'est pour donner au moins un peu de temps pour les nœuds CSMA pour émettre, sinon ils restent toujours bloqués.

### 5.4.1 Capacité du réseau

Il est évident que l'augmentation de la zone TDMA influe sur la capacité du réseau. Mais ce qu'on veut savoir est, à quel niveau on doit ordonner le trafic autour de la passerelle, pour avoir un maximum de capacité. Il faut noter que les nœuds les plus importants à ordonner pour augmenter la capacité du réseau sont les nœuds autour de la passerelle. Ces derniers écoulent tous les trafics du réseau, donc il est impératif de ne les pas gêner. Pour cela, il faut aussi ordonner tous les nœuds qui peuvent les perturber. Puisque nous travaillons avec un modèle d'interférence de deux sauts, pour avoir une bonne capacité du réseau, il faut ordonner au moins les trois niveaux autour de la passerelle. Si on ordonne plus que trois niveaux, on aura seulement une petite amélioration de la capacité du réseau causée par la diminution du taux de perte sur le niveau trois. Ceci est confirmé par la figure 14 qui illustre la variation de la capacité du réseau en fonction de l'augmentation de la profondeur de la zone TDMA. On voit également que lorsqu'on augmente la zone TDMA d'un et de deux niveaux, la capacité du réseau augmente d'une façon remarquable, ensuite à partir du niveau trois elle a tendance à être constante.

Il faut constater que le fait d'avoir une capacité du réseau acceptable à partir de niveau trois ne veut pas dire qu'on a des bonnes performances du réseau, mais il faut aussi voir les autres métriques telles que la capacité de flux et le taux de pertes qui restent toujours lié à la taille de la zone TDMA.

### 5.4.2 Capacité moyenne de flux par niveau

Dans cette partie, nous détaillons l'influence de l'augmentation de la zone TDMA sur la capacité de flux. Tout d'abord, il est important de mentionner que la capacité de flux est très liée à l'ordonnement dans un réseau et au nombre

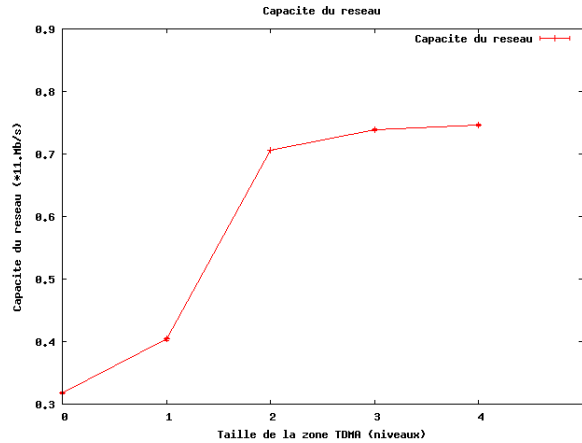


FIGURE 14 – Variation de la capacité du réseau en fonction de la taille de la région TDMA (de RG0-1 à RG4-1).

de slots alloués à chaque nœud. La figure 15 illustre la variation de la capacité moyenne de flux par niveau en fonction de l'augmentation de la zone TDMA. Nous remarquons, tout d'abord, qu'en augmentant la région d'ordonnancement le nombre de nœuds qui profitent de la bande passante augmente. De plus, la capacité de flux dans la région TDMA a tendance à être équitable et c'est bien les nœuds de cette région qui profitent au maximum de la capacité du réseau. Ceci est parce que nous n'avons pas alloué assez de slots pour écouler le trafic de tout le réseau, mais nous avons donné le nombre de slots optimal pour ne servir que la zone TDMA. A cet effet, il est intéressant de combiner les deux solutions à la fois : augmenter la zone TDMA et les poids dans cette zone. Dans la prochaine partie, nous étudions le cas d'une région TDMA avec quatre niveaux en augmentant les poids dans cette zone.

## 5.5 Etude des performances du réseau dans le cas d'une zone TDMA de 4 niveaux avec augmentations des poids.

Dans cette partie, nous voulons répéter les mêmes scénarios que ceux de la partie 5.3 (augmentation des poids dans la région TDMA) mais cette fois-ci avec une zone TDMA de quatre niveaux. En fait, nous avons aperçu que la région TDMA avec trois niveaux est insuffisante pour avoir une capacité de flux acceptable pour tous les nœuds du réseau, il est donc intéressant d'ajouter un autre niveau.

### 5.5.1 Variation de la capacité du réseau et la capacité du flux

En passant de trois niveaux à quatre niveaux, nous avons vu que les performances du réseau ont été améliorées. Nous avons vu aussi qu'en augmentant les poids dans une région TDMA les performances du réseau s'améliorent. Maintenant en combinant les deux approches, nous avons obtenu les résultats présentés par les figures 16(a) et 16(b). La figure 16(a) illustre la variation de la capacité

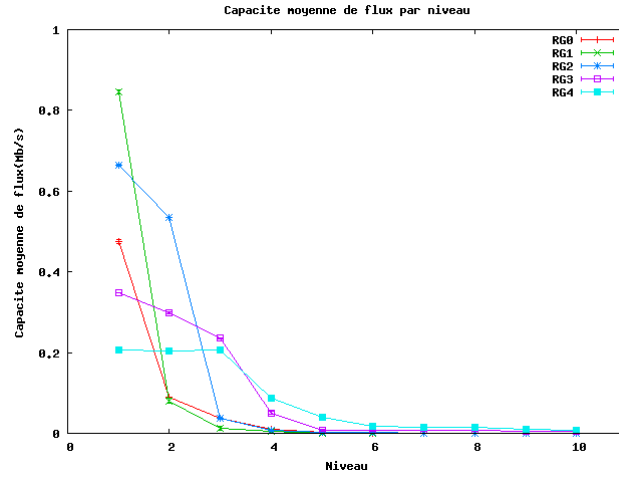


FIGURE 15 – Variation de la capacité moyenne de flux par niveau en fonction de l'augmentation de la zone TDMA (de RG0-1 à RG4-1).

du réseau en fonction de l'augmentation des poids dans la région TDMA. Nous avons obtenu presque les mêmes résultats déjà trouvés avec la région TDMA de trois niveaux. Tandis que la capacité moyenne de flux par niveau présenté par la figure 16(b) a été améliorée. On voit également qu'avec un poids = 4 à la frontière, la capacité de flux pour les nœuds CSMA a été augmentée et que l'écart avec celle des nœuds TDMA a été diminué. Parmi les facteurs qui ont contribué à cet écart, on peut citer également le taux de perte à la frontière qui reste une contrainte qui diminue la capacité de flux pour les nœuds CSMA.

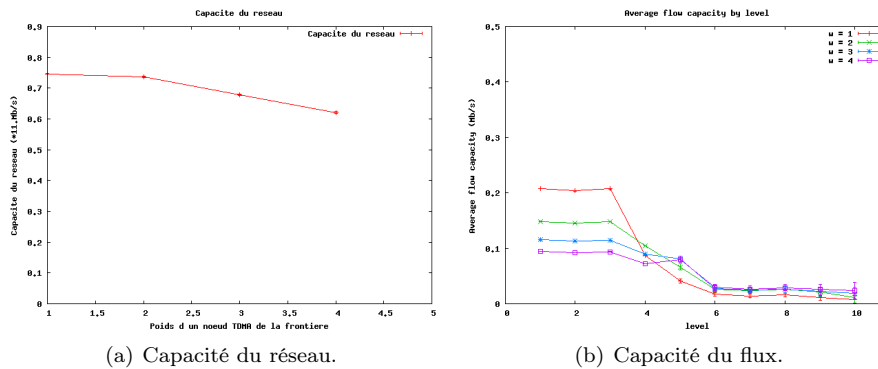


FIGURE 16 – Variation de la capacité du réseau et la capacité moyenne du flux par niveau en fonction de l'augmentation des poids (de RG4-1 à RG4-4).

### 5.5.2 Taux de perte

En analysant la figure 17, on peut remarquer que nous avons trouvé presque les mêmes résultats que ceux dans le cas d'augmentation des poids dans la zone

TDMA avec trois niveaux, mais cette fois-ci le taux de perte a été un peu diminué à cause de la diminution de charge de trafic dans la zone CSMA. Néanmoins, la collision autour de la frontière CSMA-TDMA reste encore le problème majeur.

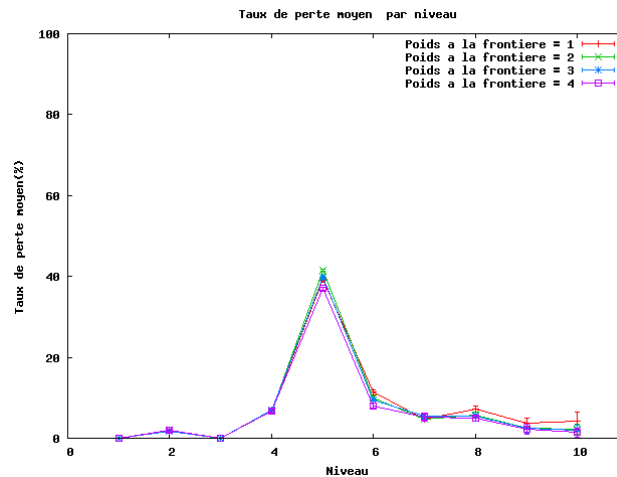


FIGURE 17 – Variation de taux moyen de perte par niveau en fonction de l'augmentation des poids à la frontière (de RG4-1 à RG4-4).

## 5.6 Synthèse des résultats

### 5.6.1 Tout CSMA vs CSMA-TDMA

Dans cette partie, nous voulons comparer les résultats que nous avons obtenus (dans le cas de l'ordonnancement de la région TDMA de quatre niveaux avec un poids= 4, RG4-4), avec les résultats obtenus dans le cas d'un réseau sans ordonnancement (réseau ne fonctionnant qu'avec CSMA).

### 5.6.2 Capacité du flux, taux de perte et capacité du réseau

La figure 18(a), illustre une comparaison entre les résultats de la variation de la capacité de flux obtenus dans le cas où un réseau fonctionne seulement avec CSMA (courbe rouge), CSMA-TDMA (courbe verte) et seulement avec TDMA (courbe bleue). Nous remarquons que le réseau fonctionnant avec CSMA-TDMA présente de meilleures performances par rapport à celle qui fonctionne seulement avec CSMA. Malgré le taux de perte important au niveau 5 (frontière CSMA-TDMA) présenté dans la figure 18(b), la capacité de flux pour chaque nœud du réseau tend vers la courbe optimale (la bande passante est divisée équitablement sur tous les nœuds, tout TDMA). Il faut noter que ces résultats sont améliorables si on évite le taux de perte à la frontière CSMA-TDMA. Nous pouvons ajouter aussi que la capacité du réseau obtenue avec CSMA-TDMA est plus de deux fois supérieure à celle obtenue avec seulement CSMA. Il est important de signaler que la capacité du réseau obtenue dans le cas de CSMA seulement est partagée seulement entre les nœuds autour de la passerelle tandis que pour le cas d'un

réseau utilisant CSMA-TDMA la capacité du réseau est partagée entre tous les nœuds du réseau.

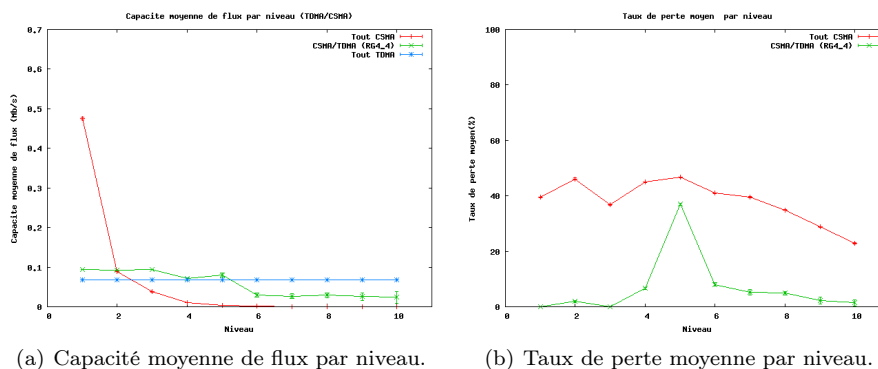


FIGURE 18 – Comparaison de performance entre CSMA-TDMA (RG4-4) et CSMA (RG0).

### 5.6.3 Principaux résultats retenus

Les principaux résultats que nous pouvons retenir de notre travail sont :

- La capacité du réseau est maximale à partir d'un ordonnancement de trois niveaux autour de la passerelle. Il est préférable d'ordonner au moins trois niveaux autour de la passerelle.
- En augmentant les poids dans la région TDMA, la capacité de flux a tendance à être équitable entre les nœuds du réseau.
- En augmentant la zone TDMA, la capacité du réseau augmente puis elle se stabilise à un certain niveau. De plus, la capacité de flux, le taux de perte s'améliorent dans le réseau.
- L'augmentation de la zone TDMA d'un niveau, améliore mieux les performances du réseau que l'augmentation des poids de la zone TDMA. On peut voir ça, en comparant les résultats trouvés entre le passage de RG3 à RG4, et les résultats de RG3 en augmentant le poids (RG3-i,  $i=1, 2, 3, 4$ ).
- Il est important d'intégrer les deux approches pour trouver les performances que nous convenient.
- Une seule passerelle est incapable de servir un nombre important de nœuds (point d'accès) dans le réseau. Ceci est bien clair si on regarde la capacité de flux par nœud dans le cas d'un réseau tout TDMA (figure 18(a)).

## 6 Conclusions et perspectives

Ce travail de master s'inscrit dans le cadre de projet CARMA avec la collaboration du projet Mascotte. L'objectif de ce projet est l'étude de l'ordonnancement autour de la passerelle dans un réseau radio maillé multi-sauts, afin d'améliorer les performances du réseau. Nous avons étudié le cas d'une grille où une passerelle est située au centre de la grille. Nous avons travaillé avec un modèle d'interférence de deux sauts, nous avons adopté quelques hypothèses

simplificatrices telles que les hypothèses du réseau synchrone et de l'envoi périodique des paquets. Après avoir développé les outils nécessaires au sein du simulateur WSNet, tels que : un protocole TDMA adapté pour communiquer avec un nœud qui utilise la technique CSMA/CA, nous avons étudié deux approches principales : l'augmentation du nombre de slots dans une zone TDMA après avoir déterminé son ordonnancement optimal d'une part et l'augmentation de la taille de la région TDMA d'autre part.

À l'aide de la simulation, nous avons montré que l'ordonnancement autour de la passerelle a un grand effet sur les performances du réseau : la capacité du réseau, la capacité de flux et le taux de perte ont été améliorés d'une façon remarquable. À partir d'un ordonnancement de trois niveaux, l'augmentation de la région TDMA n'offre pas une grande amélioration à la capacité du réseau, mais elle reste favorable pour améliorer la capacité de flux et le taux de perte. Nous avons montré aussi que l'augmentation du nombre des slots dans la région TDMA après avoir déterminé son ordonnancement optimal est très intéressante pour améliorer les performances du réseau. Par rapport à un réseau qui utilise le CSMA partout dans le réseau (il n'y a pas d'ordonnancement), l'ordonnancement autour de la passerelle nous a apporté des améliorations pour les performances du réseau.

Notre problème reste toujours lié aux taux de perte à la frontière, si nous éliminons cette contrainte, les performances du réseau seront meilleures. Il serait également intéressant de refaire les mêmes scénarios avec deux interfaces réseau différentes (deux fréquences) à la frontière, une pour la communication CSMA-TDMA et l'autre pour TDMA-TDMA.

Vu qu'une seule passerelle reste toujours incapable de servir un nombre très important de nœuds dans le réseau (la capacité de flux par nœud est faible), nous proposons d'étudier le cas d'un réseau avec  $k$ -passerelles en gardant l'ordonnancement autour de chaque passerelle. Nous déterminerons le nombre de passerelles optimal ainsi que leurs emplacements afin d'avoir les meilleures performances. Dans notre travail, nous avons étudié seulement la topologie en grille, ça serait intéressant si nous étendons notre étude aussi pour les topologies aléatoires.

## Références

- [1] Ian F. Akyildiz and Xudong Wang. A survey on wireless mesh networks. *IEEE Radio Communications*, 43 :S23 – S30, September 2005.
- [2] B. Zill R. Draves, J. Padhye. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks. In *MobiCom '04 : Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages pp. 114–128, 2004.
- [3] Hervé Rivano, Fabrice Théoleyre, and Fabrice Valois. Capacity evaluation framework and validation of self-organized routing schemes. *International Workshop on Wireless Ad Hoc and Sensor Networks (IWVAN)*, New York, USA, June 2006.
- [4] J. Jun and M. L. Sichitiu. The nominal capacity of wireless mesh networks. *IEEE Wireless Communications*, vol. 10, no 5 :p. 8–14, October 2003.
- [5] P. Gupta and P. R. Kumar. The capacity of wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 46 :388–404, March 2000.

- [6] A. Girard, C. Rosenberg, and J. Luo. Engineering wireless mesh networks. In *Proc. 19th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'08)*, Cannes, France, September 2008.
- [7] E. B. Hamida, G. Chelius, and J. M. Gorce. Scalable versus accurate physical layer modeling in wireless network simulations. *22nd ACM/IEEE/SCS Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation*, Italy, June 2008.
- [8] G. Méheut, S. Pérennes, and H. Rivano. Evaluation stochastique et simulation des réseaux radio. *Research report n°5989*, 2006, INRIA.
- [9] D. Tse M. Franceschetti, O. Dousse and P. Tiran. Closing the gap in the capacity of random wireless networks. *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, Chicago, June-July 2004.
- [10] C. Molle, F. Peix, S. Pérennes, and H. Rivano. Optimal routing and call scheduling in wireless mesh networks with localized information. In *C. Kaklamani and F. Nielson, editors, the fourth Symposium on Trustworthy Global Computing (TGC 2008)*, volume 5474 of LNCS :pages 171–185, Barcelona, Spain, November 2008.
- [11] C. Gomes, S. Pérennes, and H. Rivano. Bottleneck analysis for routing and call scheduling in multi-hop wireless networks. In *4th IEEE Workshop on Broadband Wireless Access (BWA)*, New Orleans, US, December 2008.
- [12] J.-C. Bermond and J. Peters. Efficient gathering in radio grids with interference. In *Septièmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications (AlgoTel'05)*, page pages 103–106, Presqu'île de Giens, May 2005.
- [13] C. Gomes, S. Pérennes, P. Reyes, and H. Rivano. Bandwidth allocation in radio grid networks. *10èmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques de Télécommunications (Algo Tel'08)*, may 2008.
- [14] IEEE Std. 802.11-1999. Part 11 : Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. *IEEE Std. 802.11*, 1999.
- [15] N. Marechal, J.-B. Pierrot, and J.-M. Gorce. Consensus de moyenne pour la synchronisation fine d'horloges dans les réseaux de capteurs sans-fil. *Journées Doctorales en Informatique et Réseaux 2009*, Janvier 2008.
- [16] Rhee, A. Warrier, M. Aia, and J. Min. Zmac : a hybrid mac for wireless sensor networks. *ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys), San Diego (USA)*, pages pp 90–101, 2005.
- [17] G.-S. Ahn, E. Miluzzo, A. T. Campbell, S. G. Hong, and F. Cuomo. Funneling-mac : A localized, sink-oriented mac for boosting fidelity in sensor networks. *Proc. of 4th ACM Conference on Embedded Networked Sensor System, SenSys 2006*, Boulder, Colorado, USA, November 2006,.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>3</b>
1.1	Contexte et problématique . . . . .	3
1.2	Contributions . . . . .	3
1.3	Structure du rapport . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Etat de l'art</b>	<b>4</b>
2.1	Présentation des réseaux maillés sans fil . . . . .	4
2.2	Quelques objectifs et applications de réseau maillé sans fil . . . . .	5
2.3	Quelques problèmes des réseaux maillés sans fil . . . . .	5
2.4	Capacité du réseau maillé sans fil . . . . .	6
2.4.1	Définition de la capacité du réseau . . . . .	6
2.5	Protocoles d'accès au médium . . . . .	8
2.5.1	TDMA (Time Division Multiple Access) . . . . .	8
2.5.2	Protocoles Mac hybride CSMA/TDMA . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Méthodologie du travail</b>	<b>9</b>
3.1	Hypothèses et environnement du travail . . . . .	9
3.2	Terminologies . . . . .	10
3.3	Les approches proposées . . . . .	11
3.4	Définition des métriques à calculer . . . . .	12
3.5	Ordonnancement optimal . . . . .	13
3.5.1	Solution optimale pour le cas de 24 nœuds autour de la passerelle . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Problématiques rencontrés et quelques solutions envisageables</b>	<b>14</b>
4.1	Problème d'ordonnancement . . . . .	15
4.2	Problème de la frontière . . . . .	15
4.3	Implémentation de protocole TDMA . . . . .	16
<b>5</b>	<b>Etude des performances</b>	<b>18</b>
5.1	Etude des performances dans le cas d'une grille n'utilisant que CSMA/CA . . . . .	18
5.1.1	Capacité de flux moyenne par niveau et capacité du réseau	18
5.1.2	Taux de perte . . . . .	18
5.2	Comparaison entre l'utilisation et la non utilisation du mécanisme de RTS/CTS . . . . .	19
5.3	Etude des performances : augmentation des poids dans la région TDMA . . . . .	20
5.3.1	Variation de la capacité du réseau . . . . .	20
5.3.2	Taux de perte . . . . .	21
5.3.3	Capacité moyenne de flux par niveau . . . . .	23
5.3.4	Synthèse . . . . .	23
5.4	Etude des performances : augmentation de la région TDMA . . . . .	24
5.4.1	Capacité du réseau . . . . .	24
5.4.2	Capacité moyenne de flux par niveau . . . . .	24
5.5	Etude des performances du réseau dans le cas d'une zone TDMA de 4 niveaux avec augmentations des poids. . . . .	25
5.5.1	Variation de la capacité du réseau et la capacité du flux . . . . .	25

5.5.2	Taux de perte . . . . .	26
5.6	Synthèse des résultats . . . . .	27
5.6.1	Tout CSMA vs CSMA-TDMA . . . . .	27
5.6.2	Capacité du flux, taux de perte et capacité du réseau . . .	27
5.6.3	Principaux résultats retenus . . . . .	28
<b>6</b>	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>28</b>



---

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

Centre de recherche INRIA Bordeaux – Sud Ouest : Domaine Universitaire - 351, cours de la Libération - 33405 Talence Cedex  
Centre de recherche INRIA Lille – Nord Europe : Parc Scientifique de la Haute Borne - 40, avenue Halley - 59650 Villeneuve d'Ascq  
Centre de recherche INRIA Nancy – Grand Est : LORIA, Technopôle de Nancy-Brabois - Campus scientifique  
615, rue du Jardin Botanique - BP 101 - 54602 Villers-lès-Nancy Cedex  
Centre de recherche INRIA Paris – Rocquencourt : Domaine de Voluceau - Rocquencourt - BP 105 - 78153 Le Chesnay Cedex  
Centre de recherche INRIA Rennes – Bretagne Atlantique : IRISA, Campus universitaire de Beaulieu - 35042 Rennes Cedex  
Centre de recherche INRIA Saclay – Île-de-France : Parc Orsay Université - ZAC des Vignes : 4, rue Jacques Monod - 91893 Orsay Cedex  
Centre de recherche INRIA Sophia Antipolis – Méditerranée : 2004, route des Lucioles - BP 93 - 06902 Sophia Antipolis Cedex

---

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