



HAL
open science

Protocoles coopératifs pour réseaux sans fil

Hicham Slimani

► **To cite this version:**

Hicham Slimani. Protocoles coopératifs pour réseaux sans fil. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2013. Français. NNT: 2013INPT0137 . tel-04327164

HAL Id: tel-04327164

<https://theses.hal.science/tel-04327164>

Submitted on 6 Dec 2023

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.



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :
Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :
Réseaux et Télécommunications / Ekefi _ VèW 3dZ [fVWfgdW

Présentée et soutenue par :
Hicham SLIMANI

le : mardi 12 novembre 2013

Titre :

Protocoles coopératifs pour réseaux sans fil

Ecole doctorale :
Mathématiques Informatique Télécommunications VWFag'ageW(MITT)

Unité de recherche :
;D;F UMR ' 505

Directeur(s) de Thèse :
M. André-Luc BEYLOT

Rapporteurs :
Mme. Francine KRIEF
Mme. Selma BOUMARDASSI

Autre(s) membre(s) du jury
M. Michel MAROT, Prof. Télécom Sud Paris, Examineur/Président
Mme. Francine KRIEF, Prof. ENSEIRB-Matmeca, Rapporteur
Mme. Selma BOUMERDASSI, Maître de conférences CNAM, Rapporteur
M. André-Luc BEYLOT, Prof. INP/ENSEEIH, Membre
M. Riadh DHAOU et M. Benoît ESCRIG , Maîtres de conférences INP/ENSEEIH, Membres



Remerciement

Après trois années de travail laborieux et constructif voici le temps de pouvoir remercier les personnes qui m'ont soutenu, encadré et encouragé pendant toute cette période.

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma sincère gratitude à mon directeur de thèse le professeur André-Luc BEYLOT, pour ses conseils et contributions pour le développement de mes recherches. Sa vaste connaissance et ses fortes compétences analytiques sont certainement un trésor pour ses étudiants. Il donne aux étudiants la liberté d'explorer les zones encore inexplorées, tout en offrant l'assistance nécessaire au bon moment. Je tiens à le remercier sincèrement pour tout ce que j'ai accompli dans ma recherche jusqu'ici.

Je tiens à remercier aussi RIADH DHAOU et Benoit ESCRIG, pour leurs précieux encadrements et leurs conseils indispensables sans lesquels le travail aurait été impossible. Ils sont prêts à partager leurs connaissances et leurs expériences professionnelles. Travailler avec eux s'est avéré être une expérience enrichissante.

Je remercie Mme. Francine Krief et Mme. Selma Boumerdassi pour avoir accepté d'évaluer mon manuscrit de thèse et consacrer un temps précieux à lire ma thèse. Je remercie aussi M. Michel MAROT le président du jury d'avoir assisté et évalué ma soutenance de thèse. Je les remercie tous pour leurs précieux conseils sur ma recherche. Leurs commentaires constructifs et suggestions ont grandement amélioré cette thèse

Des remerciements spéciaux vont à tous les membres de l'équipe IRT. Ils ont créé un environnement de recherche collaborative merveilleux et une ambiance de travail agréable. Je tiens à remercier tout mes collègues étudiants surtout Abdelaziz, Abderahim, Khalid, Farouk et tous mes autres amis pour leur aide précieuse.

Merci au personnel du laboratoire IRIT-ENSSEIHT. Je remercie en particulier Sylvie EICHEN et Sylvie ARMENGUAD qui ont été disponibles à chaque fois que j'ai eu besoin d'aide. Je remercie également l'ensemble des enseignants et doctorants de l'équipe IRT qui m'ont offert un excellent cadre de travail.

Enfin et surtout, je voudrais exprimer ma sincère gratitude à mon épouse et mes chère parents, mes frères, ma sœur et à toute ma famille pour leur soutien sans faille. Ce grand succès n'aurait pu avoir lieu sans eux. Leur amour et encouragement sont les facteurs les plus importants de cet accomplissement.

Table des matières

Table des figures	vi
Liste des tableaux	viii
1. INTRODUCTION	10
1.2. MOTIVATIONS	10
1.3. CONTRIBUTIONS	11
1.4. PLAN DE LA THESE	13
2. ETAT DE L'ART	16
2.1. INTRODUCTION	16
2.2. LES RESEAUX AD-HOC	16
A. Présentation	16
B. Applications	17
C. Protocoles MAC dans les réseaux ad-hoc	19
D. Problèmes de conception de protocoles MAC dans les réseaux ad-hoc	20
2.3. DIVERSITE ET COMMUNICATIONS COOPERATIVES	21
2.3.1. <i>La diversité</i>	21
A. La diversité temporelle	21
B. La diversité fréquentielle	22
C. La diversité spatiale	22
2.3.2. <i>Les communications coopératives</i>	24
2.4. LA COOPERATION A DIFFERENTS NIVEAUX	26
2.4.1. <i>La coopération au niveau physique</i>	26
2.4.2. <i>La coopération au niveau MAC</i>	27
2.4.3. <i>Classification des protocoles MAC coopératifs</i>	32
A. Protocoles réactifs	32
B. Protocoles proactifs	34
2.4.4. <i>Coopération au niveau réseau et la conception inter couche</i>	36
A. Coopération au niveau réseau	36
B. Conception inter couche	37
2.5. CONCLUSION	38
3. RACT : RATE ADAPTATION WITH COOPERATIVE TRANSMISSION	40
3.1. INTRODUCTION	40
3.2. PROTOCOLE PROPOSE	43
3.2.1. <i>Description du protocole</i>	43
A. Sélection du mode de transmission	44
B. Phase de sélection de relais	46
B.1. Classification des relais potentiels	47
B.2. Résolution de contention entre relais potentiels	48
B.3. La sélection du meilleur relais	49
C. Le relayage des données	49
3.2.2. <i>Mécanisme d'adaptation du débit physique</i>	51
3.2.3. <i>Valeur du SINR seuil de la coopération (SINRcoop)</i>	54

3.2.4.	<i>Réservation et annulation du lien</i>	54
3.2.5.	<i>Format des trames dans le protocole RACT</i>	56
A.	Format de la trame CFC	56
B.	Format de la trame CCTS	57
3.3.	EVALUATION DES PERFORMANCES	58
3.3.1.	<i>Analyse des résultats</i>	59
3.4.	CONCLUSION	64
4.	PRACT : POWER AND RATE ADAPTATION WITH COOPERATIVE TRANSMISSION	66
4.1.	INTRODUCTION	66
4.2.	RELATION ENTRE LA CONSOMMATION D'ENERGIE ET LE DEBIT PHYSIQUE	68
4.3.	RELATION ENTRE LA PUISSANCE DE TRANSMISSION ET LE DEBIT PHYSIQUE	70
4.4.	DESCRIPTION DU PROTOCOLE	72
4.4.1.	<i>La stratégie de transmission dans les réseaux WLAN 802.11</i>	73
4.4.2.	<i>Table puissance-débit</i>	73
4.4.3.	<i>Mode de transmission</i>	76
4.4.4.	<i>Sélection de relais et relayage des données</i>	78
4.4.5.	<i>Réservation et annulation du Support</i>	79
4.5.	CONCLUSION	79
5.	EVALUATION DE PRACT	80
5.1.	INTRODUCTION	80
5.2.	ETUDE DES PERFORMANCES DE PRACT	80
A.	Définition des paramètres de simulation	81
B.	Environnement de simulation	81
C.	Analyse des résultats des simulations	82
5.3.	ETUDE DES INTERFERENCES AVEC PRACT	86
A.	Les différentes zones dans une cellule ad-hoc	87
B.	Recensement des scénarios possibles	89
C.	Scénario 1 : Deux sources qui interfèrent l'une avec l'autre	95
D.	Scénario 2 : Une source et une destination qui interfèrent l'une avec l'autre	103
E.	Scénario 3 : Tous les nœuds de la première cellule interfèrent avec tous les nœuds de l'autre cellule et inversement	112
5.4.	CONCLUSION	114
6.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	116
6.1.	CONCLUSIONS	116
6.2.	PERSPECTIVES	117
Liste des publications		120
Acronymes		121
Bibliographies		124

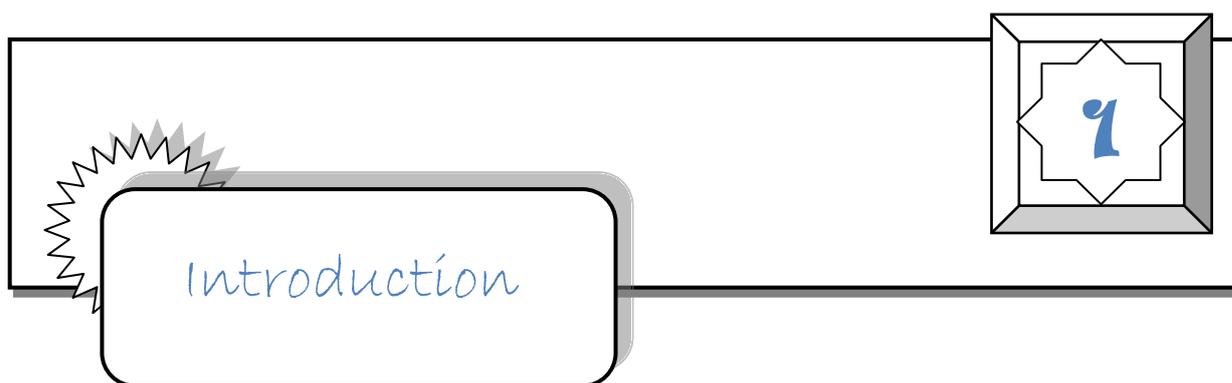
Table des figures

FIGURE 2.1: EXEMPLE D'UN SIMPLE RESEAU AD-HOC.....	17
FIGURE 2.2: APPLICATIONS POSSIBLES DES RESEAUX WPAN [DPOR02].....	18
FIGURE 2.3: DIVERSITE A)- TEMPORELLE, B)- FREQUENTIELLE, C)- SPATIALE	22
FIGURE 2.4 : TRANSMISSION DIRECTE ET COOPERATIVE.....	25
FIGURE 2.5 : L'IMPACT DE LA COOPERATION SUR L'INTERFERENCE.....	30
FIGURE 2.6 : CLASSIFICATIONS DES PROTOCOLES MAC COOPERATIFS SELON LEUR STRATEGIE DE COOPERATION ET LA METHODE DE SELECTION DE RELAIS.	31
FIGURE 3.1 : DECLENCHEMENT DE LA COOPERATION ET SELECTION DU RELAIS DIRECTE ET COOPERATIVE	45
FIGURE 3.2: COMPARAISON DE LA DUREE DE TRANSMISSION D'UN PAQUET POUR DIFFERENTS MODES DE TRANSMISSION (COOPERATIF ET DIRECT)	46
FIGURE 3.3 : RELAYAGE ET ACQUITTEMENT DU PAQUET	50
FIGURE 3.4 : ADAPTATION DE DEBIT A)- TRANSMISSION DIRECTE B)- TRANSMISSION COOPERATIVE	53
FIGURE 3.5 : LE MECANISME NAV	55
FIGURE 3.6: FORMAT DE LA TRAME DE CONTROLE CFC	56
FIGURE 3.7: FORMAT DE LA TRAME DE CONTROLE CCTS	58
FIGURE 3.8 : SEQUENCE DE TRANSMISSION D'UNE TRAME	59
FIGURE 3.9 : GAIN DE DUREE DE TRANSMISSION (%) VS. TAILLE DE PAQUET	60
FIGURE 3.10 : DEBIT VS. TAILLE DE PAQUET	60
FIGURE 3.11 : LE DELAI MOYEN DE BOUT EN BOUT VS. TAILLE DE PAQUET	61
FIGURE 3.12 : ENERGIE TOTALE CONSOMMEE (12 NŒUDS) VS. TAILLE DE PAQUET	62
FIGURE 3.13 : ENERGIE TOTALE CONSOMMEE (30 NŒUDS) VS. TAILLE DE PAQUET	63
FIGURE 4.1 : LA COURBE SNRTH-DEBIT.....	72
FIGURE 4.2: COMPARAISON DE LA DUREE DE TRANSMISSION D'UN PAQUET POUR DIFFERENTS MODES DE TRANSMISSION (COOPERATIF ET DIRECT)	77
FIGURE 4.3 : RESOLUTION DE CONTENTION ENTRE RELAIS POTENTIELS	78
FIGURE 5.1 : SCENARIO DE SIMULATION AVEC 12 NŒUDS.....	82
FIGURE 5.2: DEBIT GLOBAL VS. TAILLE DE PAQUET	82
FIGURE 5.3: CONSOMMATION D'ENERGIE VS. TAILLE DE PAQUET.....	83
FIGURE 5.4: EFFICACITE D'ENERGIE VS. TAILLE DE PAQUET	84
FIGURE 5.5: EFFICACITE D'ENERGIE VS. NOMBRE DE NŒUDS.....	84
FIGURE 5.6 : CONSOMMATION D'ENERGIE VS. NOMBRE DE NŒUDS.....	85
FIGURE 5.7 : ENERGIE-PAR-BIT VS. TAILLE DE PAQUET.....	86
FIGURE 5.8 : ZONE DE TRANSMISSION ET CCA BUSY ZONE	87
FIGURE 5.9 : ZONE DE TRANSMISSION ET D'INTERFERENCE	87
FIGURE 5.10 : LES DIFFERENTES ZONES DANS UNE "CELLULE" AD-HOC.....	89
FIGURE 5.11: INTERFERENCE ENTRE SOURCE ET DESTINATION	90
FIGURE 5.12: INTERFERENCE ENTRE UNE SOURCE ET SA DESTINATION AVEC UNE AUTRE SOURCE.....	90
FIGURE 5.13: INTERFERENCE ENTRE TOUS LES NŒUDS DES DEUX CELLULES	91
FIGURE 5.14: RECENSEMENT DES SCENARIOS POSSIBLES.....	92

FIGURE 5.15: RECENSEMENT DES SCENARIOS POSSIBLES AVEC COOPERATION	94
FIGURE 5.16 : SCENARIO D'INTERFERENCE ENTRE SOURCE ET DESTINATION	95
FIGURE 5.17 : DEBIT REÇU VS. DEBIT OFFERT POUR SCENARIO1 CELLULE1	96
FIGURE 5.18 : DEBIT REÇU VS. DEBIT OFFERT POUR SCENARIO1 CELLULE2	96
FIGURE 5.19 : RELATION ENTRE INTERVALLE D'ARRIVEE ET DEBIT.....	98
FIGURE 5.20 : CYCLE CSMA/CA ET INTERVALLE D'ARRIVEE DES PAQUETS	99
FIGURE 5.21 : INTERFERENCE ENTRE C1 ET C2 DANS LE SCENARIO1 AVEC LE MODE STANDARD.....	100
FIGURE 5.22 : INTERFERENCE ENTRE C1 ET C2 DANS LE SCENARIO1-A) MODE COOP -B) MODE PWRCTRL	102
FIGURE 5.23: INTERFERENCE ENTRE C1 ET C2 DANS LE SCENARIO1-MODE PRACT	103
FIGURE 5.24 : SCENARIO D'INTERFERENCE ENTRE SOURCE ET DESTINATION	103
FIGURE 5.25 : DEBIT REÇU VS. DEBIT OFFERT POUR SCENARIO2 CELLULE1	104
FIGURE 5.26 : DEBIT REÇU VS. DEBIT OFFERT POUR SCENARIO2 CELLULE2	104
FIGURE 5.27 : PERTURBATION MUTUELLE ENTRE SOURCE ET DESTINATION	105
FIGURE 5.28 : INTERFERENCE ENTRE C1 ET C2 DANS LE SCENARIO2-MODE STANDARD A DEBIT FAIBLE ET ELEVE	106
FIGURE 5.29 : INTERFERENCE ENTRE C1 ET C2 DANS LE SCENARIO2-MODE PWRCTRL A DEBIT FAIBLE ET ELEVE	107
FIGURE 5.30 : COMPARAISON ENTRE LE MODE STANDARD ET COOP A FAIBLE DEBIT	108
FIGURE 5.31 : COMPARAISON ENTRE MODE STANDARD ET COOP A DEBIT ELEVE.....	109
FIGURE 5.32 : COMPARAISON ENTRE MODE STANDARD ET PRACT A FAIBLE DEBIT	110
FIGURE 5.33 : COMPARAISON ENTRE MODE STANDARD ET PRACT A DEBIT ELEVE	111
FIGURE 5.34 : SCENARIO D'INTERFERENCE ENTRE TOUS LES NŒUDS.....	112
FIGURE 5.35 : DEBIT REÇU VS. DEBIT OFFERT POUR SCENARIO3 CELLULE1	113
FIGURE 5.36 : DEBIT REÇU VS. DEBIT OFFERT POUR SCENARIO3 CELLULE2	114

Liste des tableaux

TABLEAU 3.1: LES DIFFERENTES CLASSES (MODES) DE RELAIS POTENTIEL.....	46
TABLEAU 3.2 : DEBIT ET SINR	52
TABLEAU 4.1 : LES DIFFERENTES VALEURS DE DEBITS PHY ET LEUR SNR MINIMAL REQUIS DANS LE STANDARD IEEE 802.11A.....	72
TABLEAU 4.2 : TABLE PUISSANCE-DEBIT.....	75
TABLEAU 4.3 : LES DIFFERENTES CLASSES (MODES) DE RELAIS POTENTIEL	77
TABLEAU 5.1: CONSOMMATION D'ENERGIE.....	81
TABLEAU 5.2: PARAMETRES DE SIMULATION	81



1. Introduction

1.2. Motivations

Les réseaux ad-hoc ont suscité un vif intérêt au cours des dernières années en raison de leur flexibilité, de leur robustesse, et de leur coût d'installation réduit. Un réseau ad-hoc est formé par un groupe de nœuds sans fil qui peuvent d'une façon dynamique auto-organiser et auto-configurer le réseau selon une topologie arbitraire. Ils peuvent également établir et maintenir la connectivité entre eux. Chaque nœud peut agir comme source de données, destination, ou nœud intermédiaire qui peut aider dans le transfert des données vers ses nœuds voisins (routage) [Abdr08]. Les réseaux ad-hoc trouvent des applications dans plusieurs domaines importants, tels que les applications militaires (champ de bataille), les opérations d'urgence (recherche, secours et sauvetage), la surveillance (avertissement) ou le calcul collaboratif.

Cependant, pour la transmission des données, les réseaux ad-hoc utilisent le support sans fil. Ce dernier n'est pas stable et est perturbé par des phénomènes comme les bruits, des atténuations dues à la distance parcourue (path-loss), l'évanouissement, et les interférences. Dans le cas d'un échec de transmission (par exemple, par expiration du délai d'attente d'une trame d'accusé de réception ACK), un émetteur cherche à retransmettre le paquet de données vers son destinataire prévu jusqu'à ce que le récepteur décode le paquet de données avec succès ou bien que le nombre de tentatives de retransmission atteigne une limite maximale. Toutefois, si l'échec de transmission est dû aux fortes atténuations provoquées par le canal (Deep Channel Fading) plutôt qu'à des collisions de paquets, il est probable qu'une retransmission de l'émetteur n'aide pas, surtout quand le temps de cohérence du canal est long. Par conséquent, plus de ressources énergétiques et radio seront gaspillées si le transmetteur continue la retransmission sur ce type de canal.

Dans le but de lutter contre l'instabilité du canal radio et de faire face aux phénomènes de perturbation, plusieurs solutions ont été proposées. Le recours à plusieurs antennes pour l'émission et la réception, connu sous le nom de technique MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), crée une diversité spatiale et temporelle et constitue une bonne solution pour augmenter la fiabilité et la capacité du canal radio. Cependant, le déploiement de plusieurs

antennes sur un seul nœud, n'est pas toujours possible en raison de contraintes de coût et de taille physique limitée des équipements miniaturisés, par exemple des capteurs, des smartphones ou des consoles de jeux.

La communication coopérative [SeEA03a, SeEA03b],[VaCo03] est considérée comme une autre solution. Elle crée une diversité spatiale appelée diversité coopérative qui peut être mise en œuvre en coordonnant plusieurs nœuds voisins afin qu'ils travaillent ensemble et forment des réseaux d'antennes virtuelles. En combinant une ou plusieurs copies d'un paquet de données, qui sont transmises à travers des liens indépendants, un gain de diversité peut être obtenu au niveau de la destination. En général, les communications coopératives, permettent non seulement de contourner le problème d'instabilité du canal radio mais également d'augmenter la capacité des liens. La coopération au niveau physique a été largement étudiée et beaucoup de travaux ont été faits en ce sens. Toutefois, au niveau des couches supérieures, et en particulier, de la couche MAC (Medium Access Control), l'emploi de cette technique est encore un sujet sur lequel de nombreuses études sont à mener.

Le but de cette thèse est de proposer des solutions coopératives en termes de protocoles MAC coopératifs, afin d'améliorer les performances des réseaux ad-hoc. Nous profitons des avantages du multi-débit et du contrôle de puissance (Transmit Power Control) du standard IEEE 802.11 et nous les combinons avec les techniques de coopération afin d'augmenter le débit global du réseau, de réduire le délai de transmission, d'économiser de l'énergie, et d'améliorer la stabilité du canal radio.

1.3. Contributions

Notre première contribution est un protocole coopératif au niveau de la couche MAC, RACT (Rate Adaptation with Cooperative Transmission). Ce protocole coopératif est proposé dans le contexte des réseaux ad-hoc multi-débit. Dans cette proposition, nous combinons un protocole de coopération avec un mécanisme d'adaptation de débit. Lorsque la liaison sans fil entre une source et une destination subit de mauvaises conditions de canal, une station relais est sélectionnée dans le voisinage des deux nœuds de sorte que la liaison directe à faible débit de transmission soit remplacée par un lien à deux sauts avec un débit de données plus élevé. La station relais est sélectionnée grâce à un processus de contention distribué. La procédure ne nécessite aucune connaissance de la topologie et aucune communication entre les relais potentiels. L'adaptation du débit de données est également réalisée sans aucune signalisation supplémentaire. En revanche, lorsque la qualité de la liaison directe est bonne et que la transmission des données permet un débit élevé, notre protocole se réduit à un mécanisme d'adaptation de débit réactif aux perturbations du lien. La sélection du meilleur relais et l'adaptation de débit sont fondées sur des mesures instantanées du canal pour s'adapter aux conditions dynamiques de ce canal radio.

En remplaçant un lien direct à faible débit (par exemple à 6Mbits/s) par un lien coopératif à haut débit, le débit global du réseau est amélioré. Ainsi, le problème des stations à faible débit, connu sous le nom de « rate anomaly problem » [HRBD03], s'en trouve-t-il réduit. De plus, transmettre et recevoir un paquet avec un débit élevé consomme moins d'énergie qu'une transmission/réception à faible débit. En outre, la transmission coopérative rapide réduit les délais de transmission.

Les résultats montrent que les transmissions coopératives surpassent considérablement les transmissions non coopératives classiques en termes de débit, de délai et de consommation d'énergie.

Dans le but de réduire encore la consommation d'énergie et en raison de la dépendance entre la puissance d'émission et le contrôle du débit, nous avons proposé comme deuxième contribution, le protocole coopératif au niveau MAC, PRACT (Power and Rate Adaptation with Cooperative Transmission). Le protocole PRACT combine un mécanisme d'adaptation de puissance et de débit (TPRC : Transmit Power and Rate Control) avec un mécanisme de coopération. C'est en cela que cette proposition se distingue des solutions proposées dans la littérature. Notre objectif principal, avec cette contribution, est d'atteindre une efficacité d'énergie pour la transmission des données tout en augmentant le débit global. En plus de l'adaptation du débit proposé par RACT, le protocole PRACT propose d'ajuster dynamiquement la puissance de transmission en s'adaptant aux variations de la qualité du canal radio. Cela permet de gagner davantage dans l'énergie économisée. En outre, le contrôle de puissance réduit les interférences et augmente la réutilisation spatiale entre les cellules ad-hoc adjacentes en utilisant la même fréquence de transmission.

Le principe fondamental de ce protocole est de permettre à chaque nœud dans le réseau ad-hoc de créer une table avec les combinaisons puissance-débit (Power-rate table) optimales, en se fondant seulement sur les spécifications de la carte d'interface réseau (NIC : Network Interface Card), à savoir, les débits de transmission possibles et la consommation en énergie du NIC. Avec la connaissance des qualités des liens obtenue grâce à l'échange des trames de contrôle et en recherchant dans la table puissance-débit, les nœuds choisissent la stratégie de transmission la plus adaptée (qui consiste à sélectionner une combinaison puissance-débit optimale) pour chaque transmission de trames de données, ainsi que le mode de transmission (direct ou coopératif). Les résultats obtenus, montrent des améliorations importantes en termes de débit global et d'économie d'énergie. En outre, nous montrons que les interférences intercellulaires peuvent être réduites, ce qui améliore le débit global.

Les performances du protocole sont comparées et évaluées par le biais de simulations avec l'outil de simulation NS2 (Network Simulator 2)[Ns00].

1.4. Plan de la thèse

Le présent manuscrit est organisé comme suit :

➤ **Chapitre 2 : Etat de l'art**

Dans le chapitre 2, nous présentons brièvement les réseaux ad-hoc et leurs applications, puis nous nous concentrons sur les protocoles MAC dans les réseaux ad-hoc et les défis de recherche liés à leur conception. Par la suite, nous décrivons les différentes techniques de diversité et nous faisons un point sur la diversité spatiale et sa relation avec la technique MIMO (Multiple-Input Multiple-Output). Nous procédons, par la suite, à l'introduction des communications coopératives et de la diversité coopérative avant de recenser les contributions les plus importantes dans le domaine des communications coopératives au niveau de la couche physique, MAC, réseaux et inter-couche. Nous donnons également une classification des protocoles MAC coopératifs selon deux critères, à savoir, la stratégie de coopération et la méthode de sélection de relais.

➤ **Chapitre 3 : RACT: Rate Adaptation with Cooperative Transmission**

Le chapitre 3 présente notre première contribution en termes de protocole MAC coopératif RACT (Rate Adaptation with Cooperative Transmission). RACT est un protocole qui combine les techniques de communication coopératives et d'adaptation du débit. Nous présentons la conception de RACT et nous développons la technique de sélection du relais, l'adaptation du débit ainsi que le fonctionnement du protocole. Les performances de RACT sont évaluées par simulation et comparées à celles du standard IEEE 802.11.

➤ **Chapitre 4 : PRACT: Power and Rate Adaptation with Cooperative Transmission**

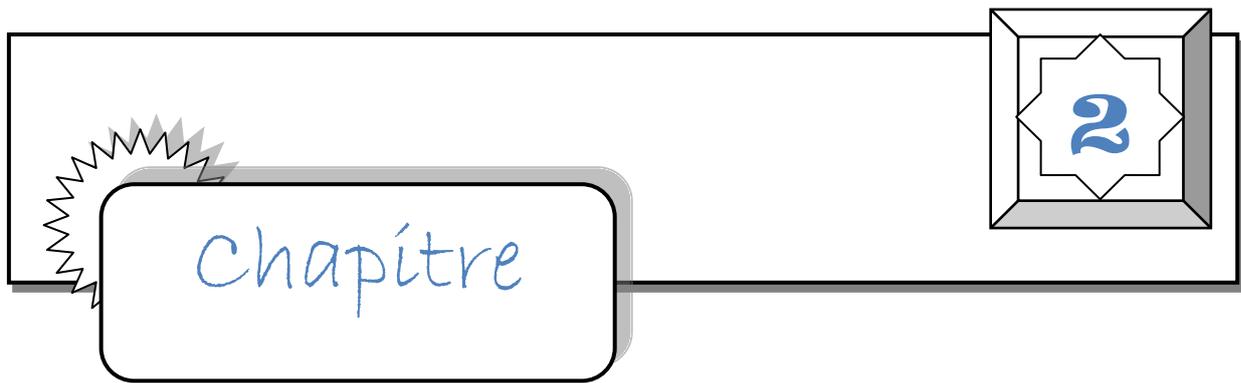
Le chapitre 4 s'intéresse à la conception du protocole MAC coopératif PRACT, qui est fondé sur le premier protocole et représente notre deuxième contribution sur les communications coopératives. Ce protocole propose de combiner des techniques de contrôle de puissance et d'adaptation du débit avec les communications coopératives afin d'améliorer les performances des réseaux ad-hoc en termes de débit global, de consommation d'énergie et d'interférences intercellulaires.

➤ **Chapitre 5 : Evaluation de PRACT**

Dans ce chapitre, nous allons évaluer les performances du protocole PRACT. Ce chapitre est divisé en deux parties. Dans la première partie nous étudierons les performances de PRACT en termes de débit global, de consommation d'énergie et d'efficacité énergétique. La seconde partie est consacrée exclusivement aux interférences. Les résultats sont évalués et comparés avec d'autres modes de transmission.

➤ **Chapitre 6 : Conclusions et perspectives**

Le chapitre 6 résume nos contributions et propose des perspectives qui peuvent être perçues comme des continuations et des améliorations de nos contributions.



2. Etat de l'art

2.1. Introduction

L'idée de réseaux ad-hoc est apparue il y a une quinzaine d'années bénéficiant des progrès de l'électronique et de la maîtrise des communications sans fil qui ont permis d'en faire l'un des sujets de recherche en réseau les plus florissants. En faire un état de l'art exhaustif est désormais impossible tant la littérature est foisonnante. Nous nous focalisons donc essentiellement sur les thématiques plus spécifiques abordées dans cette thèse.

Nous commençons par donner un bref aperçu des réseaux ad-hoc et de leurs applications, puis, nous présentons les protocoles MAC dans les réseaux ad-hoc et les problèmes liés à leur conception. Par la suite, nous décrivons les différentes techniques de diversité et nous nous focalisons sur la diversité spatiale et sa relation avec la technique MIMO (Multiple-Input Multiple-Output). Nous passons par la suite à la présentation des communications coopératives. Les sections suivantes sont consacrées à l'introduction de la coopération dans différentes couches. Nous exposons alors différentes contributions concernant les protocoles de communication coopérative au niveau physique, MAC et réseau ainsi que des contributions avec une approche inter-couche. Nous nous concentrons ensuite sur la couche MAC et nous donnons une classification des protocoles MAC coopératifs selon leurs stratégies de coopération et leurs méthodes de sélection de relais.

2.2. Les Réseaux Ad-hoc

A. Présentation

Les réseaux sans fil ont apporté beaucoup de confort dans la vie quotidienne des gens. Une des structures de réseau les plus intéressantes est celle des réseaux ad-hoc (AHN : Ad-hoc Network). Dans ce cadre, un groupe de nœuds peut former un réseau autonome sans avoir recours à un contrôle central (donc sans infrastructure) en permettant des

communications pair-à-pair (peer-to-peer) (figure 2.1). Les nœuds dans un réseau ad-hoc, peuvent envoyer/recevoir des paquets de données, ou fonctionner comme un relais permettant de relayer les paquets de ses nœuds voisins. Par conséquent, quand une destination est hors de portée de la source, une transmission à sauts multiples peut être utilisée comme une technique efficace pour améliorer la connectivité de réseau et étendre la couverture du réseau. Un réseau ad-hoc entièrement connecté peut être considéré comme un réseau à un seul saut, dans lequel tous les nœuds peuvent communiquer directement les uns avec les autres.

Les réseaux ad-hoc offrent de nombreux avantages tels que le déploiement rapide, la robustesse, la reconfiguration rapide, l'exécution autonome et le faible coût de gestion. Dans un AHN, les tâches du réseau sont par nature distribuées, la topologie dynamique et le routage adaptatif. En fait, les AHNs sont souvent considérés comme la prochaine frontière de la technologie sans fil.

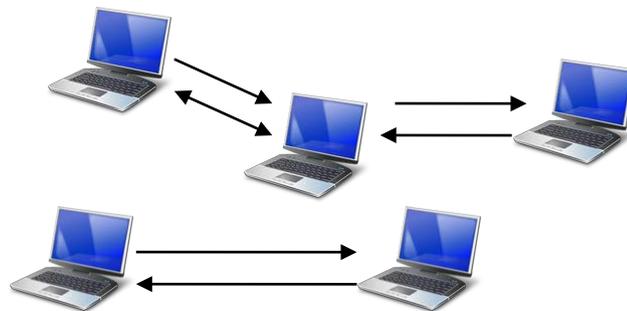


Figure 2.1 : Exemple d'un simple réseau ad-hoc

B. Applications

Les réseaux ad-hoc sont appropriés pour les applications où il est économiquement irréalisable ou physiquement impossible d'établir une infrastructure réseau fiable. Ces contextes typiques incluent l'établissement rapide de communications militaires dans les champs de bataille, la communication dans les opérations de sauvetage d'urgence dans les zones sans couverture radio suffisante, et la communication lors de catastrophes naturelles où l'infrastructure de communication existante est non-opérationnelle (par exemple, les secouristes, en cas de catastrophe naturelle, peuvent rapidement former un réseau ad-hoc à l'aide d'appareils portatifs équipés d'émetteurs-récepteurs utilisant le protocole IEEE 802.11 largement déployé en mode ad-hoc [Isoi99]).

En raison de leur déploiement facile et de leur coût relativement faible, les réseaux ad-hoc sont également utilisés dans des endroits où il est moins coûteux de les déployer que

leurs homologues basés sur des infrastructures, surtout si le réseau est destiné à être utilisé pendant une période de temps limitée. Des exemples de ces applications incluent des réunions d'affaires ou une conférence. En outre, les réseaux à domicile ou réseaux sans fil personnels (WPAN : Wireless Personal Area Networks) reliant des équipements à portée relativement courtes pourraient aussi être des réseaux ad-hoc. L'utilisation des WPAN n'est limitée que par l'imagination. Ces réseaux sont envisagés pour permettre des communications entre des appareils personnels tels que des ordinateurs personnels (PC), des ordinateurs portables, des assistants numériques personnels (PDA : Personal Digital Assistants), des smart-phones, des appareils électroniques (comme les appareils photos récents) ou des systèmes de divertissement (par exemple, des consoles de jeux). La figure 2.2 illustre certaines de ces applications.

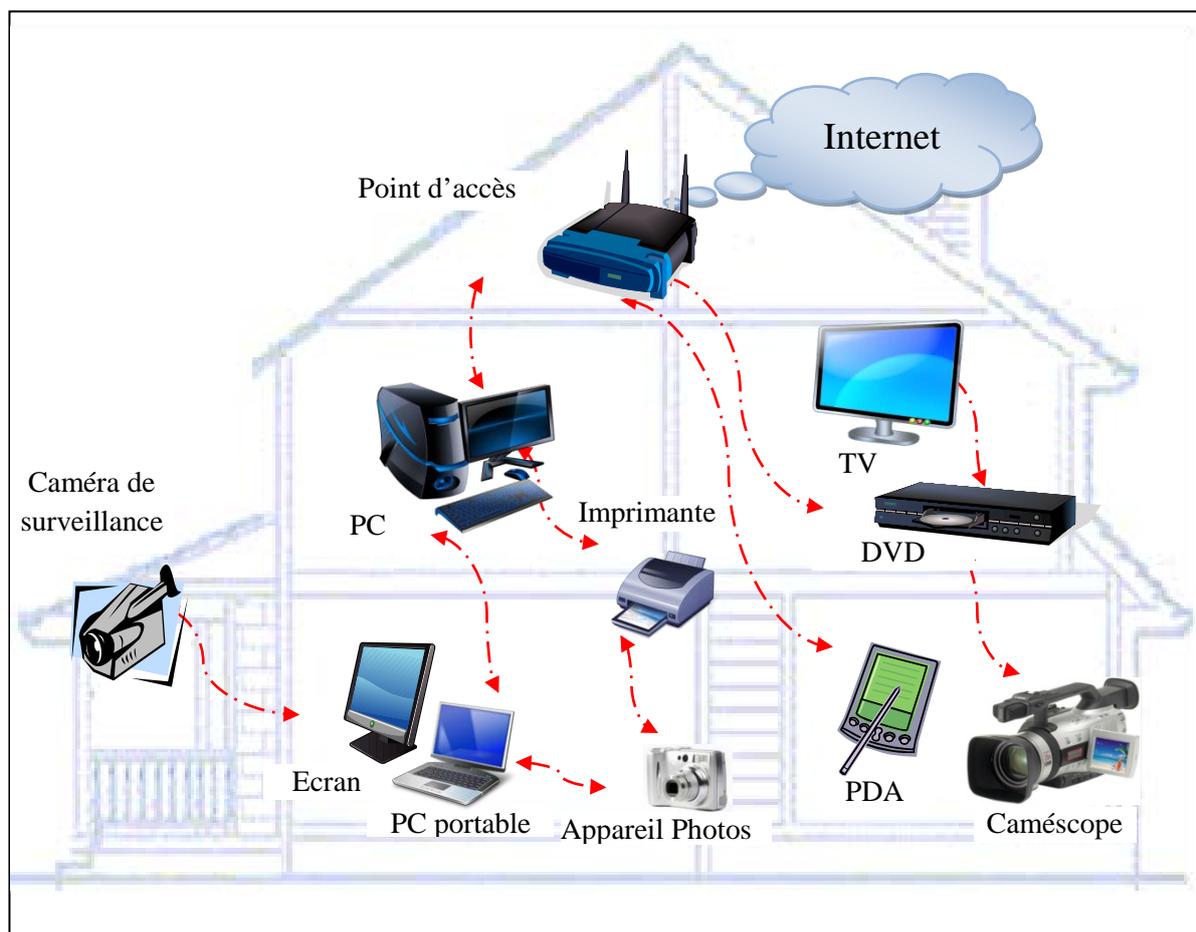


Figure 2.2 : Applications possibles des réseaux WPAN [Dpor02].

Malgré le nombre important de publications dans le domaine des réseaux ad-hoc, de nombreux enjeux restent encore à traiter tels que l'évolutivité, le déploiement, la qualité de service (QoS), la sécurité, la mobilité, le routage, l'accès au support et à la gestion de l'énergie. Ces problèmes sont liés à la conception, du déploiement, à l'exploitation et à la maintenance des AHNs. Toutefois, ces dernières années, deux principaux problèmes ont été

étudiés : le routage et la couche MAC. Des solutions standardisées ont été retenues pour le routage, nous allons nous concentrer sur la couche MAC. Celle-ci est responsable de la coordination efficace de l'accès au support sans fil partagé. Cette position vitale oblige la couche MAC à faire face à des défis importants intrinsèques ou provenant des autres couches.

C. Protocoles MAC dans les réseaux ad-hoc

Depuis l'apparition des réseaux sans fil, les propositions de protocoles MAC n'ont cessé de se multiplier. Ces réseaux utilisent pour les transmissions des données un support sans fil. L'exploitation de cette ressource partagée présente un grand défi pour la couche MAC. Elle régleme l'accès au support sans fil. Ceci étant la première tâche dans les réseaux ad-hoc, elle influe grandement sur les performances du réseau. La couche MAC est prévue pour utiliser judicieusement le milieu sans fil afin d'améliorer le débit et de réduire les délais tout en minimisant le nombre de collisions. Plusieurs propositions ont été faites dans la littérature. Dans les réseaux ad-hoc, ces propositions peuvent être classées en deux grandes familles [KuRD06]:

la famille des protocoles MAC sans contention et celle avec contention. L'avantage principal des protocoles sans contention est la résolution du problème de collision dû aux transmissions simultanées, de deux ou plusieurs nœuds, sur le même support. Les protocoles MAC de cette famille allouent des ressources à leurs utilisateurs : temporelles (TDMA : Time Division Multiple Access), fréquentielles (FDMA : Frequency Division Multiple Access) ou des codes permettant un accès simultané (CDMA : Code Division Multiple Access). Par exemple, les protocoles fondés sur TDMA allouent des intervalles de temps (time slots) aux utilisateurs. Ces protocoles sont mieux adaptés à des trafics périodiques mais nécessitent une synchronisation entre les nœuds. L'inconvénient principal de cette catégorie de protocoles est leur mise en œuvre qui nécessite un contrôleur central et/ou une algorithmique sophistiquée pour l'allocation des ressources et pour s'adapter aux évolutions du réseau. En outre, ces protocoles support très mal la dynamique des réseaux ad-hoc.

Dans la deuxième famille, nous trouvons des protocoles qui reposent le plus souvent sur la technique de Carrier Sense Multiple Access (CSMA) et ses variantes. Dans ces protocoles, le nœud surveille le lien et s'il observe que le support est inoccupé pendant un intervalle défini, il transmet sa trame de données. Sinon, il retarde sa transmission et réessaye la même procédure jusqu'à ce que le support devienne libre. A cet instant, il pourra transmettre ses données. Ces protocoles sont efficaces et bien adaptés à des conditions de faible trafic et potentiellement variables. En outre, ils sont faciles à mettre en œuvre. En revanche, leur grand inconvénient est le problème de collisions. La technique CSMA constitue aujourd'hui la base des standards IEEE 802.11.

D. Problèmes de conception de protocoles MAC dans les réseaux ad-hoc

Les réseaux ad-hoc doivent fonctionner dans des conditions particulières et variables. Ils doivent donc être auto-configurables. Dans la mesure du possible, ces protocoles doivent avoir un fonctionnement décentralisé (distribué), et essayer de minimiser les besoins en signalisation. Par ailleurs, la mobilité dans les réseaux ad-hoc est une caractéristique importante, mais en même temps, elle rend la conception des protocoles MAC difficile. Pour de meilleures performances, les protocoles MAC doivent être en mesure de gérer des terminaux mobiles.

La prédominance des nœuds à faible débit (éloignés les uns des autres par exemple) est un problème majeur rencontré dans les réseaux ad-hoc. Ces nœuds, lors de la communication avec de faibles débits, tels que 1 ou 2 Mbits/s, dégradent le débit de l'ensemble du réseau [KaSS02], [HRBD03]. En même temps, ils créent une iniquité d'accès au support puisque les autres nœuds qui sont bloqués pour une durée plus longue. Ainsi, l'équité représente un autre défi dans la conception de protocoles MAC. Certains protocoles MAC tendent à privilégier les nœuds ayant réussi les transmissions précédentes, ce qui prive certains nœuds d'un accès au support et provoque un épuisement rapide des ressources des nœuds privilégiés.

Les protocoles MAC doivent aussi considérer le problème des collisions. Ces collisions peuvent se produire lorsque deux ou plusieurs nœuds transmettent simultanément. Ces nœuds peuvent être hors de portée les uns des autres et essayer de transmettre en même temps vers la même destination. Dans ce cas, nous parlons de problème de stations cachées. En revanche, lorsque ces nœuds sont à portée les uns des autres et transmettent simultanément, cela veut dire que c'est la méthode d'accès qui est responsable de cette collision. Par conséquent, pour lutter contre le problème des collisions, les protocoles MAC doivent résoudre le problème de stations cachées et concevoir des méthodes d'accès qui permettent un accès au support équitable et avec le moins de collisions possibles.

Le contrôle de puissance et l'adaptation du débit sont également des enjeux très importants dans la conception des protocoles MAC. Le contrôle de puissance permet de diminuer la consommation d'énergie et de réduire les interférences. Ces interférences peuvent dégrader le débit global du réseau ; le contrôle de puissance a un impact sur la zone de couverture. La zone d'interférences est liée à cette zone de couverture. Réduire la zone de couverture réduit la zone d'interférences ce qui permet d'augmenter le débit global.

D'un autre côté, le débit global est affecté par les variations des conditions de canal. Par conséquent, il est important pour le protocole MAC d'adapter le débit de transmission aux différentes conditions de canal, c'est à dire de réduire le débit d'émission pour un mauvais canal et augmenter ce débit pour de bonnes conditions de canal. De plus, l'adaptation du débit de transmission permet aussi de réduire la consommation d'énergie : lorsque nous transmettons une trame à un débit élevé sur un canal perturbé, la trame sera probablement

perdue et une retransmission sera nécessaire. Ainsi, la transmission à un débit faible augmente la probabilité de recevoir cette trame avec succès, par rapport à la même transmission avec un débit élevé, et évite une retransmission éventuelle qui sera coûteuse en énergie.

De nombreuses recherches ont visé à résoudre certains des problèmes mentionnés ci-dessus en prenant des approches telles que le contrôle de puissance, l'adaptation de débit, etc. Cependant, aucune de ces approches n'a pu résoudre complètement ces questions. L'avènement de la communication coopérative a apporté des solutions uniques permettant de répondre à la majorité des problèmes susmentionnés de manière efficace.

2.3. Diversité et communications coopératives

2.3.1. La diversité

La diversité est une propriété mise en œuvre dans les systèmes de transmission sans fil afin de lutter contre les interférences et le fading causé par les trajets multiples du canal de transmission. Elle consiste à recevoir plusieurs répliques du signal émis affectés par des fadings indépendants. L'ordre de diversité est égal au nombre de voies indépendantes à la réception.

Les principales formes de diversité sont la diversité temporelle, la diversité fréquentielle et la diversité spatiale (voir figure 2.3).

A. La diversité temporelle

Cette diversité consiste à envoyer plusieurs répliques du signal à transmettre dans des intervalles de temps séparés d'au moins le temps de cohérence du canal T_c afin d'assurer une bonne décorrélation des signaux (figure 2.3a). Cette diversité est intéressante pour le cas des transmissions dans un canal sélectif en temps.

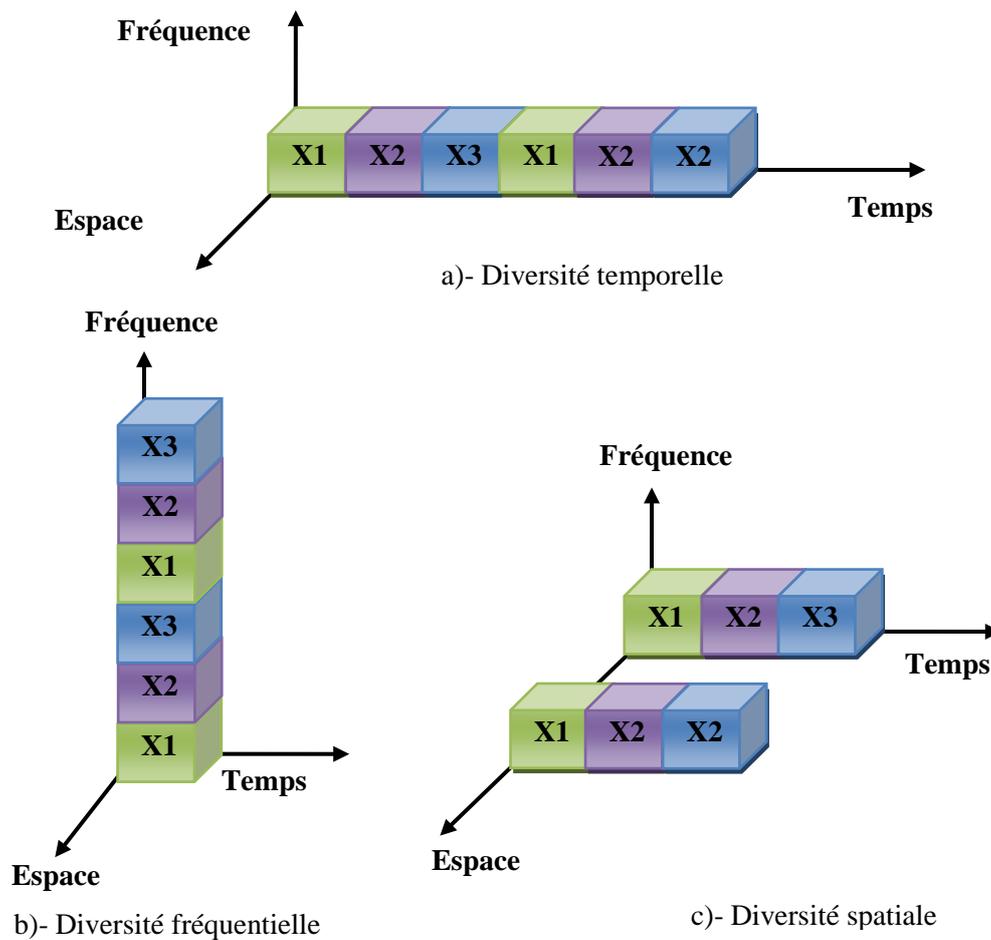


Figure 2.3 : Diversité a)- temporelle, b)- fréquentielle, c)- spatiale

B. La diversité fréquentielle

La diversité fréquentielle consiste à envoyer plusieurs répliques du même signal à transmettre sur des fréquences différentes séparées d'au moins la bande de cohérence du canal B_c . Elle est intéressante pour les transmissions dans un canal sélectif en fréquence. Cette diversité est généralement utilisée dans les systèmes OFDM.

C. La diversité spatiale

La diversité spatiale consiste à envoyer ou recevoir le signal sur des antennes différentes espacées par une distance supérieure ou égale à la distance de cohérence D_c . Cette distance est la séparation minimale des antennes garantissant des fadings indépendants. Les diversités temporelles, fréquentielles et spatiales à l'émission diminuent l'efficacité spectrale

du système puisqu'elles nécessitent la répétition du même signal. On note également que la combinaison de plusieurs techniques de diversité permet de mieux combattre les effets de fading du canal, par exemple, la diversité spatio-temporelle. Dans la diversité spatiale, plusieurs techniques multi-antenne sont utilisées. Par exemple, nous trouvons les techniques MISO avec plusieurs antennes en transmission et une seule antenne à la réception, la technique SIMO qui est l'inverse de la technique MISO, et nous trouvons aussi la technique MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) [Fosc96], [FoGa98].

La technique MIMO est l'une des techniques de base qui offrent une diversité spatiale. Ce système multi-antenne associe plusieurs antennes à l'émission et à la réception. Les deux principaux avantages des systèmes MIMO sont d'offrir une diversité spatiale à l'émission et à la réception, et d'augmenter le gain de multiplexage et cela sans avoir besoin de plus de bande passante ou de puissance d'émission.

Cependant, la transmission avec la technique MIMO a des limites. Les transmissions MIMO induisent un surcoût lié à l'installation de plusieurs antennes sur les terminaux. Par ailleurs, un temps de traitement supplémentaire est nécessaire pour traiter plusieurs signaux émis et/ou reçus. Mais la principale limite des transmissions MIMO est due à la distance de cohérence D_c . En effet, la diversité spatiale est atteinte si et seulement si les signaux reçus peuvent être considérés comme étant non corrélés. Cette propriété ne peut être atteinte que lorsque les antennes de réception sont espacées d'au moins cette distance de cohérence. La distance de cohérence est de l'ordre de $\lambda/2$, λ étant la longueur d'onde des signaux calculée par l'équation 2.1.

$$\lambda = \frac{c}{f_c} \quad (2.1)$$

c est la vitesse de la lumière, et f_c est la fréquence porteuse. Par exemple, dans la bande de fréquence des réseaux WiFi (standard IEEE 802.11), la fréquence porteuse est choisie proche de 2.4GHz. Ainsi, l'espace entre les antennes est de l'ordre de 6 cm. Cette contrainte peut ne pas convenir aux systèmes pour les quels la taille des terminaux sans fil doit être minimisée, par exemple les réseaux de capteurs ou les téléphones portables récents. Dans ce contexte, les communications coopératives offrent une solution alternative intéressante. Dans les paragraphes suivants, nous introduisons les communications coopératives.

2.3.2. Les communications coopératives

Le fading du canal sans fil et les interférences des signaux sont deux causes principales de la dégradation des performances des transmissions sans fil. Au travers de l'utilisation de la diversité spatiale et du gain de multiplexage, les systèmes MIMO combinés avec des techniques de traitement de signal spatio-temporel [Alam98], [SuSL03] peuvent effectivement atténuer les effets néfastes des dégradations du canal sans fil pour améliorer la capacité de transmission et la fiabilité des liens. Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, le déploiement de plusieurs antennes sur un seul nœud n'est pas toujours possible en raison de la taille physique limitée et des contraintes de coût.

Heureusement, la communication coopérative [SeEA03a, SeEA03b],[VaCo03] a été proposée comme une technologie de substitution, dans laquelle la diversité spatiale peut être réalisée en coordonnant plusieurs nœuds qui sont proches géographiquement pour travailler ensemble et former des réseaux d'antennes virtuelles.

L'histoire de la communication coopérative peut trouver ses racines dans les travaux novateurs de Van der Meulen [Ecva71], quand il a introduit le concept de modèle de canal relais (relay channel model). Le modèle de canal se compose de la source, de la destination et du relais, et la principale finalité est de faciliter le transfert d'information de la source vers la destination. Plus tard, Cover et El Gamal [CoGa79] ont étudié en profondeur le modèle de canal relais. Ils ont proposé un certain nombre de techniques fondamentales de relayage tels que Decode and Forward (DF) et Compress and Forward (CF).

La communication à partir d'une source unique vers une destination unique sans l'aide de tout autre terminal communicant est appelée communication directe ou point à point (Figure 2.4a). La coopération nécessite que le nombre de terminaux communicants dépasse deux. Par conséquent, un réseau avec trois terminaux est une unité fondamentale dans la coopération. Cette unité est formée de la source, de la destination et d'un nœud supplémentaire disposé à aider dans la communication. Dans la communication coopérative, chaque utilisateur sans fil est supposé transmettre ses propres données mais aussi agir comme un agent coopératif (relais) pour les autres utilisateurs.

Dans un réseau sans fil, nous pouvons trouver beaucoup de nœuds qui pourraient être d'une grande aide à leurs voisins. Quand un nœud transmet ses données, l'ensemble des nœuds à proximité peut écouter sa transmission. La communication coopérative vise à traiter et transmettre ces informations écoutées vers la destination respective pour créer une diversité spatiale, qui se traduit par l'augmentation de performance du système. Dans la communication coopérative, cette diversité spatiale est appelée diversité coopérative et elle est obtenue lorsque la destination combine les deux signaux reçus. Le premier signal est transmis par la source à travers le lien direct et le deuxième signal est transmis par le relais. Selon la technique de relayage utilisée dans la coopération (par exemple, Decode and

Forward), le relais traite les données reçues de la source et les transmet à la destination, où les deux signaux reçus sont combinés. Etant donné que les deux signaux sont transmis à travers des chemins indépendants, cela se traduit par une diversité spatiale avec un ordre de diversité égal à deux.

Le concept de la communication coopérative est montré dans la figure 2.4b. En général, le processus de communications coopératives peut être séparé en deux phases, la phase de partage d'informations et la phase de transmission coopérative (voir figure 2.4b).

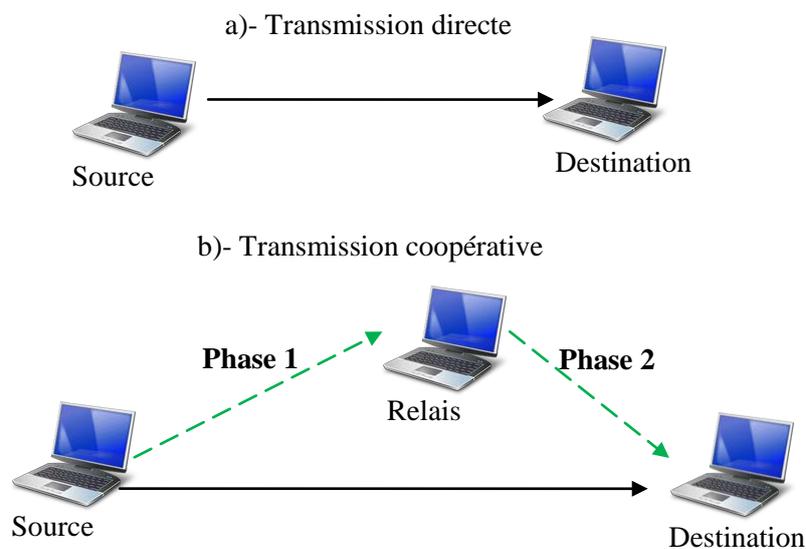


Figure 2.4 : Transmission directe et coopérative

Les premières contributions sur les communications coopératives se sont concentrées sur la couche physique. Récemment, la recherche dans ce domaine a été généralisée aux autres couches de la pile protocolaire, par exemple, les couches MAC et réseau. Dans les sections suivantes, nous exposons les différentes contributions effectuées par les chercheurs concernant les communications coopératives au niveau de différentes couches physique, MAC et réseau. Nous nous focalisons essentiellement sur les travaux faits sur la couche MAC puisque c'est dans ce contexte que se situe notre travail.

2.4. La coopération à différents niveaux

2.4.1. La coopération au niveau physique

Les communications coopératives au niveau de la couche physique sont principalement classées selon les principales techniques suivantes :

a. Amplify and Forward (AF)

Cette technique a été initialement proposée dans [LaWT01]. Dans AF, le relais amplifie les données reçues de la source et les retransmet à la destination. L'inconvénient de ce système est que, avec l'amplification du signal reçu, le bruit est aussi amplifié. Le principal avantage de ce système est sa simplicité.

b. Decode and Forward (DF)

Dans la technique DF [LaWo00], le relais tente de décoder les données de la source et les retransmet à la destination après codage. L'avantage de ce système est que le relais après la réception et le décodage des données reçues avec succès transmet un exemplaire du message sans bruit.

c. Compress and Forward (CF)

Dans cette technique [CoGa79], la source transmet les trames de données au relais. Celui-ci, compresse les trames reçues depuis la source et les retransmet à la destination. Au niveau de la destination, la version compressée des données est combinée avec les données reçues directement de la source. L'inconvénient de ce système est sa complexité.

d. Store and Forward (SF)

Dans cette technique, [VLKV06], le relais stocke les données de la source sans décodage et les retransmet à la destination. Ceci est similaire au cas de multi-saut classique et est simple à mettre en œuvre. Il est semblable à AF sauf qu'il n'y a pas d'amplification du signal par le relais.

Quelques systèmes plus complexes tels que la coopération codée (coded cooperation) [HuNo02] et space time coded cooperation [LaWo03] ont également été présentés pour réduire le taux d'erreur à la réception et atteindre plus de gain de diversité, respectivement.

Les communications coopératives dans la couche physique ont été largement étudiées [CuGB04], [RiCG05] et les avantages de la coopération ont été démontrés par l'analyse des différentes stratégies de relayage du point de vue de la théorie de l'information. Toutefois, afin de maximiser ses avantages, le soutien de la couche MAC [KrMY06], [NoHH04],

[ZZSW05], [NaPa07], [ISSK08] et [ShZW09a] ou d'une approche inter-couche est également important. Un avantage fondamental de la communication coopérative est le gain de diversité obtenu par la diversité spatiale. Pour différents scénarios d'application, le gain de diversité atteint dans la couche physique peut être utilisé pour atteindre des avantages spécifiques dans la couche MAC au besoin, comme l'augmentation du débit de transmission et du débit global, la réduction de la puissance de transmission, l'amélioration de la réutilisation spatiale et de la fiabilité de transmission, l'agrandissement de la portée de transmission et la couverture du réseau [ZhIs12].

2.4.2. La coopération au niveau MAC

La plupart des travaux sur les communications coopératives au niveau de la couche physique se concentre principalement sur l'amélioration de l'ordre de diversité, mais ignorent les effets négatifs de la coopération, par exemple, l'overhead supplémentaire du protocole et la zone d'interférence élargie. Cependant, ces effets sont cruciaux pour les performances globales du réseau et le gain de la coopération peut diminuer ou même disparaître si les protocoles des couches supérieures ne sont pas conçus de manière appropriée. Par conséquent, une plus grande attention a récemment été accordée à la conception de protocoles MAC coopératifs.

Selon les différentes stratégies de coopération, les protocoles MAC de coopération existants peuvent être classés en régimes proactifs et réactifs. Dans un régime proactif, la sélection du relais s'effectue avant que le nœud source ne transmette les paquets de données courants. La sélection du relais dans un système réactif est effectuée après une transmission des données par la source, cela veut dire que la sélection se fait après une défaillance de réception au niveau de la destination. Intuitivement, le(s) relais sélectionné(s) par un régime proactif devraient être en mesure d'augmenter le débit de transmission des deux sauts ou de réduire la consommation d'énergie puisque seuls le(s) relais sélectionné(s) va(vont) écouter les données de la source, tandis que le relais choisi par un système réactif devrait améliorer la fiabilité de la transmission du deuxième saut.

Les propositions faites dans la littérature peuvent être aussi classées en fonction d'autres critères :

1. Le nombre de relais

Intuitivement, avoir recours à plus de relais conduira à un gain de diversité supérieur. Cependant, du point de vue de la couche MAC, l'utilisation de plus de relais entraîne plus d'overhead du protocole et une plus grande zone d'interférence, ce qui peut dégrader le gain de la coopération dans un réseau multi-saut.

Sans un contrôleur central, plus d'overhead de coordination est nécessaire pour sélectionner et coordonner plus de relais d'une façon ordonnée. À cause de l'overhead du protocole, l'efficacité énergétique des transmissions coopératives peut diminuer avec l'augmentation du nombre de relais. D'autre part, si le nombre de relais n'est pas suffisant, la coopération multi-relais ne peut pas être établie et les ressources du spectre radio utilisées pour l'échange d'informations coopératives sont gaspillées [JKFK06]. Il est souligné dans [ShZW09b] que la zone d'interférence causée par la coopération est agrandie proportionnellement avec le nombre de relais ce qui réduit la réutilisation spatiale et, par la suite, peut éventuellement dégrader le débit global. Par rapport à un système coopératif multi-relais, un système coopératif à un seul relais ne nécessite, pour la coopération, ni formation de faisceaux coopérative (cooperative beamforming) ni codage espace-temps distribué (STC : Space-Time Coding) [Alam98]. Dans l'ensemble, la coopération avec un simple relais est plus facile à mettre en œuvre et entraîne moins d'overhead du protocole ainsi qu'une plus petite zone d'interférences. Il est prouvé dans [BKRL06] que la sélection du meilleur relais peut atteindre le même compromis diversité-multiplexage (DMT : Diversity-Multiplexing Tradeoff) que celui de la coopération multi-relais. Par conséquent, de nombreux travaux se concentrent sur l'utilisation des méthodes qui sélectionnent le meilleur relais en raison de leur simplicité et de leur efficacité.

Le meilleur relais est un des relais potentiels qui peut améliorer la performance cible au maximum. La définition du meilleur relais dépend du scénario d'application. Par exemple, pour maximiser le débit de transmission, le relais avec le meilleur état de canal doit être sélectionné [ZLZZ11] ; afin de maximiser la durée de vie du réseau, le relais avec le plus d'énergie résiduelle est préféré [ZLZX09], pour améliorer la réutilisation spatiale, le relais avec le moins de voisins est favorisé [MYAB09] ; afin de maximiser le débit global, le relais qui peut atteindre le gain de coopération le plus élevé et qui occupe la zone d'interférences la plus petite doit avoir la priorité absolue.

2. La méthode de sélection de relais

Les méthodes de sélection de relais peuvent être classées en deux grandes catégories : une première catégorie dite centralisée fondée sur la présélection dans laquelle le(s) relais est présélectionné par la source ou la destination, et une deuxième catégorie appelée distribuée qui est fondée sur la contention entre les relais potentiels. Dans chaque catégorie, nous trouvons plusieurs méthodes de sélection de relais. Par exemple, nous trouvons des méthodes fondées sur des tables (table-based) ou sur le mécanisme du back-off, etc.

Plusieurs mécanismes de sélection de relais centralisés ont été proposés dans la littérature. Un mécanisme de sélection de relais fondé sur des tables est proposé dans [LTNK07], dans lequel le meilleur relais est présélectionné par l'émetteur en fonction des observations des transmissions précédentes. Bien que ce mécanisme de sélection de relais fondé sur des tables soit rapide et sans collision (il n'y a pas besoin de contention entre les relais potentiels), il ne peut pas s'adapter aux variations temporelles des conditions du canal

et la sélection du meilleur relais n'est pas garantie. Pour pallier l'inconvénient de la non-adaptabilité tout en conservant l'avantage d'être rapide et sans collision, plus de relais potentiels peuvent être présélectionnés par l'émetteur [LiLZ08], mais la sélection du meilleur relais n'est pas toujours garantie.

Afin de sélectionner le meilleur relais, de nombreux schémas de sélection de relais fondés sur la contention (contention-based) ont été proposés. Par exemple, un schéma de sélection de relais fondé sur les tonalités d'occupation du canal (busy-tones) est efficace pour sélectionner le meilleur relais sans collision [SWZZ08]. Etant donné que le meilleur relais doit transmettre le plus long busy-tone pour gagner la contention, cette approche de sélection de relais n'est pas efficace en termes de spectre et de consommation d'énergie. Un système fondé sur le mécanisme de back-off est proposé dans [BKRL06] pour choisir le meilleur relais aussi vite que possible. Chaque relais fait correspondre à sa métrique de coopération une durée de back-off. Ainsi le meilleur relais obtiendra la plus courte durée de back-off et diffusera le premier la trame de contrôle qui indiquera son intention de coopérer en tant que meilleur relais. En général, il existe un compromis entre l'efficacité de la sélection de relais et la probabilité de collision. Une longue période de sélection de relais se traduit par une plus faible probabilité de collision, et vice versa. Ainsi, il est difficile de choisir le meilleur relais efficacement tout en conservant une faible probabilité de collision. En outre, un algorithme rapide fondé sur le fractionnement (splitting-based algorithm) est proposé pour la sélection de relais, à travers lequel le meilleur relais est assuré d'être choisi [ShMY10]. Cependant, ce système nécessite que l'émetteur envoie des retours d'information (feed-back) sur les résultats de sélection de relais après chaque time-slot de contention. Cet échange d'informations consomme de l'énergie et des ressources radio.

3. La décision de coopération

Dans les communications coopératives, la décision de coopération peut être faite par l'un des nœuds suivants : la source, la destination ou le(s) relais. Selon qui décide de coopérer ou pas, les propositions dans la littérature peuvent être classées en trois catégories.

4. Le scénario réseau

Les contributions dans la littérature peuvent être aussi classées selon les scénarios réseaux, qui peuvent être soit des réseaux WLANs ou fully-connected (à petite échelle) soit des réseaux multi-saut (à grande échelle). Un réseau fully-connected est un réseau à un seul saut, dans lequel les nœuds peuvent communiquer directement les uns avec les autres. Dans un réseau entièrement connecté (fully-connected), la coopération est bénéfique si la performance de la paire émetteur-récepteur courante peut être améliorée, tandis qu'une coopération dans un réseau multi-saut est considérée comme bénéfique seulement si la performance globale du réseau peut être améliorée. Dans ce scénario, il faut prendre en compte les interactions entre les différentes paires de transmission. Plus précisément, comme le montre la figure 2.5, la coopération est bénéfique à la paire émetteur-récepteur courante,

mais elle élargit également la zone d'interférence et bloque les paires émetteur-récepteur voisins. Par conséquent, la réutilisation spatiale du canal radio est réduite, et en retour le débit de l'ensemble du réseau est dégradé [ZhZh13].

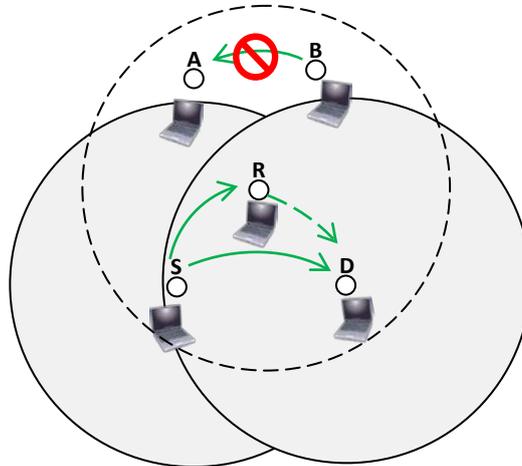


Figure 2.5 : L'impact de la coopération sur l'interférence

A cause de la coopération, plus de nœuds souffrent d'interférences. Dans ce cas, le lien S-D peut bénéficier du relais R, mais le lien B-A serait bloqué à cause de la zone d'interférence élargie.

5. L'objectif principal de la recherche

Pour différents scénarios réseau, l'objectif principal du protocole MAC coopératif peut, changer. Par exemple, il pourra s'agir de maximiser le débit de transmission ou le débit global, d'améliorer l'efficacité énergétique ou d'augmenter la durée de vie du réseau,... Par conséquent, les propositions faites sur les protocoles MAC coopératifs peuvent être classées selon les différents objectifs visés par le protocole coopératif.

Dans ce qui suit, nous présentons une classification des protocoles MAC coopératifs, classés selon leur stratégie de coopération et la méthode de sélection de relais. Nous nous concentrons sur les principaux protocoles MAC coopératifs. Un récapitulatif général des protocoles MAC coopératifs est représenté sur la figure 2.6.

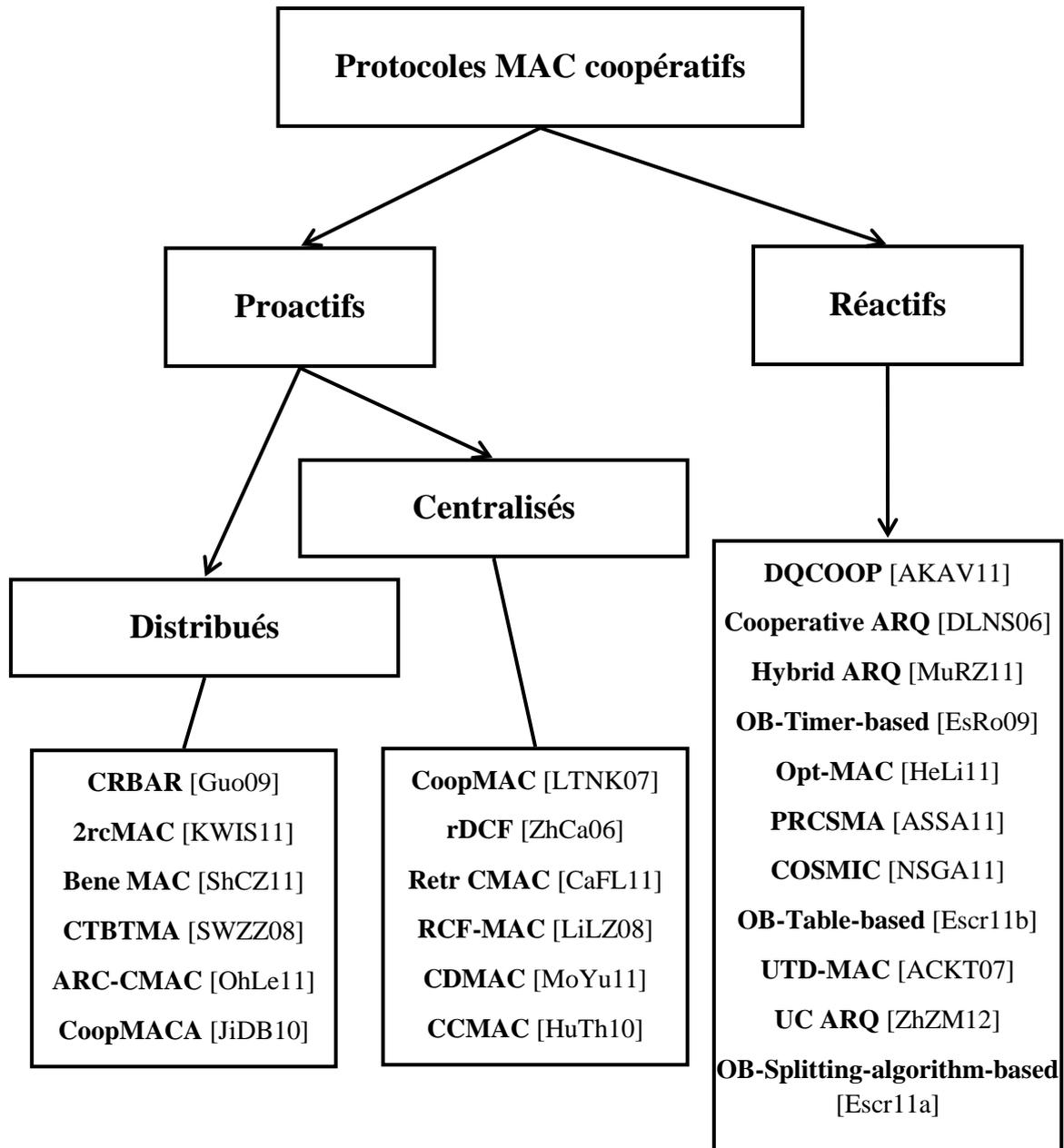


Figure 2.6 : Classifications des protocoles MAC coopératifs selon leur stratégie de coopération et la méthode de sélection de relais.

2.4.3. Classification des protocoles MAC coopératifs

A. Protocoles réactifs

Les protocoles réactifs sont fondés sur la récupération des paquets corrompus à partir des nœuds voisins et cela après une demande de la destination. Lorsque la destination n'arrive pas à décoder un paquet, elle demande à ses nœuds voisins de lui retransmettre le paquet corrompu. La destination ne sait pas à l'avance si un voisin donné a réussi à décoder le paquet ou pas. Par conséquent, la méthode de sélection de relais centralisée n'est pas efficace avec les protocoles réactifs. Ainsi, la plupart des protocoles MAC coopératifs réactifs utilisent une méthode de sélection de relais distribuée. Plusieurs propositions ont été faites dans cette catégorie de protocoles MAC coopératifs (voir figure 2.6). Dans les paragraphes qui suivent, nous décrivons les protocoles les plus connus et discutés dans la littérature.

Cooperative Automatic Repeat Request (ARQ) est un protocole efficace pour lutter contre le fading profond du canal [DLNS06]. Grâce à la nature de diffusion du canal sans fil, Cooperative ARQ peut récupérer efficacement les paquets de données corrompus. L'idée principale du système Cooperative ARQ est la suivante : chaque fois qu'un récepteur ne parvient pas à recevoir un paquet de données, il demande la retransmission du paquet à ses nœuds voisins qui ont écouté la transmission originale, plutôt que de le demander à l'émetteur initial. De cette façon, un gain de diversité spatiale est obtenu puisque le récepteur obtient des copies multiples du même paquet sur des canaux qui connaissent un fading indépendant. Par conséquent, la fiabilité de la liaison et le débit global peuvent être améliorés [DLNS06].

Avec le système Cooperative ARQ, l'amélioration maximale des performances peut être obtenue en sélectionnant le meilleur relais, c'est-à-dire celui à la meilleure qualité de liaison par rapport au récepteur. Toutefois, la sélection du meilleur relais induit un overhead protocolaire supplémentaire et une éventuelle collision de paquets. Les effets provoqués à la fois par l'overhead du protocole et les collisions de paquets vont à l'encontre de l'objectif d'améliorer le débit global. La question des collisions de paquets est abordée dans [AKAV11] où le protocole DQCOOP est proposé pour coordonner la sélection du relais en utilisant une méthode de classification. En revanche, dans le protocole Uncoordinated Cooperative ARQ, proposé dans [ZhZM12], la sélection de relais se fait d'une façon non coordonnée ; chaque relais potentiel essaiera de retransmettre selon des informations locales et la répartition spatiale des relais potentiels. Ce protocole est efficace pour éliminer l'overhead du protocole au prix d'une probabilité de collision plus élevée. De toute évidence, il existe un compromis entre l'overhead de coordination et la probabilité de collision. Dans le protocole Opt-MAC [HeLi11], les auteurs proposent de faire un compromis entre l'efficacité de sélection de relais et la probabilité de collision. En fonction de la densité des nœuds, une méthode optimale de

segmentation du SNR est présentée pour mettre en place une correspondance entre le SNR instantané et le time-slot de contention. Une autre solution consiste à intégrer une technique de codage réseau (Network Coding) avec Cooperative ARQ pour améliorer le débit global et pour motiver les nœuds voisins à coopérer. Plus précisément, le relais sélectionné peut transmettre une combinaison linéaire du paquet corrompu et de son propre paquet qui est destiné au même récepteur [MuRZ11] (Hybride ARQ). De cette manière, le récepteur peut décoder les deux paquets de données simultanément.

Cooperative ARQ est un système coopératif réactif dans la mesure où il est activé uniquement lorsque la transmission directe échoue. Afin d'assurer la possibilité de coopération, les nœuds voisins sont obligés de recevoir des paquets de données qui ne leur sont pas destinés. Par conséquent, la consommation d'énergie supplémentaire au niveau des nœuds voisins est inévitable. Malgré tout, Cooperative ARQ peut encore obtenir de meilleures performances en termes d'efficacité énergétique [ASSA11] (PRCSMA). Etant donné que Cooperative ARQ peut ne pas être toujours bénéfique, il est nécessaire d'aborder le problème de compromis entre le gain de coopération et le coût correspondant (par exemple, l'overhead supplémentaire du protocole, la consommation d'énergie, et les collisions de transmission).

La consommation d'énergie causée par la transmission des trames de contrôle et les trames de notification de présence de relais est une autre forme d'overhead de protocole. Le protocole COSMIC [NSGA11] propose que les nœuds n'échangent ni trames de contrôle ni trames de notification de présence de relais. Cela permet de réduire la consommation d'énergie causée par la transmission des trames de contrôle et de signalisation de la sélection du relais. Dans COSMIC, la destination demande à ses voisins la retransmission du paquet corrompu transmis par la source. Les voisins communs entre la source et la destination utilisent une méthode de sélection de relais fondée sur le back-off. Le meilleur relais sera le voisin ayant le meilleur équilibre entre énergie résiduelle et qualité du canal vers la destination. En revanche, dans le protocole UTD-MAC [ACKT07], le meilleur relais est celui qui garantit la meilleure probabilité de succès de transmission. De cette façon, une plus grande fiabilité peut être obtenue au prix d'un débit de transmission plus faible.

L'auteur dans [EsRo09] propose un protocole coopératif réactif appelé OB Protocol (On-demand relaying with selection of the Best relay Protocol) qui utilise la coopération de manière opportuniste c.à.d. à la demande de la destination. La sélection du meilleur relais est obtenue en utilisant un mécanisme de contention fondé sur les temporisateurs (Timer-based) entre relais potentiels. En revanche, dans [Escr11a] l'auteur propose d'effectuer la sélection en utilisant un mécanisme reposant sur les splitting-algorithms. Le protocole proposé permet d'avoir un compromis entre gain de diversité et de multiplexage. Le même protocole a été utilisé dans [Escr11b]. En revanche, la sélection de relais, cette fois, se fait par l'utilisation de tables de relais (Table-based). La destination utilise une table de relais potentiels pour chaque source.

B. Protocoles proactifs

Selon la méthode de sélection de relais, les protocoles proactifs peuvent être classifiés en protocoles distribués et protocoles centralisés (voir figure 2.6). Dans la deuxième catégorie, la sélection du meilleur est faite par la source ou la destination, tandis que la sélection dans la première catégorie est faite par les relais potentiels eux-mêmes.

1. Protocoles proactifs centralisés

Plusieurs protocoles MAC coopératifs, CoopMAC [LTNK07], rDCF [ZhCa06] et Retr CMAC [CaFL11] ont été proposés pour atténuer les effets néfastes causés par les liaisons de faible qualité en les remplaçant par des liaisons plus rapides à deux sauts. Dans rDCF, c'est le récepteur qui prend la décision finale pour employer ou non le relais présélectionné en fonction des informations d'état de canal (CSI : Chanel Stat Information) instantané, alors que cette décision est prise par l'émetteur dans les protocoles CoopMAC et Retr CMAC. Cependant, ces deux derniers protocoles sont prévus pour les réseaux WLANs, tandis que rDCF est conçu pour les réseaux multi-saut.

D'autres protocoles centralisés ont été également proposés afin de répondre à d'autres objectifs. Par exemple, le protocole Coordinated Cooperative MAC (CCMAC) [HuTh10], propose d'améliorer les performances globales du réseau en prenant en compte conjointement le gain de coopération et la réutilisation spatiale grâce à la collecte d'informations de la distribution spatiale des nœuds dans le réseau. Le point d'accès (AP) prend la responsabilité de recueillir des renseignements et de planifier plusieurs transmissions simultanées. Plusieurs émetteurs émettent des paquets de données à leurs propres relais simultanément sans interférer les uns avec les autres ; ensuite, les relais transmettent les paquets de données au point d'accès de manière séquentielle. Un autre protocole appelé CD-MAC [MoYu11] est proposé dans le but de réduire les interférences et d'améliorer la robustesse des signaux au niveau de la destination. Le protocole emploie deux relais pour transmettre les paquets de données simultanément en utilisant des codes espace-temps.

Les collisions dans la période de sélection de relais se produisent lorsque plusieurs relais potentiels prétendent être le meilleur relais dans le même time-slot. Les collisions fréquentes peuvent réduire de façon significative les possibilités de coopération et dégrader la performance du réseau. Pour réduire les problèmes de collision dans la sélection de relais, une solution consiste à présélectionner un ou plusieurs relais potentiels et préciser les priorités correspondantes selon des informations historiques et/ou statistiques. Dans ce contexte le protocole [LiLZ08] RCF-MAC (a Relay-Contention-Free cooperative MAC) est proposé pour les réseaux WLANs. Après un échange de trames de contrôle, chaque relais présélectionné décide indépendamment de coopérer ou non, selon les mesures instantanées du CSI, et d'agir comme relais en fonction de sa priorité. De cette façon, la période de sélection de relais est réduite de manière significative et les collisions entre les relais potentiels sont réduites.

2. Protocoles proactifs distribués

Dans [JiDB10], les auteurs proposent le protocole CoopMACA (CoopMAC-Aggregation) qui est une extension du protocole CoopMAC [JiDB10]. La majeure modification proposée par le protocole CoopMACA est de choisir le relais par un processus de sélection de relais distribué fondé sur la contention entre les relais potentiels. Le protocole CoopMACA ainsi que le protocole AR-CMAC [OhLe11] proposent d'utiliser un système d'agrégation de paquets. Plus précisément, un relais actif peut transmettre son propre paquet immédiatement après la transmission du paquet relayé. De cette manière, le débit global est amélioré. De plus, l'overhead de coopération peut être compensé en éliminant le temps d'accès au canal pour le relais sélectionné. Cet overhead de coopération est causé par le temps utilisé pour la signalisation de coordination.

Cette signalisation de coordination est nécessaire pour coordonner un accès au lien efficace et réussi puisque davantage de nœuds participent à la transmission d'un paquet de données. Le temps consommé pour sélectionner le meilleur relais est une autre forme d'overhead de coopération. Il y a un compromis à trouver entre période de sélection de relais et probabilité de collision. Lorsque plusieurs relais utiles sont disponibles, une période de sélection de relais plus courte donnera lieu à une probabilité de collision plus élevée, et vice-versa. Les deux overheads de coopération peuvent affecter la décision de coopération et réduire les possibilités de coopération, car ils peuvent réduire ou même éliminer le gain de la coopération, en particulier lorsque la longueur de la charge utile est courte. Par conséquent, il est souhaitable de concevoir un schéma de sélection de relais distribué qui tienne compte d'overheads de coopération causés à la fois par la signalisation de coordination et par la sélection de relais. Le problème d'overhead est abordé dans BeneCMAC [ShCZ11] où l'overhead de signalisation est utilisé pour prendre la décision de coopération.

Le délai causé par les retransmissions de paquets doit être aussi considéré comme une forme d'overhead. Une liaison sans fil non-fiable induit de fréquentes retransmissions de paquets qui sont préjudiciables à la performance globale du réseau. Par conséquent, afin de réduire l'overhead de retransmission, la fiabilité devrait être considérée lors de la sélection du meilleur relais. Pour améliorer la fiabilité des liens et le débit global, le protocole 2rcMAC (two-relay-based cooperative MAC protocol) [KWIS11] propose de sélectionner les deux meilleurs relais. Le premier relais est utilisé pour atteindre un débit de transmission plus élevé tandis que le second relais est invoqué comme un nœud de secours pour une fiabilité de transmission plus élevée. Cependant, une signalisation de coordination supplémentaire est nécessaire, et deux relais qualifiés ne sont pas toujours disponibles.

La dynamique du canal causée par la mobilité des nœuds ainsi que les collisions sont deux points importants à prendre en compte lors de la sélection du meilleur relais. L'état du canal entre deux nœuds mobiles change avec le temps, ce qui exige des décisions de coopération fréquentes et une sélection de relais rapide. En outre, la mobilité des nœuds conduit à de fréquentes ruptures de liens qui peuvent dégrader considérablement les

performances du réseau. Afin de s'adapter à la dynamique des canaux et d'améliorer le débit de transmission, le protocole CRBAR [Guo09] propose que les relais potentiels ajustent de manière adaptative leurs mode de transmission (coopératif ou direct) et leur débit de transmission en fonction de CSI instantané.

Pour résoudre le problème des collisions, le protocole CTBTMA à triple busy-tone (CTBTMA : Cooperative Tripe Busy-Tone Multiple Access) est proposé dans [SWZZ08]. Deux types de busy-tone (transmit-busy-tone et receive-busy-tone) sont employés pour protéger la transmission des trames de contrôle et les paquets de données. De plus, un autre busy-tone (helper-busy-tone) est utilisé pour éviter les collisions entre les relais potentiels et sélectionner le meilleur relais. Le meilleur relais doit transmettre le plus long busy-tone pour gagner la contention. L'utilisation de busy-tons permet de résoudre le problème des collisions dans la sélection du meilleur relais mais consomme plus d'énergie et de ressources radio.

2.4.4. Coopération au niveau réseau et la conception inter-couche

A. Coopération au niveau réseau

Dans les réseaux sans fil, en général, une seule meilleure route est choisie pour la transmission des données d'un terminal source vers un terminal de destination. Il existe de nombreux protocoles de routage, qui ont été développés et sont utilisés dans les réseaux sans fil tels que Dynamic Source Routing (DSR) [DbDa96], Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) [CP94], et Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV) [CES03]. Ces protocoles fonctionnent bien mais ne peuvent pas être directement appliqués aux communications coopératives puisque plusieurs routes sont nécessaires pour envoyer des données d'une source vers une destination (ou d'un terminal précédent à un terminal suivant). Par conséquent, des protocoles de routage coopératifs ont été proposés.

Les protocoles coopératifs dans la couche réseau sont appelés protocoles de routage coopératifs puisque principalement ils intègrent la transmission coopérative dans le sélection de route. Les objectifs de ces protocoles consistent à établir des routes plus stables et de profiter des avantages des communications coopératives en termes d'énergie économisée lorsque plusieurs terminaux coopèrent pour transmettre l'information sur le prochain saut le long de la route vers la destination. Le protocole présenté dans [RNAJ09] est un exemple de protocole de routage coopératif qui profite des avantages des économies d'énergie obtenues grâce aux transmissions coopératives. Dans [IbHL07] et [ZJA05] par exemple, la sélection du relais est effectuée sur la base de la consommation d'énergie totale, qui est utilisée pour transmettre des données depuis un terminal source vers un terminal de destination. Les coûts

du lien représentent la puissance minimale requise pour la transmission de données sur chaque lien et qui permet aux récepteurs de pouvoir décoder correctement les données.

D'autres métriques de lien utilisées pour la sélection de relais dans la couche réseau ont également été introduites dans [CZZZ07] et [YSLA07]. La méthode de sélection de relais est fondée sur l'énergie résiduelle du relais, les informations d'état de canal (CSI) du chemin coopératif de la source vers le relais puis vers la destination, et la probabilité de détection d'erreur sur une route donnée.

Des exemples de protocoles coopératifs dans la couche réseau comme [BLL09], [AJEL07], [RNAJ09], [YSLA07] et [ZJA05], par exemple, montrent que les méthodes de sélection de relais ont été largement introduites, mais, contrairement aux protocoles coopératifs dans la couche MAC, les détails d'activation du mode coopératif, les notifications du mode coopératif, et les méthodes d'allocation de ressources n'ont pas été largement étudiés. Il y a très peu de recherches sur la coopération au niveau de la couche réseau qui prennent en compte ces paramètres.

B. Conception inter-couche

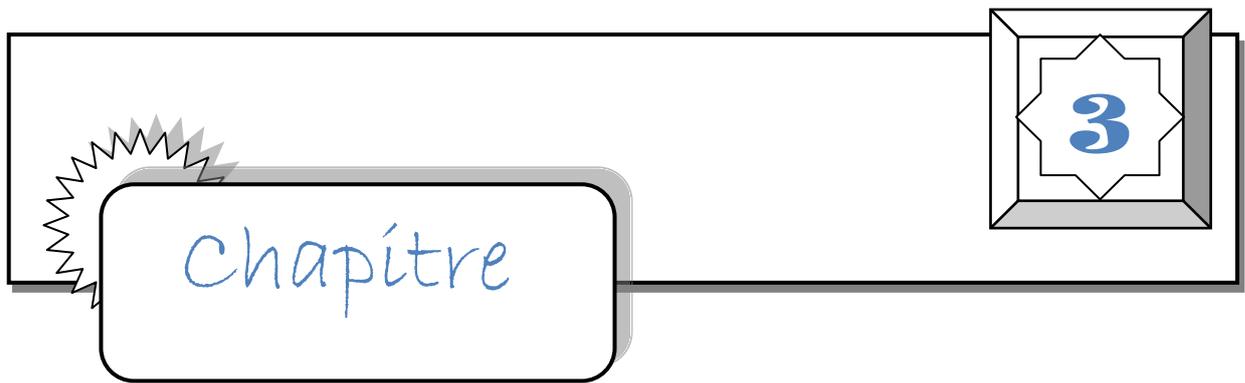
Pour plus de simplicité et de compatibilité, l'architecture en couches traditionnelle pour les réseaux filaires est fondée sur un fonctionnement indépendant de chaque couche de la pile de protocoles, mais cette conception en couches ne s'adapte pas bien à la dynamique du canal dans les communications sans fil. En revanche, la flexibilité obtenue par la conception inter-couche peut aider à faire face à la dynamique du canal et faire un usage plus efficace des ressources limitées du spectre radio [ZhZh08a]. Beaucoup de protocoles MAC coopératifs existants [ShCZ11], [Guo09], [ZSHM11], [ZLZZ10] utilisent la conception inter-couche entre les couches physiques et MAC puisque la sélection de relais est liée à l'adaptation du débit et de la puissance. Récemment, la conception inter-couche a été étendue aux couches MAC et réseau [JKFK06], [AgJ11], [WaCL12], [ZhZh08b], [LVKA08]. Les informations de routage peuvent aider à améliorer la fiabilité de la transmission en effectuant une meilleure décision de coopération [LVKA08]. En général, la conception inter-couche entre les couches MAC et réseau est utilisée pour lutter contre la rupture des liens, tandis que la conception inter-couche entre la couche MAC et la couche physique a pour but de sélectionner le meilleur relais [AgJ11].

Bien que certains travaux aient porté sur la conception inter-couche entre les couches physique, MAC et la couche réseau, ils sont encore loin d'être optimaux car la coopération nécessite des interactions étroites entre les différentes couches. La couche réseau devrait être en mesure d'atténuer le niveau de contention au niveau de la couche MAC, tandis que la couche MAC doit être capable d'identifier plus d'opportunités de coopération pour l'établissement de route au niveau de la couche réseau.

2.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les études préliminaires nécessaires au développement de cette thèse. Nous avons décrit succinctement les réseaux ad-hoc et en particulier les difficultés de conception de leurs protocoles MAC. Nous nous sommes alors concentrés sur la diversité ainsi que sur les techniques permettant de la mettre en œuvre. Ensuite, nous avons présenté les communications coopératives et nous avons montré leur efficacité potentielle dans les réseaux sans fil en utilisant la diversité spatiale. Finalement, nous avons donné un aperçu des différents travaux concernant les communications coopératives dans les différents niveaux physiques, MAC et réseau. Nous nous sommes concentrés sur la couche MAC et nous avons donné une classification selon deux critères importants dans les communications coopératives.

Le chapitre suivant présente notre première contribution en termes de communication coopérative ; il présente RACT, notre protocole MAC coopératif.



3.RACT : Rate Adaptation with Cooperative Transmission

3.1. Introduction

Le débit des réseaux sans fil est fortement affecté par les interférences dues aux autres utilisateurs et les atténuations dues au canal radio. Cette métrique de performance est également très dépendante de la présence de stations à faible débit dans le réseau. Dans les réseaux sans fil multi-débit, ces nœuds à faible débit occupent le canal pendant des durées plus longues que les nœuds à haut débit afin de transmettre la même quantité de données. Cette anomalie provoque une diminution du débit global du réseau. Elle est causée par la méthode d'accès au canal CSMA/CA qui a pour but de fournir une probabilité d'accès au canal égale, à long terme, à tous les nœuds dans le réseau. La situation s'aggrave lorsque le nombre de nœuds augmente, car de plus en plus de nœuds doivent partager le support. Ce problème est connu sous le nom « 802.11 rate anomaly problem » [FRBD03]. Un moyen efficace pour résoudre ce problème consiste à utiliser les communications coopératives. Dans un schéma de transmission coopérative, le lien direct entre un nœud source S et un nœud destination D est remplacé par deux liens relayés : un lien de S vers le nœud relais Re , et un lien de Re vers D . Par conséquent, un lien direct à faible débit de données sera remplacé par deux liens avec des débits plus élevés.

Dans ce travail, notre objectif est d'améliorer l'efficacité des protocoles coopératifs en termes de débit global du réseau par la prise en compte des mécanismes d'adaptation de débit (RAAMs : Rate Adaptation Mechanisms) dans la conception de ces protocoles. La justification de cette démarche vient du fait que les RAAMs sont déjà implantés dans les cartes réseaux IEEE 802.11 et que leur fonctionnement peut modifier la sélection de débit effectuée au niveau du protocole de coopération. Autrement dit, lorsqu'un protocole de coopération calcule un débit éventuel qui peut être utilisé sur un lien donné, le débit effectivement utilisé pour transmettre les données sur ce lien peut être différent car les mécanismes d'adaptation de débit sont indépendants des protocoles coopératifs.

Notons que les RAAMs ne font pas partie de la norme IEEE 802.11. Les mécanismes d'adaptation de débit sont généralement divisés en deux catégories, Sender-based et Receiver-based. Dans la première catégorie, on trouve des mécanismes comme ARF (Automatic Rate Fallback) [KaMo97] ou Minstrel [Madw11], qui s'appuient sur des statistiques du canal. Dans la deuxième catégorie, on trouve des solutions comme RBAR (Receiver-Based AutoRate) [GuCW08], qui s'appuient sur les informations instantanées d'état du canal (CSI: Channel State Information). Les statistiques du canal sont fondées sur l'historique des transmissions tandis que le CSI repose sur des mesures instantanées du canal telles que le rapport signal sur bruit (SNR: Signal to Noise Ratio). Les protocoles Receiver-based sont considérés comme étant plus réactifs que les protocoles Sender-based (appelés aussi Statistic-based protocols).

Plusieurs protocoles de coopération ont été proposés pour aborder différents problèmes. Dans [HKRW03], les auteurs ont utilisé la coopération pour améliorer la diversité spatiale et la robustesse des signaux contre le fading dû aux trajets multiples (multi-path fading). Les auteurs de [JKFK06] ont cherché à augmenter la portée de la transmission dans les réseaux ad-hoc. Dans [SeEA03], la coopération est utilisée dans des systèmes CDMA, pour améliorer le débit et la qualité de service. L'augmentation du débit de données en exploitant la capacité multi-débit du standard IEEE 802.11 dans les protocoles de coopération a été abordée dans [ChYW07] et [ShZW09]. Une caractéristique commune des protocoles cités avant est que le nœud relais est choisi de manière réactive. En revanche, dans CoopMAC [LiTP05] et dans rDCF [ZhCa05], un relais est sélectionné de manière proactive à partir d'une table de relais (relay-table). Cette table est mise à jour en fonction des écoutes passives du trafic en cours ou en échangeant des données proposées par les relais potentiels. Par conséquent, quand un nœud source est prêt à envoyer sa trame de données, il choisit un nœud relais à partir de la table correspondant au nœud destination. L'idée ici est que les RAAMs sont indépendants des protocoles de coopération. Par conséquent, le débit de données choisi par le mécanisme de coopération peut être différent de celui fourni par le mécanisme d'adaptation de débit.

Un protocole de coopération mettant en œuvre le mécanisme d'adaptation de débit RBAR a été proposé dans [GuCW08] et [Guo09]. Ce protocole appelé CRBAR (Cooperative Relay-Based Auto Rate MAC) utilise deux modes de relayage. Le premier mode, utilise un simple relayage sans combinaison des signaux au niveau du récepteur. Dans le second mode, le mécanisme de combinaison de signaux MRC (Maximum Ratio Combiner) est employé à la destination D pour combiner les deux copies des données reçues de la source S et du relais Re . Les débits de données doivent être les mêmes sur les deux sauts: de S vers Re , et de Re vers D . Sur le premier saut, le débit est calculé en se fondant sur la qualité de la liaison entre S et Re . Cela peut empêcher la destination de décoder avec succès la trame de données envoyée de S à Re puisque son débit est adapté au premier saut source-relais. De plus, la possibilité de choix des relais est limitée aux seuls relais qui assurent le même débit sur les deux sauts. En fait, le mécanisme MRC nécessite que les deux copies à combiner soient codées avec la même modulation.

Notre proposition, dans ce chapitre, combine un protocole de coopération avec un mécanisme d'adaptation de débit. Le protocole proposé est nommé RACT pour Rate Adaptation with cooperative Transmission. L'amélioration par rapport aux protocoles de coopération réactifs et proactifs classiques est l'ajout de la fonction d'adaptation de débit de données. Les améliorations par rapport aux approches [GuCW08] et [Guo09] sont les suivantes. Comme aucune combinaison de signaux MRC n'est requise, différents débits de données sont désormais possibles sur les deux sauts : de S à Re , et de Re à D . De plus, avoir un simple mode de relayage pourrait offrir davantage de possibilités pour maximiser le débit global sur la liaison S - Re - D . En outre, notre analyse des transmissions coopératives montre que les différentes combinaisons de débits dans le lien relayé ne sont pas toutes bénéfiques en termes de temps de transmission et de délais. Cela est dû au fait que nous prenons en compte l'overhead de signalisation dans l'évaluation des combinaisons de débits. Par exemple, si on prend un lien direct de S à D à 6Mbit/s, l'utilisation d'une communication coopérative avec un débit de 12Mbit/s sur les deux sauts de S à Re et de Re à D pour remplacer le lien direct n'apportera aucun bénéfice en termes de durée de transmission. Dans CRBAR, la coopération est déclenchée par le relais lorsque la liaison coopérative est plus rapide que la liaison directe. Par conséquent, avant chaque transmission de données, la source doit attendre une durée pour avoir la réponse éventuelle des relais potentiels. Dans le cas où le lien direct est plus rapide que les liens relayés ou en cas d'absence de relais, la source choisit une transmission directe vers D après la durée d'attente. Dans ces cas, cette durée d'attente pour de potentiels relais est inutile et elle influe sur les délais des transmissions et sur le débit global. En revanche, dans notre protocole, la décision de la coopération est faite par la destination quand elle se rend compte que la qualité de la liaison directe est mauvaise et que la transmission directe ne peut se faire qu'avec le débit de base à 6Mbit/s. Cela permet à la source S d'économiser le délai d'attente inutile. En effet, lorsque la qualité du lien direct est assez bonne et que la coopération ne peut pas aider davantage, la source transmet les données directement à la destination sans attendre. Dans CRBAR, les informations d'état de canal utilisées pour l'adaptation du débit sont recueillies au niveau du récepteur et transmises à la source S . Dans notre protocole, la sélection du débit est effectuée au niveau de S . Cela permet une sélection plus précise puisque les informations d'état du canal sont plus à jour. De plus, notre protocole ne modifie pas le format des trames et ne nécessite aucun échange d'informations pour effectuer la coopération et l'adaptation du débit.

Nous allons présenter maintenant plus de détails sur le protocole proposé et son fonctionnement. Nous en évaluons ensuite les performances avant de conclure.

3.2. Protocole proposé

Nous considérons un réseau ad hoc IEEE 802.11g à un seul saut et avec M nœuds. Les trames de contrôle sont toujours transmises avec le débit de base à 6Mbit/s et avec la puissance d'émission la plus élevée (15dBm dans notre cas). Pour des raisons de simplification, nous avons utilisé une couche physique IEEE 802.11g à quatre débits physiques 6, 12, 24 et 54Mbits/s. En outre, le canal radio est supposé être symétrique, puisque tous les nœuds utilisent la même bande de fréquence pour la transmission et la réception. Le protocole coopératif proposé est intégré dans le protocole MAC IEEE 802.11 comme une fonction ou une extension qui peut être activée ou désactivée sur tous les nœuds. Lorsqu'elle est activée, elle permet aux nœuds de demander la coopération ou d'écouter les trames de contrôle afin de détecter une éventuelle demande de coopération. Lorsqu'elle est désactivée, le protocole MAC standard est appliqué.

3.2.1. Description du protocole

Le protocole RACT repose sur la fonction de coordination distribuée (DCF : the Distributed Coordination Function) de la norme IEEE 802.11. L'idée de base de ce protocole est de permettre aux nœuds de choisir un mode de transmission (direct ou relayé) et un débit de données en se fondant uniquement sur les mesures faites sur la liaison en temps réel. Un mécanisme distribué pour sélectionner le meilleur relais potentiel est mis en œuvre. Dans les mécanismes centralisés, le relais est choisi de manière proactive en se fondant sur des informations recueillies précédemment par l'expéditeur ou le destinataire. En revanche, dans notre mécanisme distribué, chaque relais potentiel se choisit lui-même comme le meilleur relais pour la coopération uniquement en fonction d'informations instantanées du canal recueillies localement. De cette façon, le choix est réactif vis-à-vis des variations de la topologie et du canal. Le régime proposé ne nécessite aucun échange de signalisation. Un second mécanisme est utilisé pour sélectionner le débit physique le plus approprié. Pour effectuer une sélection plus réactive vis-à-vis des variations de la liaison en temps réel, le débit est choisi pour chaque transmission de données en se fondant sur des mesures prises sur le signal des trames de contrôle. Ce mécanisme est similaire à RBAR [HoVB01] d'une certaine façon mais, contrairement à ce dernier, notre mécanisme ne modifie pas le format des trames de contrôle et ne nécessite pas d'échange d'informations pour effectuer l'adaptation du débit.

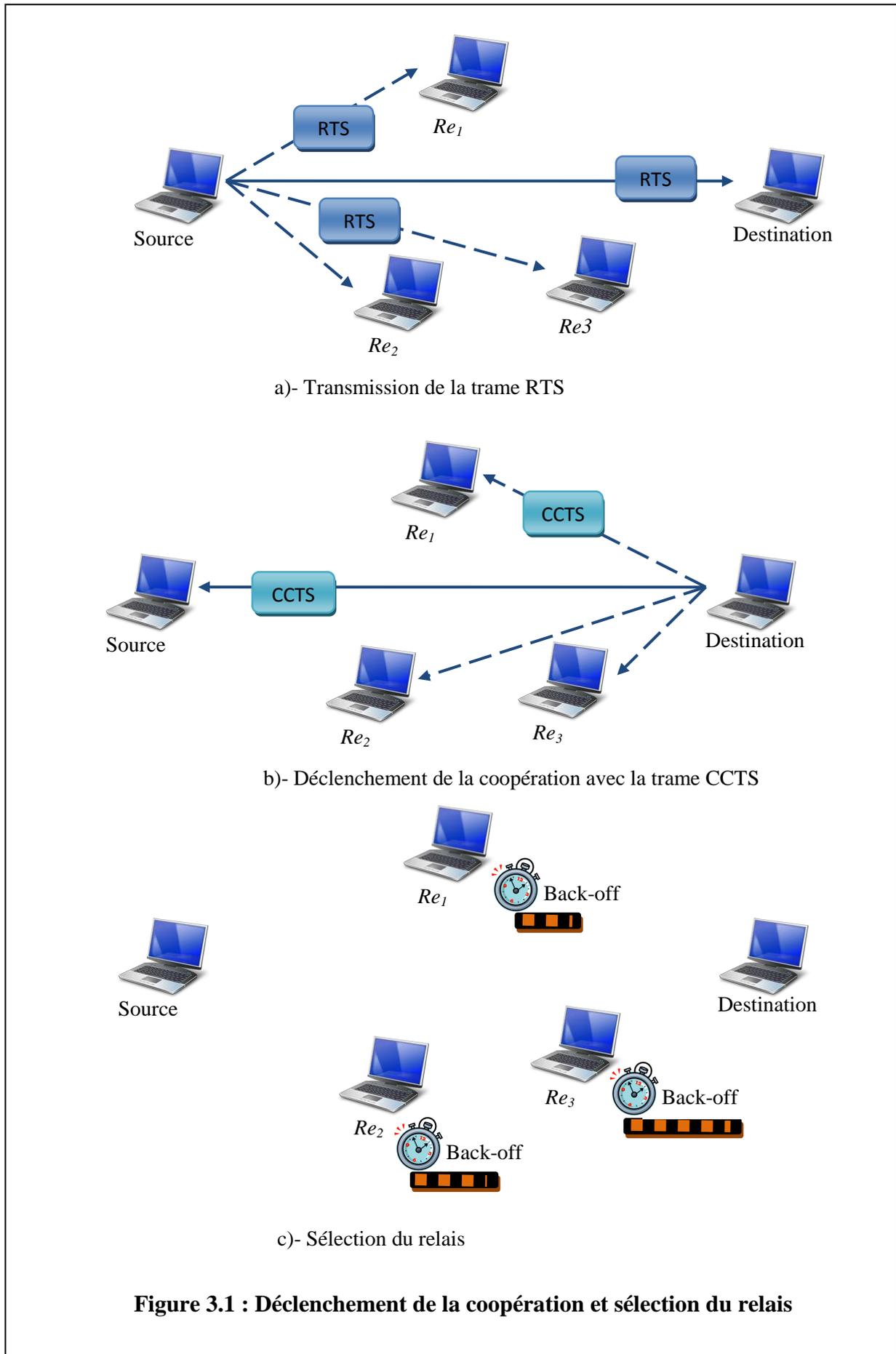
Avec ce protocole, nous cherchons à adapter le débit physique à la qualité du lien. Lorsqu'un lien direct est très perturbé et que le débit physique qui peut être utilisé sur ce lien est très faible, nous remplaçons ce lien à faible débit par des liens plus rapides. Dans ce travail, nous considérons qu'un lien à 6Mbits/s est un lien à faible débit et qu'il faut essayer de le remplacer. Le fait d'adapter le débit et d'utiliser la coopération quand c'est nécessaire permet non seulement d'augmenter le débit global du réseau et de combattre le problème des

stations à faible débit mais également de réduire la consommation d'énergie (comme nous allons le montrer avec les simulations). Dans les paragraphes qui suivent, nous décrivons le fonctionnement du protocole RACT.

A. Sélection du mode de transmission

Une fois qu'un nœud source S a un paquet de données à transmettre, il envoie une trame RTS (Ready-To-Send) au nœud destination D (figure 3.1a). Lorsque D reçoit la trame RTS, il choisit le mode de transmission (direct, relayé) en fonction de la valeur du SINR (Signal to Interference and Noise Ratio) mesurée de la trame RTS. En effet, D compare cette valeur avec une valeur seuil de SINR prédéfinie notée $\text{SINR}_{\text{coop}}$ (voir la section 3.2.3). Ainsi, lorsque la valeur du SINR est supérieure à $\text{SINR}_{\text{coop}}$, une transmission directe est mise en œuvre et notre protocole se réduit simplement à un mécanisme d'adaptation du débit (décrit dans la section 3.2.2). Dans le cas contraire, la coopération est déclenchée et le nœud D envoie une trame CCTS (Cooperative Clear-To-Send) vers le nœud S (figure 3.1b). Le CCTS indique au nœud S que le niveau du SINR est très faible au niveau de la destination D et que la transmission directe ne permet pas un débit plus élevé que 6Mbit/s. Le niveau bas du SINR est causé par les perturbations du canal, principalement le multi-path fading, les pertes du signal dues à la distance ou aux interférences.

Chaque nœud Re_i situé aux environs de S et de D écoute le trafic de contrôle en cours. Après avoir réussi le décodage de la trame RTS transmise par S , le nœud Re_i mesure le SINR de la trame et calcule le débit de données réalisable R_{SRe_i} entre lui et le nœud S en utilisant le mécanisme d'adaptation de débit. Ensuite, Re_i stocke la valeur de R_{SRe_i} avec l'adresse MAC du nœud S , l'émetteur de la trame RTS. Lorsque Re_i reçoit avec succès la trame CCTS de D , il compare d'abord l'adresse de destination de la trame CCTS avec l'adresse source de la trame RTS (stockée précédemment). Lorsque ces deux adresses correspondent, cela veut dire que l'écoute du RTS/CCTS a été faite sur la même communication courante. Par conséquent, Re_i calcule le débit de données R_{Re_iD} réalisable entre lui-même et le nœud D en utilisant toujours le RAAM. Tous les nœuds qui ont passé avec succès les deux étapes mentionnées ci-dessus sont considérés comme étant des relais potentiels pour la paire SD . Ces nœuds entrent alors dans une phase de sélection de relais (figure 3.1c).



Classe A_j	Débit $R_{SRe_i}-R_{Re_iD}$ Mbit/s
A_1	54-54
A_2	54-24
A_3	24-24
A_4	54-12
A_5	24-12
A_6	12-12

Tableau 3.1 : Les différentes classes (modes) de relais potentiel

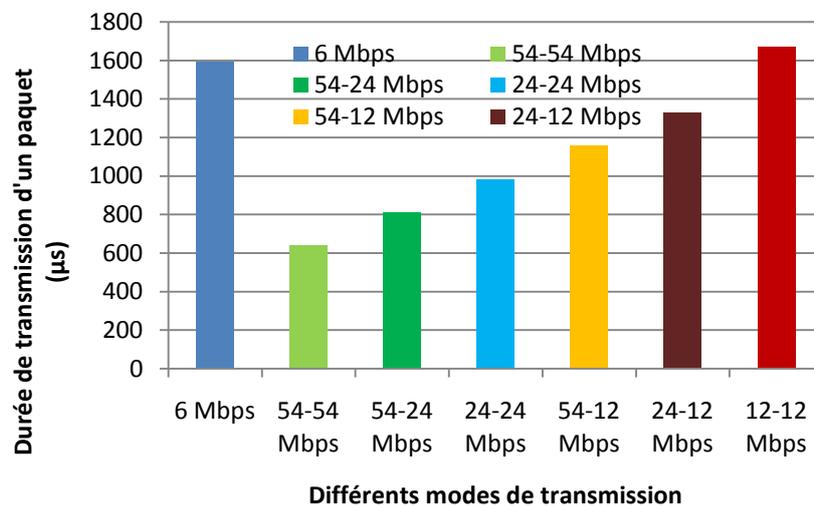


Figure 3.2 : Comparaison de la durée de transmission d'un paquet pour différents modes de transmission (coopératif et direct)

B. Phase de sélection de relais

Dans cette phase, les relais potentiels utilisent un mécanisme de résolution de contention afin de permettre au meilleur relais d'être le premier à accéder au canal. Le mécanisme de résolution de contention classe les relais potentiels en six classes en fonction de leurs débits R_{SRe_i} et R_{Re_iD} .

Notons que les six classes sont obtenues en dénombrant les combinaisons de débits possibles sur les deux sauts. Notre ensemble est composé de trois débits (élément), à savoir, 12, 24, 54Mbits/s. En raison des symétries, nous avons en fait six possibilités (tableau 3.1).

B.1. Classification des relais potentiels

Les classes sont présentées dans le tableau 3.1 par ordre croissant de la durée de transmission du lien relayé $S-Re_i-D$ (source-relais-destination). Chaque classe correspond à un mode de transmission coopératif (relayé). L'ordre de classement est obtenu en calculant la durée de transmission d'une trame avec différents modes relayés. La figure 3.2 montre la comparaison de la durée de transmission pour les différents modes de transmission coopératifs et le mode de transmission direct à 6Mbit/s. Tous les modes relayés (excepté le mode 12Mbit/s-12Mbit/s) ont une durée de transmission inférieure à celle de la transmission directe. Les relais potentiels qui appartiennent à la classe A_6 , n'améliorent pas le délai de transmission de la liaison directe. Par conséquent, ils ne sont jamais utilisés dans une transmission relayée. Notons que nous avons pris en compte dans nos calculs l'overhead introduit par les relais. Cet overhead comprend deux durées SIFS (Short Inter Frame Space) et la durée de transmission de la trame CFC (Clear For Cooperation) envoyée par le meilleur relais pour signaler sa participation à la coopération.

Pour chaque relais Re_i , la mesure du SINR ($SINR_{SRe_i}, SINR_{Re_iD}$) des signaux décrit la qualité de la liaison relayé $S-Re_i-D$ entre la source-relais-destination. Étant donné que les deux sauts sont importants pour les performances de bout en bout, chaque relais doit quantifier son adéquation comme relais actif en utilisant une fonction qui implique la qualité de la liaison des deux sauts. Deux fonctions intéressantes ont été proposées dans [BILR05]. Dans la première fonction, le minimum des deux valeurs est sélectionné, tandis que dans la seconde, la moyenne harmonique des deux valeurs est utilisée. La première fonction sélectionne le "goulot d'étranglement" des deux voies, tandis que la deuxième équilibre entre la qualité des deux liens. Les fonctions obtenues dans ces deux cas sont les suivantes :

$$h_i = \min\{SINR_{SRe_i}, SINR_{Re_iD}\} \quad (3.1)$$

$$h_i = 2 \times \left(\frac{SINR_{SRe_i} \times SINR_{Re_iD}}{SINR_{SRe_i} + SINR_{Re_iD}} \right) \quad (3.2)$$

Dans notre travail, nous avons mis en place ces deux fonctions mais nous n'utilisons que la deuxième fonction car elle prend en considération la qualité de canal des deux sauts.

B.2. Résolution de contention entre relais potentiels

Après classification, chaque relais potentiel Re_i calcule une valeur δ_i qui est inversement proportionnelle à la valeur de la fonction h_i selon:

$$\delta_i = \frac{k_{A_j}}{h_i} \quad (3.3)$$

$\delta_i \in [\delta_{min}, \delta_{max}]$, où δ_{min} est la valeur minimale de δ_i qu'un relais potentiel pourrait avoir. La constante k_{A_j} est choisie pour chaque classe de telle sorte que la valeur maximale de δ_i notée δ_{max} soit égale à $8\mu s$.

Par la suite chaque relais potentiel calcule une durée β_j :

$$\beta_j = (j - 1) \times (\delta_{max} + \varepsilon) \quad (3.4)$$

où j est l'indice de la classe du relais et ε représente le temps de propagation maximal. La durée β_j représente le délai que chaque relais potentiel doit attendre avant de déclencher son temporisateur δ_i . Notons que β_j a une valeur constante pour une classe donnée.

Ainsi, le temporisateur final que chaque relais potentiel dans chaque classe doit déclencher est : $T_i = \beta_j + \delta_i$ soit encore :

$$T_i = (j - 1) \times (\delta_{max} + \varepsilon) + \frac{k_{A_j}}{h_i} \quad (3.5)$$

D'après (3.5), les relais potentiels de la première classe déclenchent leurs temporisateurs δ_i immédiatement puisque β_0 est égal à zéro. Les relais potentiels de la seconde classe doivent attendre la durée β_1 qui est égale à $(\delta_{max} + \varepsilon)$ avant de déclencher le temporisateur δ_i . Ainsi les nœuds de la classe A_j sont favorisés par rapport aux nœuds de la classe A_{j+1} en ajoutant à chaque fois une durée β_{j+1} au temporisateur δ_i des nœuds de la classe A_{j+1} .

En général, il existe un compromis entre l'efficacité de la sélection de relais et la probabilité de collision. Une longue période de sélection de relais se traduit par une plus faible probabilité de collision, et vice versa. Cependant, une longue période de sélection affecte le gain de durée de transmission obtenue par la coopération. Ainsi, il est difficile de choisir le meilleur relais efficacement tout en conservant une faible probabilité de collision.

B.3. La sélection du meilleur relais

A partir des équations (3.3) et (3.6), nous pouvons remarquer que le temporisateur δ_{Re_b} du meilleur relais Re_b sera le premier à expirer.

$$h_{Re_b} = \max \{h_i\} \Leftrightarrow \delta_{Re_b} = \min \{\delta_i\} \quad i = [1, \dots, M - 2] \quad (3.6)$$

où h_{Re_b} est la valeur de h_i pour le meilleur relais Re_b et M est le nombre de nœuds dans le réseau.

Le meilleur relais Re_b envoie une trame CFC (Clear For Cooperation frame) pour indiquer sa volonté de participer à la transmission des données de S vers D (figure 3.3a). Les autres relais arrêtent la phase de sélection de relais une fois qu'ils observent que le canal est occupé (état du canal passe de idle à Busy). Ils mettent à jour leurs NAV (Network Allocation Vector) à la réception la trame CFC envoyée par Re_b . L'annulation de la phase de sélection de relais s'effectue dès que l'état du canal passe de libre à occupé au lieu d'attendre la fin de la trame CFC réduit la probabilité de collision entre les relais. Dans la section 3.2.5 nous présentons le format des trames de contrôle CFC et CCTS.

C. Le relayage des données

Quand la source S décode avec succès la trame CFC, une transmission coopérative est initiée après une durée SIFS. S envoie les données au meilleur relais Re_b avec le débit R_{SRe_b} et le relais transmet ce paquet immédiatement après une durée SIFS vers la destination D avec le débit R_{Re_bD} (figure 3.3b).

Après avoir réussi à décoder le paquet de données, D envoie une trame d'acquittement (ACK) directement à la source S (figure 3.3c). Dans le cas d'une collision entre relais de la même classe ou en l'absence de relais potentiels, la source envoie les données directement vers la destination sans coopération après une durée SIFS avec le débit R_{SD} .

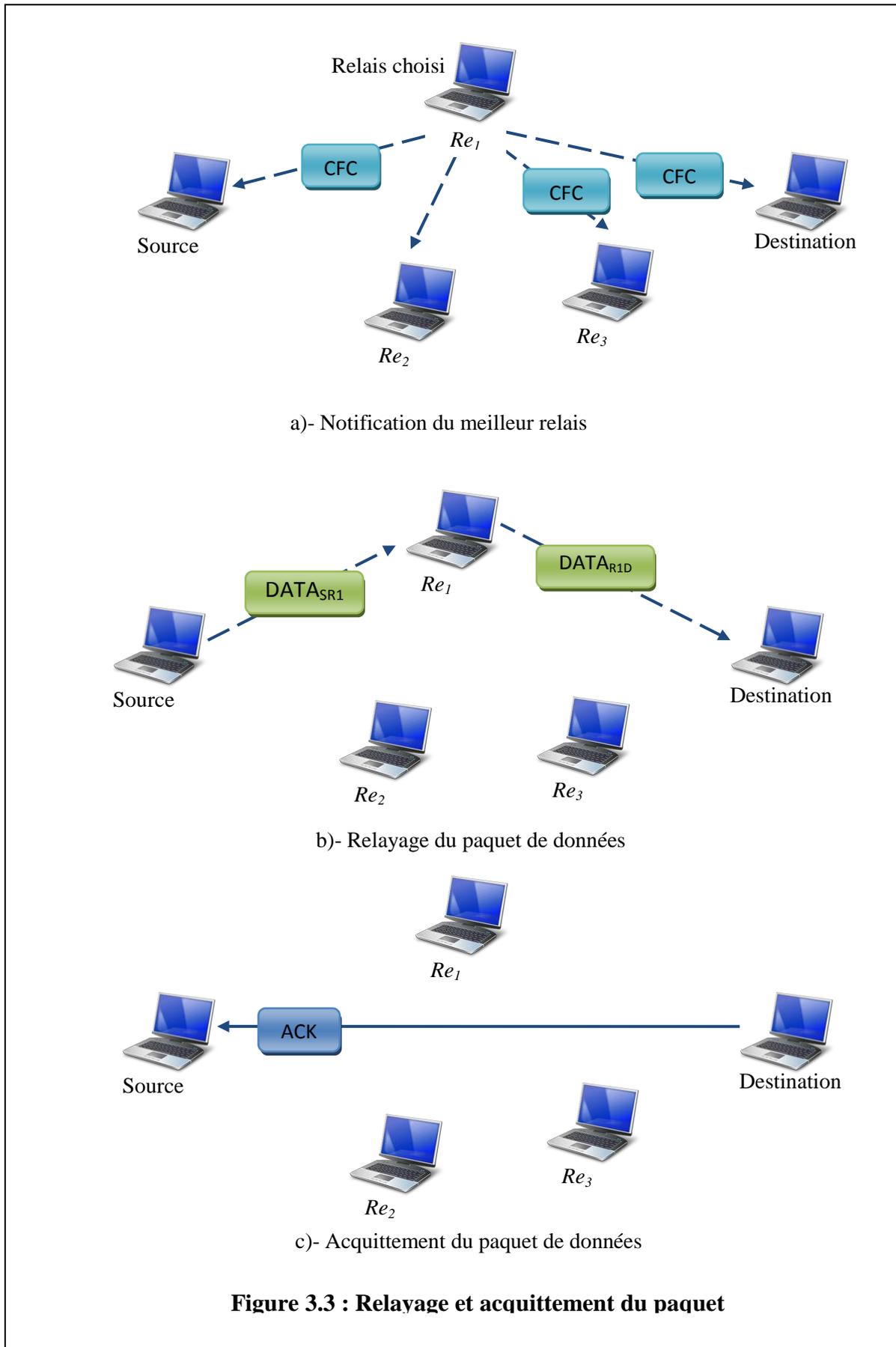


Figure 3.3 : Relayage et acquittement du paquet

3.2.2. Mécanisme d'adaptation du débit physique

Notre mécanisme d'adaptation de débit vise à sélectionner le débit physique le plus approprié pour chaque transmission de trame de données, entre deux nœuds. La sélection repose sur des mesures de SINR prises sur le signal des trames de contrôle reçues. L'estimation des informations d'état du canal (qui représente dans notre cas le SINR) et la sélection du débit sont faites au niveau de la source. Comme nous le savons, chaque débit physique correspond à une valeur de SINR seuil (SINR_{th}) qui garantit un certain taux d'erreur binaire, comme indiqué dans le tableau 3.2. Lorsque le SINR mesuré par un nœud B est égal ou supérieur à une valeur de SINR_{th} donnée, le nœud B peut recevoir avec succès la trame de données avec le débit qui correspond à ce seuil. Etant donné que le canal est supposé être symétrique, l'atténuation entre l'émetteur A et le récepteur B est la même dans les deux sens, d'où R_{AB} est égal à R_{BA} .

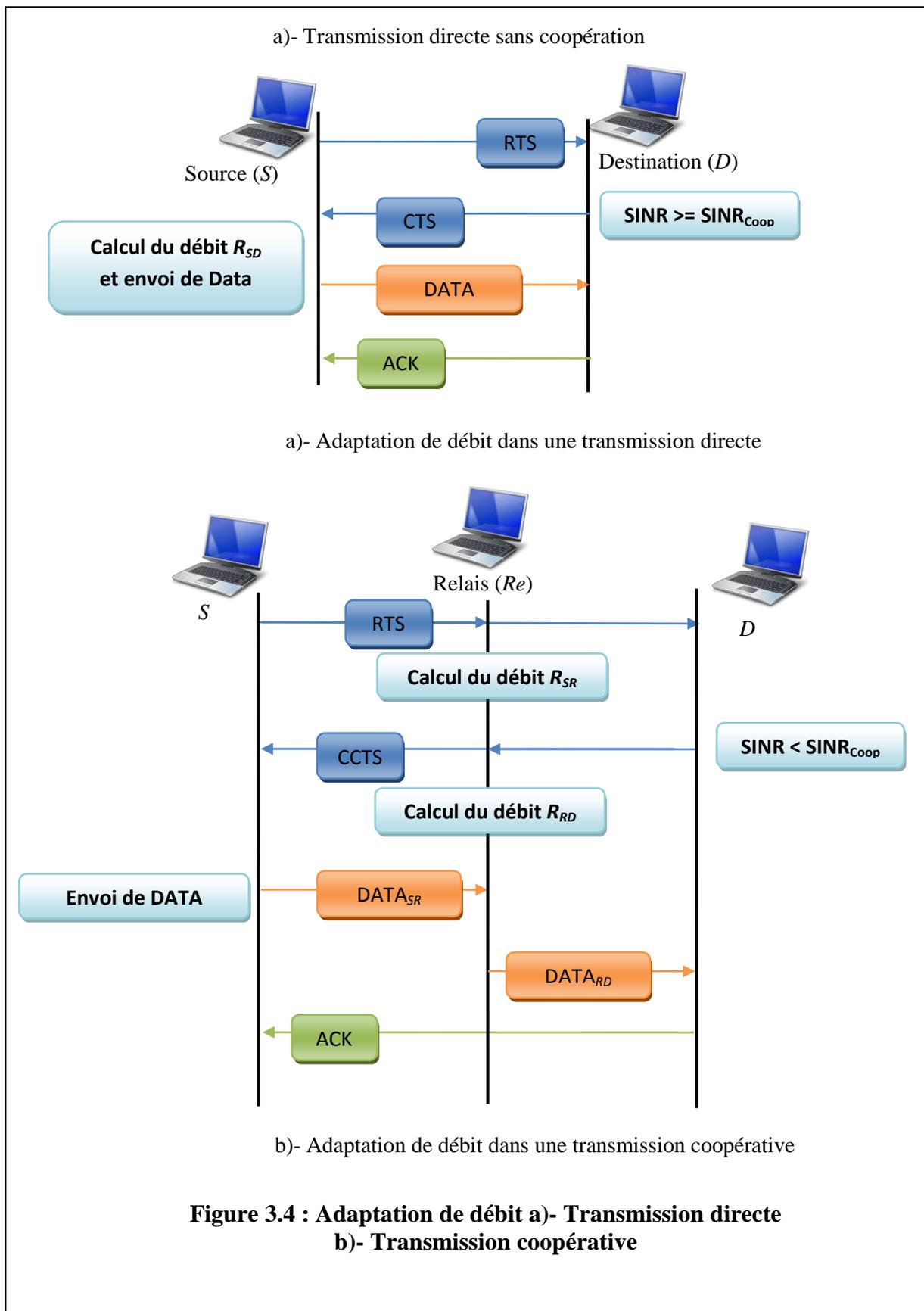
La source S transmet sa trame RTS à la destination D . Lorsque D reçoit la trame RTS, elle décide si la coopération est nécessaire ou pas. Lorsque la coopération n'est pas nécessaire, la destination envoie une trame CTS au nœud source. Lors de la réception de la trame CTS, la source S fait une estimation de la qualité du canal (SINR) pour la transmission de la prochaine trame de données. S choisit ensuite, en se fondant sur cette estimation, le débit le plus approprié R_{SD} entre elle-même et la destination (figure 3.4a). De la même manière, lorsque la coopération est nécessaire, D envoie une trame CCTS. Chaque relais potentiel qui a décodé la trame CCTS mesure le SINR et sélectionne le débit de R_{Re_iD} pour être potentiellement utilisé pour relayer les données vers la destination. Lorsque la source reçoit la trame CFC, envoyée par le meilleur relais Re_b , elle sélectionne le débit R_{SRe_b} entre elle-même et le relais Re_b . La figure 3.4 illustre le mécanisme d'adaptation de débit.

L'avantage de notre approche est triple. Tout d'abord, la sélection du débit est effectuée en utilisant des mesures de canal en temps réel. Cette approche est plus précise que celles qui utilisent l'historique des transmissions précédentes telles que le protocole ARF. Deuxièmement, effectuer l'adaptation du débit au niveau de l'émetteur permet un suivi plus précis des variations de canal par rapport aux mécanismes effectuant l'adaptation au niveau du récepteur, tels que le protocole RBAR. Troisièmement, l'acquisition de ces informations au niveau du récepteur nécessite de les transmettre à la source. Cela peut être coûteux en termes de ressources consommées dans la transmission de ces informations ainsi que de délai de transmission supplémentaire qui affecte la ponctualité de l'information. En résumé, notre approche combine deux points forts des deux types de mécanisme d'adaptation du débit : la caractéristique de Sender-based du protocole ARF et la caractéristique des mesures CSI en temps réel du protocole RBAR. En outre, le format de la trame de contrôle est conservé identique à celui du standard IEEE 802.11.

Notons que notre mécanisme peut être utilisé conjointement avec des protocoles Sender-based comme ARF afin de calculer le temps de réservation de canal pour la trame RTS.

Débit (Mbit/s)	SINR _{th} dBm	SINR _{th}
54 Mbit/s (QAM64)	25	316.2278
24 Mbit/s (QAM16)	15	31.6228
12 Mbit/s (QPSK)	8	6.3096
6 Mbit/s (BPSK)	5	3.1623

Tableau 3.2 : débit et SINR



3.2.3. Valeur du SINR seuil de la coopération ($SINR_{coop}$)

L'idée de base de notre protocole consiste à remplacer un lien direct avec un faible débit de données par deux liens coopératifs avec des débits plus élevés. Plus précisément, nous voulons améliorer les transmissions directes à 6Mbit/s en utilisant un schéma coopératif. Donc, la coopération est déclenchée lorsqu'un débit de données supérieur à 6Mbit/s n'est pas réalisable sur le lien direct. D'après le tableau 3.2, une transmission avec un débit de 12Mbit/s est réalisable uniquement si le SINR mesuré au niveau du récepteur est supérieur à 6,3096. Donc, nous utiliserons cette valeur pour le SINR seuil de la coopération. Par conséquent, la coopération est déclenchée dès que le SINR calculé est inférieur à ce seuil. Autrement, la transmission directe est utilisée.

3.2.4. Réserve et annulation du lien

Pour faire face au problème de stations cachées et pour améliorer la réutilisation spatiale, nous avons mis en place un nouveau mécanisme de NAV (Network Allocation Vector). Dans le mécanisme RTS/CTS défini dans le standard IEEE 802.11 un champ appelé *Duration field* est défini. Ce champ contient la valeur du temps, en microsecondes, à réserver sur le support sans fil pour la communication en cours. Les champs *Duration field* de RTS/CTS contiennent les valeurs de temps suivants :

$$Duration_{RTS} = 3 \times SIFS + T_{CTS} + T_{DATA} + T_{ACK} \quad (3.7)$$

$$Duration_{CTS} = 2 \times SIFS + T_{DATA} + T_{ACK} \quad (3.8)$$

où T_{DATA} , T_{CTS} , T_{ACK} représentent le temps nécessaire pour transmettre les trames : DATA, CTS et ACK, respectivement. Dans notre mécanisme, les valeurs de temps de $Duration_{RTS}$ et $Duration_{CTS}$ sont comme suit : étant donné que le nœud source S ne sait pas si la coopération est nécessaire avant de transmettre le RTS, il utilise un T_{DATA} calculé en considérant un débit de base qui correspond à 6 Mbit/s.

Cela maximise la durée pendant laquelle le canal est considéré comme étant dans un état occupé, mais cela n'a aucun impact sur les performances du protocole puisque cette valeur est mise à jour dans les trames CTS ou CFC selon que la coopération est nécessaire ou pas. Lorsque la coopération n'est pas nécessaire, le nœud destination D met à jour la valeur de T_{DATA} dans $Duration_{CTS}$ en fonction de R_{SD} et envoie une trame CTS. En revanche, lorsque la coopération est nécessaire, le nœud D envoie une trame CCTS avec la valeur du temps $Duration_{CTS}$ calculée dans (3.8) avec une durée T_{DATA} calculée selon le débit physique (PHY)

de base de 6Mbit/s. Après réception de la trame CCTS, les relais potentiels entrent dans le processus de sélection de relais. Quand un meilleur relais est sélectionné, il envoie une trame CFC avec un champ *duration field* mis à jour $Duration_{CFC}$:

$$Duration_{CFC} = 3 \times SIFS + T_{DATA_b} + T_{ACK} \tag{3.9}$$

où T_{DATA_b} résulte de la somme du temps de transmission des deux sauts : un saut de S vers Re_b et un deuxième saut de Re_b à D . Après avoir reçu avec succès la trame de données relayée par le nœud Re_b , D envoie une trame ACK pour accuser la réception des données et pour informer les nœuds voisins que le médium devient libre. Pour éviter une réservation de canal inutile faite par les trames de contrôle RTS ou CCTS, chaque nœud met à jour son NAV à chaque fois qu'il reçoit une trame de contrôle. Ainsi, aucun problème de NAV ne se pose. Le problème des stations cachées peut être évité, car (i) les trames de contrôle sont transmises avec le couple puissance-débit de base ; c.à.d. avec le débit PHY le plus bas et le niveau de puissance le plus élevé, d'où une portée de transmission plus grande, (ii) les cartes réseaux sans fil actuelles ont un niveau de sensibilité de puissance de réception (RX power sensivity level) élevé ce qui conduit à une portée de « carrier sensing » beaucoup plus grande que la portée de transmission. La figure 3.5 explique le nouveau mécanisme de NAV.

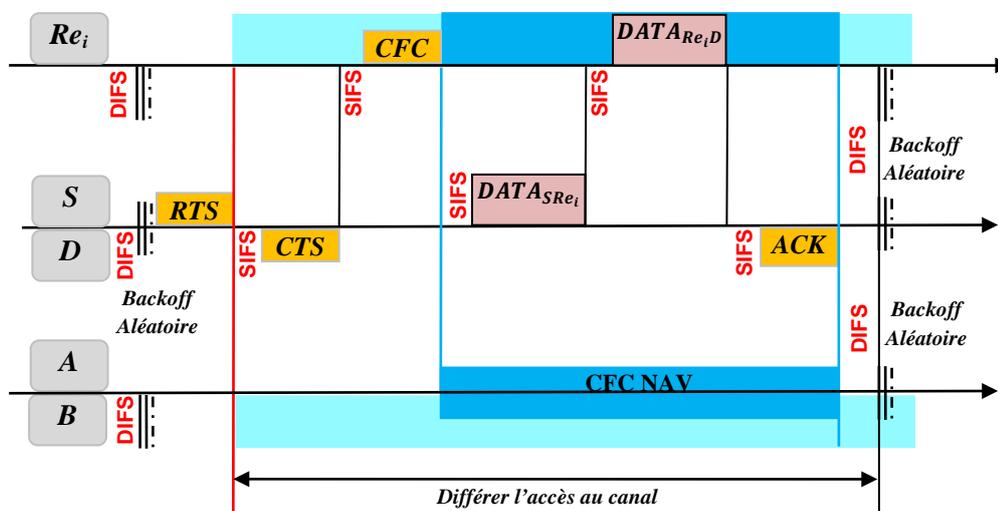


Figure 3.5 : Le mécanisme NAV

3.2.5. Format des trames dans le protocole RACT

Dans ce qui suit nous allons présenter les formats des deux trames introduites par notre protocole.

A. Format de la trame CFC

Dans la figure 3.6 nous donnons le format de la trame CFC. La trame possède le même format que la trame de contrôle RTS.

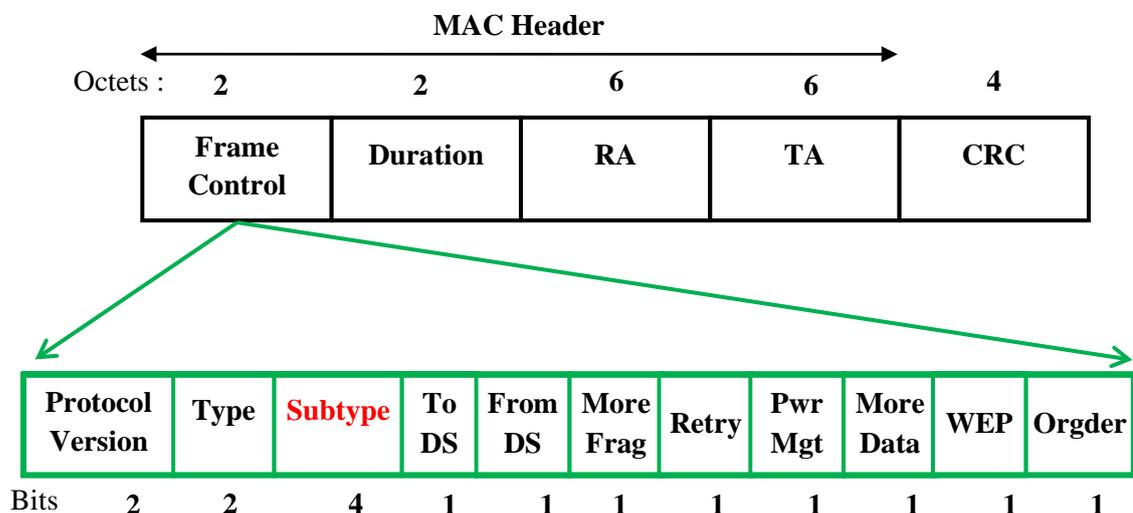


Figure 3.6 : Format de la trame de contrôle CFC

La trame contient les champs suivants :

-*Frame Control* : ce champ possède une taille de deux octets et contient dix sous-champs contenant les informations suivantes :

- *Protocol Version*: la version du protocole utilisé (2 bits)
- *Type* et *Subtype* : représente les 3 sortes de trames (Management, Control, Data) et leurs fonctions (2+4 bits)
- *To DS* et *From DS* : *DS=Distribution Service* (point d'accès).
 - ❖ *To DS* : (bit à 1) la trame est destinée au point d'accès pour qu'il la fasse suivre.
 - ❖ *From DS* (bit à 1) la trame vient du point d'accès.
- *More Fragments* : à 1 si les données sont fragmentées, à 0 si elles ne sont pas fragmentées ou s'il s'agit du dernier fragment (1 bit).
- *Retry* : à 1 s'il s'agit d'une retransmission (1 bit).

- *Power Management* : à 1 si la station est en mode d'économie d'énergie, à 0 si elle est active (1 bit).
- *More Data* : ce bit est également utilisé pour la gestion de l'énergie. Il est utilisé par le Point d'Accès pour indiquer que d'autres trames sont stockées pour cette station. La station peut alors décider d'utiliser cette information pour demander les autres trames ou pour passer en mode actif (1 bit).
- *WEP* : ce bit indique que le corps de la trame est chiffré suivant l'algorithme WEP.
- *Order* : si à 1 cela indique que la trame est envoyée en utilisant une classe de service strictement ordonnée.

Cependant, dans le standard IEEE 802.11, la partie *Frame Control* dans les trames de contrôle est différente de celles des autres types de trames. Tous les sous-champs du champ *Frame Control*, de " *ToDS* " à " *order* " sont à 0. Pour pouvoir créer notre trame CFC, nous avons choisi une valeur de *subtype* à partir d'une plage de valeur réservée allant de 0000 à 1001. Le reste des champs (sous-champs) de la trame est identique à ce que l'on trouve dans la trame RTS.

-*Duration* : le champ *Duration* contient la durée, en micro seconde, à réserver pour la communication courante ; c'est la valeur utilisée pour le calcul du NAV.

-*RA* : est l'adresse du récepteur destinataire de la trame. Ce champ contient l'adresse MAC de la source de données.

-*TA* : est l'adresse de la station qui transmet la trame CFC. Dans notre cas, cette adresse est l'adresse du meilleur relais.

-*CRC* : contrôle de redondance cyclique (ou *Cyclic Redundancy Check*) (4 octets) pour le contrôle d'intégrité de la trame.

B. Format de la trame CCTS

Le format de la trame CCTS est illustré dans la figure 3.7. Cette trame possède un format identique à celui de la trame de contrôle CTS. La seule valeur qui différencie les deux trames (CTS et CCTS) est la valeur du sous-champ *Subtype*. Comme pour le CFC, nous avons choisi pour le CCTS une valeur qui n'est pas utilisée par d'autres types de trames de contrôle. Cette valeur est comprise dans la plage de valeur réservée allant de 0000 à 1001. Une autre solution pourrait être envisagée pour annoncer la demande de coopération tout en gardant le format d'origine de la valeur du sous-champ *subtype* de la trame CTS. Cette solution consiste à ajouter un champ flag avec une taille d'un bit, ce bit indique qu'une coopération est demandée s'il est mis à 1, et zéro dans le cas contraire.

Tous les champs et les sous-champs de la trame CCTS ont été décrits dans la section précédente. Le champ *RA* prend l'adresse de la source des données *S*. Cette trame est envoyée par la destination qui est dans notre cas le demandeur de la coopération.

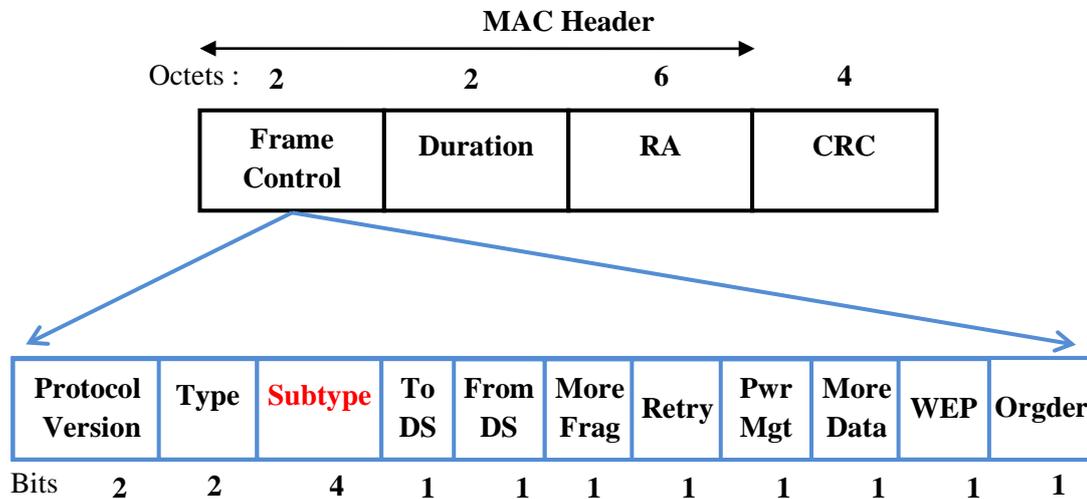


Figure 3.7 : Format de la trame de contrôle CCTS

3.3. Evaluation des performances

Les performances de notre protocole sont évaluées et comparées en utilisant le modèle étendu 802.11Ext du simulateur NS2. Nous évaluons le débit, le délai de bout en bout, la consommation totale d'énergie et le gain de la durée de transmission coopérative, avec plusieurs modes coopératifs, par rapport au mode de transmission direct.

La couche physique IEEE 802.11g est utilisée avec les débits : 6, 12, 24 et 54 Mbit/s. Nous étudions les performances de notre protocole dans un réseau ad hoc à un seul saut (single hop ad hoc network), où tous les nœuds peuvent s'entendre les uns les autres via au moins le débit de base (6Mbit/s). Nous avons choisi une topologie à grille avec trois sources sur le bord supérieur de la région et leurs destinations sont mises au bord inférieur. Les flux sont de type CBR. Les destinations sont positionnées de telle manière que les liens directs prennent en charge uniquement les transmissions avec le débit de base. La coopération est déclenchée lorsque le mode coopératif est activé.

3.3.1. Analyse des résultats

La figure 3.8 montre la séquence d'une transmission complète pour une trame dans les deux modes : sans coopération (mode direct avec le débit de base) et avec coopération. Nous pouvons voir que le gain de durée de transmission que l'on peut obtenir dépend de la rapidité de la transmission de $DATA_{SRe}$ et de $DATA_{ReD}$ sur les deux sauts $S-Re-D$. La figure 3.9 révèle la relation entre le gain de durée de transmission (en pourcentage : %) des transmissions coopératives pour plusieurs modes et taille des trames des données. Nous observons que plus la taille des trames augmente, plus le gain pour tous les modes augmente (sauf pour le mode 12-12Mbit/s). Cela est dû au fait qu'une trame de grande taille nécessite plus de temps pour être transmise avec une transmission directe à 6Mbit/s qu'avec des transmissions coopératives avec des débits élevés. De plus, les modes les plus rapides donnent un gain plus élevé que les modes lents puisqu'un débit élevé donne une durée de transmission plus courte qu'avec un débit faible. On remarque que seul le mode 12-12Mbit/s a un gain négatif. Cela est dû au fait que la durée de transmission coopérative ($DATA_{SRe}$ et $DATA_{ReD}$) plus le temps d'overhead introduit par la trame CFC et par les durées SIFS ajoutées est supérieure à la durée d'une transmission directe avec le débit de base, comme nous pouvons le voir dans la figure 3.8.

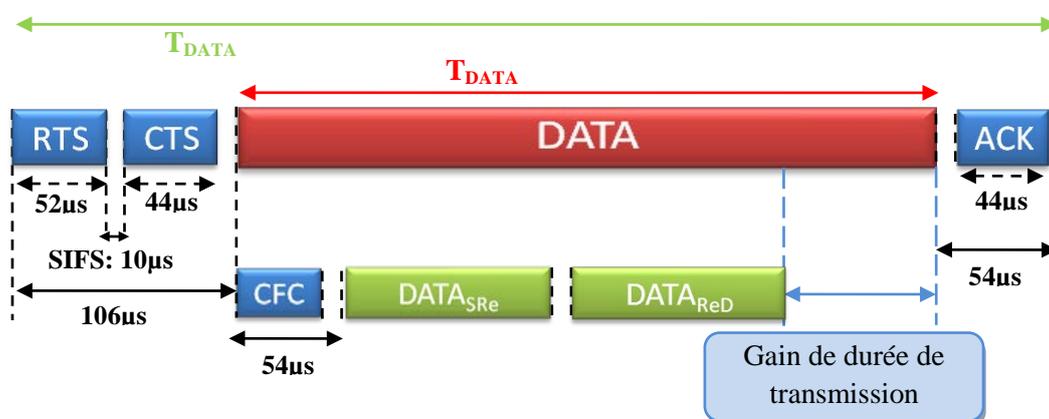


Figure 3.8 : Séquence de transmission d'une trame

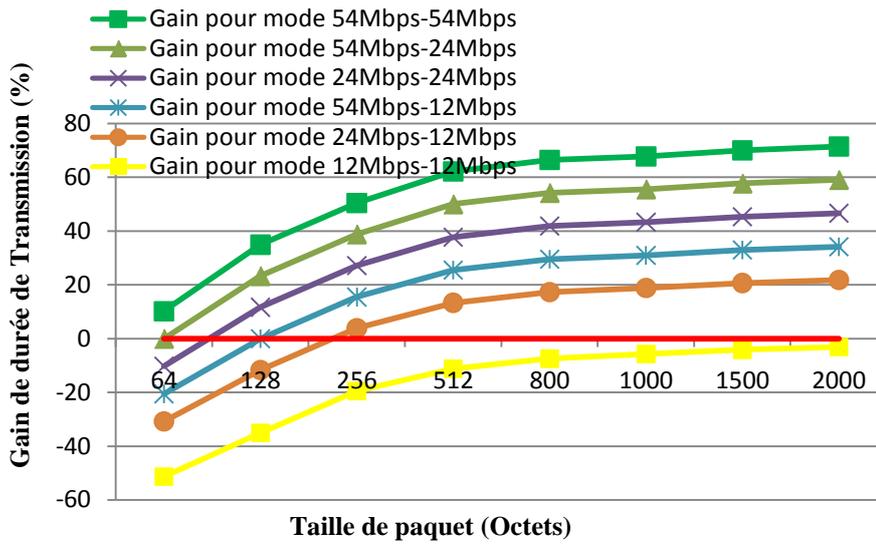


Figure 3.9 : Gain de durée de transmission (%) vs. taille de paquet

En outre, nous pouvons remarquer sur cette figure que les combinaisons de débits de données ne sont pas toutes bénéfiques. Le gain obtenu peut atteindre 71% avec le mode 54-54Mbit/s dans le standard IEEE 802.11g et peut atteindre 75% dans la norme IEEE 802.11b avec le mode coopératif 11-11Mbit/s. Notez que les résultats de la figure 3.9 sont obtenues analytiquement et sont confirmés par les résultats de simulation.

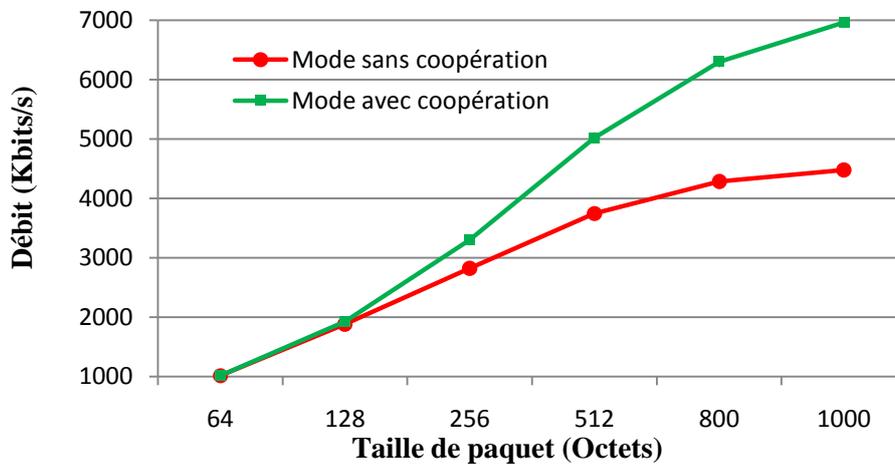


Figure 3.10 : Débit vs. taille de paquet

La figure 3.10 donne la comparaison des débits lorsque la taille des trames augmente pour les différents modes (avec et sans coopération). Nous pouvons remarquer que pour les trames de grandes tailles le protocole RACT surpasse le protocole standard IEEE 802.11. Néanmoins, pour les petites tailles de trames, le protocole proposé se comporte exactement comme le standard. L'explication de ce comportement vient du fait que notre protocole ajoute la transmission d'une trame de contrôle supplémentaire (CFC) pour annoncer la participation

du relais à la coopération et ajoute, en plus, deux intervalles SIFS. Ainsi, il augmente l'overhead (surcharge). Pour des trames de petite taille, cet overhead affecte le temps de transmission global et annule les bénéfices de la coopération. Lorsque la taille des trames dépasse un certain seuil, les avantages de la transmission avec coopération annule l'overhead, et nous pouvons voir une amélioration dans le débit global. Cette amélioration est plus élevée lorsqu'on augmente la taille des trames. L'amélioration du débit global dépend aussi du mode choisi dans la transmission coopérative.

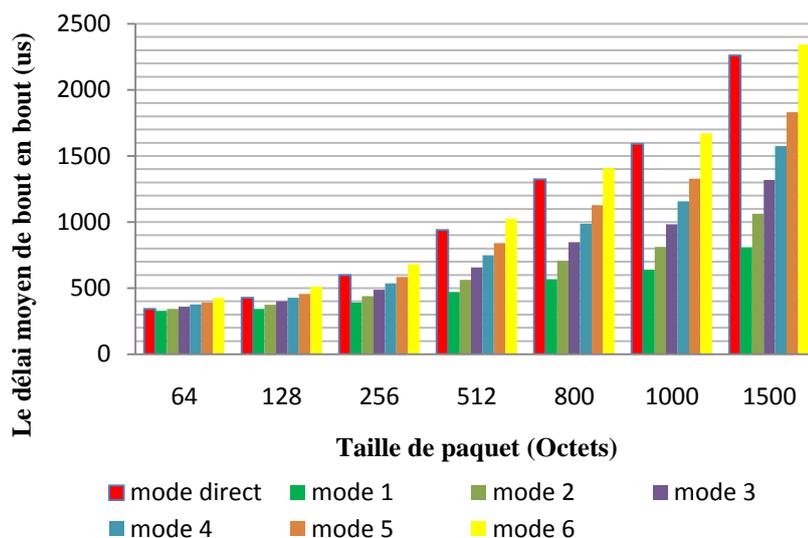


Figure 3.11 : Le délai moyen de bout en bout vs. taille de paquet

La figure 3.11 compare le délai moyen de bout en bout pour les modes relayés avec le mode direct pour différentes tailles de trames. Le délai de bout-en-bout fait ici référence à la durée moyenne nécessaire à transmettre une trame Data à travers le réseau de la source à la destination.

$$delay = T_D - T_S \quad (3.10)$$

où T_D est l'instant de réception de la trame à la destination et T_S , l'instant d'émission de la trame par la source. Nous remarquons qu'avec l'augmentation de la taille des trames presque tous les modes ont un meilleur délai que le mode non-coopératif, à l'exception du mode 6 qui représente la transmission à deux sauts avec les débits 12-12Mbit/s. Ce mode a un gain négatif, c'est pour cette raison que le délai est plus grand que celui du mode direct.

La figure 3.12 donne la consommation totale d'énergie pour les différents modes avec différentes tailles de trames calculée pour un réseau de 12 nœuds. La consommation totale d'énergie est définie comme la somme de l'énergie utilisée par les interfaces réseaux pour transmettre et recevoir toutes les trames de tous les nœuds du réseau.

Nous observons qu'après un certain seuil tous les modes consomment moins d'énergie que le mode non-coopératif, sauf pour le mode 12-12Mbit/s. En effet, le gain de durée de transmission obtenue pour les trames de petites tailles n'est pas significatif. En outre, puisque le mode direct utilise un débit de base, le temps de transmission et de réception des trames de données est plus grand que dans les modes relayés. Le mode direct consomme donc plus d'énergie que le mode relayé à l'exception du mode 6. Ce mode a un gain négatif comme nous l'avons vu dans la figure 3.9. Notons que la consommation totale d'énergie dépend aussi du nombre de nœuds dans le réseau, c'est ce que nous avons trouvé dans la figure 3.13 avec 30 stations. Plus le nombre de nœuds augmente dans le réseau plus le gain en énergie diminue. Cela est dû au fait que la consommation d'énergie en réception pour les trames CFC augmente avec le nombre de nœuds.

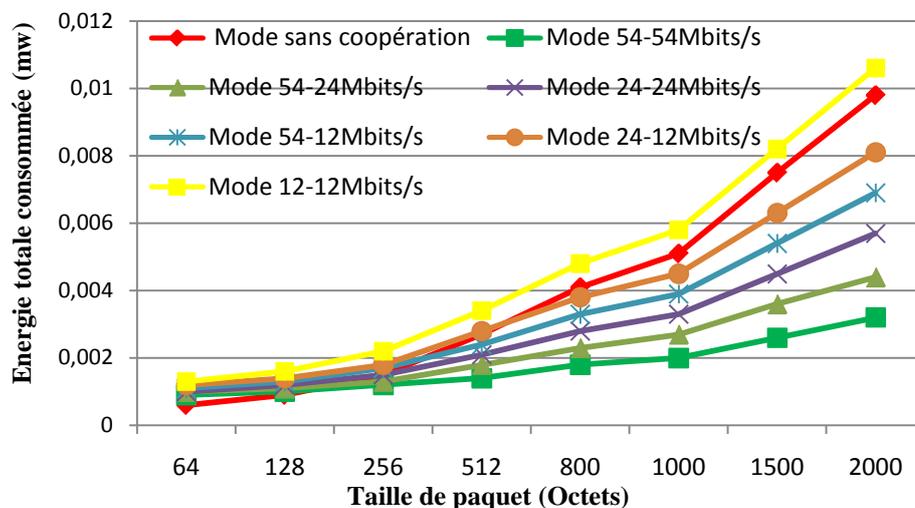


Figure 3.12 : Energie totale consommée (12 nœuds) vs. taille de paquet

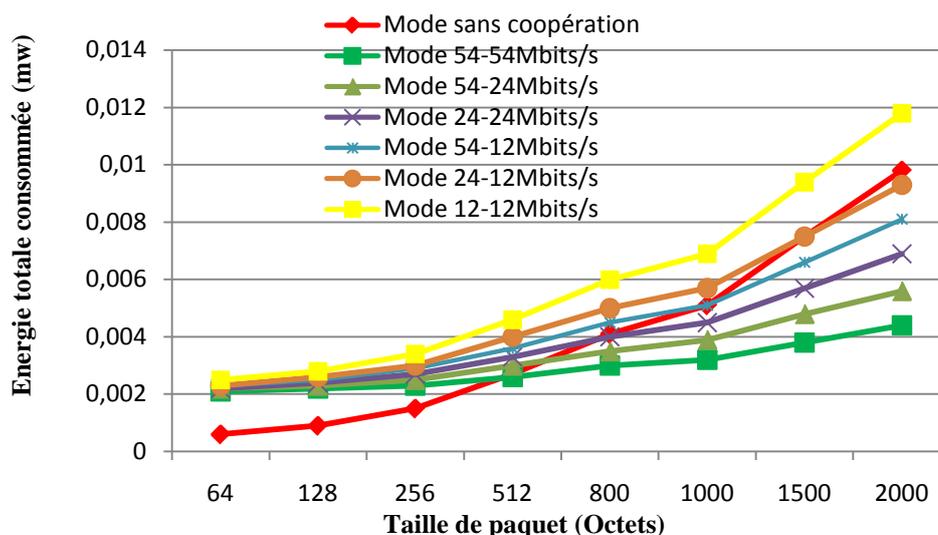


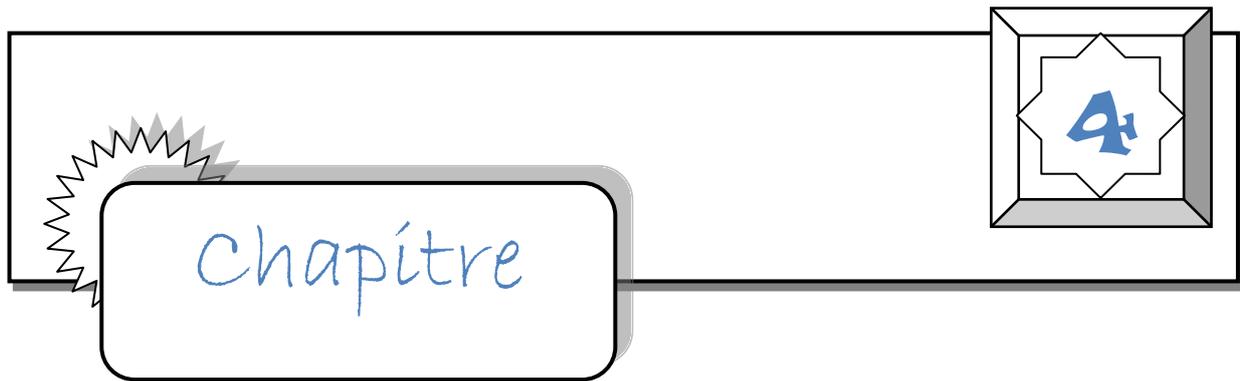
Figure 3.13 : Énergie totale consommée (30 nœuds) vs. taille de paquet

Outre les améliorations qui ont été citées précédemment (le débit, la consommation d'énergie et le délai), d'autres améliorations pourraient être obtenues comme la réduction significative de l'interférence entre les "cellules" ad-hoc. Nous entendons par interférence entre cellule, des nœuds ad-hoc qui ne peuvent pas communiquer directement entre eux mais qui peuvent interférer. Nous y reviendrons dans le chapitre 6. Avec l'amélioration du débit global, nous pouvons réduire le temps moyen d'utilisation du canal par chaque station pour transférer une certaine quantité de trafic sur le réseau. Par conséquent, les interférences entre deux cellules ad-hoc utilisant le même canal radio peuvent être réduites. En outre, une amélioration de la réutilisation spatiale est possible dans le sens où les stations voisines peuvent initier une nouvelle transmission plus tôt qu'elles ne le feraient s'il n'y avait pas coopération. Une autre amélioration importante concerne les stations qui connaissent de mauvaises conditions de canal. Elles ont probablement un taux d'erreur important si elles choisissent la transmission directe. Mais, avec la transmission coopérative, la qualité du signal sera meilleure et le taux d'erreur réduit. De plus, l'anomalie de l'IEEE 802.11 [FRBD03] causée par les nœuds à faible débit peut être réduite. De plus, notre protocole ne nécessite aucune modification des trames de contrôle existantes, ainsi il maintient la compatibilité du format des trames avec le standard IEEE 802.11.

3.4. Conclusion

Un nombre important de protocoles de coopération a été proposé dans les réseaux sans fil. Cependant, la plupart des travaux précédents ont porté sur l'augmentation de la diversité spatiale, ou sur l'analyse du gain de la coopération, ou encore sur les mécanismes de sélection de relais. La sélection du débit dans le mode de relayage n'a pas été examinée de manière approfondie. En outre, l'utilisation de la coopération en conjonction avec un algorithme d'adaptation de débit approprié n'a été traitée que dans quelques travaux. Dans ce chapitre, nous avons proposé un nouveau protocole de coopération avec une sélection de relais distribuée et l'adaptation du débit physique, dans laquelle des paires émetteur-récepteur qui subissent une mauvaise qualité de lien sont assistés par le meilleur relais, convertissant une transmission directe à faible débit en une transmission coopérative avec des niveaux de débits élevés. La sélection de relais et l'adaptation de débit sont réactives vis-à-vis des variations dynamiques du canal et de la topologie du réseau. Les résultats des simulations montrent que l'on peut améliorer considérablement les performances du protocole MAC IEEE 802.11.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter notre deuxième contribution sur les protocoles coopératifs. Ce protocole est une amélioration du protocole présenté dans ce chapitre.



4. PRACT : Power and Rate Adaptation with Cooperative Transmission

4.1. Introduction

La réduction de la consommation d'énergie est un enjeu majeur dans les réseaux sans fil ad-hoc. Les périphériques sans fil, tels que les ordinateurs portables, sont alimentés par des batteries à capacité limitée. Une approche efficace pour économiser de l'énergie consiste à réduire le niveau de puissance de transmission autant que possible. Un nœud est autorisé à transmettre avec le niveau de puissance minimal qui permet encore une bonne transmission.

La consommation d'énergie dépend aussi du débit de la couche physique (PHY) : de toute évidence, lorsque le débit PHY de données augmente, le temps de transmission des trames est réduit, ce qui entraîne une réduction dans la consommation d'énergie au niveau de la transmission et de la réception (nous donnons dans 4.2 la relation entre la consommation d'énergie et le débit PHY). Par conséquent, pour réduire la consommation d'énergie, nous pouvons soit réduire le niveau de puissance d'émission, soit transmettre à des débits PHY plus élevés. Toutefois, dans les réseaux sans fil multi-débit, il existe une relation entrelacée entre le niveau de puissance d'émission et le débit PHY de données. L'augmentation du niveau de puissance d'émission permet de réduire le taux d'erreur de bit (BER : Bit Error rate). Elle offre ainsi la possibilité d'augmenter le débit PHY de données d'une liaison sans fil, mais, en contrepartie, plus d'énergie est consommée. Nous y reviendrons dans le paragraphe 4.3. En revanche, la réduction du niveau de puissance d'émission peut réduire le débit de transmission, en supposant que le BER doit être inférieur à un certain seuil.

Ainsi, le contrôle de la puissance de transmission (TPC : Transmit Power Control) et l'adaptation du débit (RA : Rate Adaptation) doivent être considérés conjointement afin d'atteindre une efficacité énergétique de transmission de données tout en augmentant le débit PHY.

Cependant, dans les réseaux sans fil IEEE 802.11 multi-débit, les nœuds affectés par les perturbations du canal sans fil, telles que l'atténuation, les réflexions ainsi que d'autres formes d'interférences doivent transmettre avec le débit PHY minimum et la puissance

maximale afin de garantir des transmissions réussies. Ces nœuds à faible débit de données affectent le débit global du réseau. Contre ce problème¹ de dégradation du débit global des solutions fondées sur le contrôle de puissance et/ou l'adaptation de débit sont limitées. Un moyen efficace pour faire face à ce problème est d'utiliser des transmissions coopératives (CT : Cooperative Transmissions). Dans un mode de transmission coopérative, les paires émetteur-récepteur qui affrontent de mauvaises qualités de liaisons sont assistés par des stations relais sélectionnées au voisinage des deux nœuds de sorte que le lien direct à faible débit PHY soit remplacé par un lien relayé (coopératif) à deux sauts avec des débits élevés.

Dans la littérature, on trouve de nombreux travaux qui ont proposé des protocoles combinant la coopération avec des mécanismes de contrôle de puissance ou d'adaptation de débit. Dans [Guo09], les auteurs ont utilisé un mécanisme coopératif combiné avec un mécanisme d'adaptation de débit similaire au mécanisme de [HoVB01], mais le contrôle de puissance n'a pas été considéré. En revanche, dans [SzZh08], le régime coopératif est combiné avec un mécanisme TPC, mais les auteurs n'ont pas considéré le RA. Cependant, afin de réduire la consommation d'énergie tout en augmentant le débit du réseau et en raison du compromis inhérent entre la puissance d'émission et le contrôle du débit, contrôle de puissance et adaptation du débit doivent être considérés conjointement avec la coopération. C'est en cela que notre proposition se distingue des solutions proposées dans la littérature.

Dans notre proposition précédente (chapitre 3), nous avons proposé un protocole qui combine un mécanisme d'adaptation de débit et un mécanisme de coopération afin d'améliorer le débit global. En revanche dans ce chapitre, nous présentons PRACT (Power and Rate Adaptation with Cooperative Transmission) : un protocole coopératif au niveau MAC (Medium Access Control) pour les réseaux ad-hoc. Le protocole PRACT combine le contrôle de puissance TPC, l'adaptation du débit RA et les transmissions coopératives (CT : Cooperative Transmissions). L'objectif de PRACT est d'atteindre une efficacité d'énergie pour la transmission des données tout en augmentant le débit global du réseau. L'idée principale de ce protocole est de permettre à chaque nœud de créer une table avec les combinaisons puissance-débit (Power-rate table) optimales, en se fondant uniquement sur les spécifications de la carte d'interface réseau (NIC : Network Interface Card). En échangeant les trames de contrôle RTS/CTS et en recherchant dans la table puissance-débit, les nœuds choisissent la stratégie de transmission la plus adaptée (qui consiste à sélectionner la combinaison puissance-débit la plus optimale) pour chaque transmission de trames de données, ainsi que le mode de transmission (direct ou coopératif).

Les améliorations de notre protocole par rapport aux autres protocoles de la littérature sont les suivantes : avec les mécanismes typiques de TPC (ou RA), un seul paramètre est ajusté dans la stratégie de transmission. En revanche, notre système permet de régler les deux paramètres (puissance et débit). Un autre apport important est que nous combinons notre

¹ Ce problème vu dans les chapitres précédents est connu dans la littérature sous le nom « rate anomaly problem ».

mécanisme d'adaptation de puissance et de débit (TPRC : Transmit Power and Rate Control) avec un mécanisme de coopération. Ainsi, lorsque la qualité de la liaison directe est faible et les mécanismes TPRC typiques ne peuvent pas aider davantage, la coopération est utilisée. En outre, le choix de la stratégie de transmission et le mode de transmission (direct ou relayé) sont fondés sur des mesures faites en temps réel sur la liaison et en utilisant uniquement les informations locales disponibles. Par conséquent, le choix est plus précis et réactif face aux variations des conditions de la liaison et aucune information supplémentaire n'est nécessaire. De plus, seul l'échange des trames de contrôle RTS/CTS est utilisé et aucune signalisation supplémentaire n'est nécessaire.

Les résultats des simulations révèlent une amélioration importante dans le débit global du réseau, ainsi que dans la consommation d'énergie avec le nouveau protocole par rapport au protocole sans contrôle de puissance et sans coopération. En outre, les résultats des simulations montrent que notre système délivre plus de données par unité de consommation d'énergie que le standard IEEE 802.11. Nous démontrons aussi que les interférences "intercellulaires" peuvent être réduites, ce qui a un impact sur le débit global du réseau. Nous confirmons ces hypothèses par le biais de simulations. Les évaluations des performances de PRACT sont faites dans le chapitre 5.

Par la suite, nous allons montrer la relation entre le débit physique et la consommation d'énergie et la puissance de transmission.

4.2. Relation entre la consommation d'énergie et le débit physique

Nous allons maintenant caractériser la consommation d'énergie en fonction du débit physique R pour une demande de trafic B (Mbit). Prenons l'IEEE 802.11b en mode RTS/CTS comme un exemple. Les trames de contrôle RTS, CTS et la trame ACK dans IEEE 802.11 sont toutes transmises au débit de base, soit 1Mbit/s, alors que les trames de données sont transmises au débit physique sélectionné par la source. Ici, nous définissons l'énergie moyenne consommée comme la consommation moyenne d'énergie calculée sur la période d'observation. Pour plus de simplicité, nous utiliserons le terme "énergie consommée" au lieu d' "énergie moyenne consommée".

De même, nous ne considérons que la consommation d'énergie en émission. Cette simplification est justifiée par le fait que l'énergie consommée en émission est plus importante qu'en réception, et que, contrairement à l'énergie consommée en réception, l'énergie consommée en émission dépend de la puissance de transmission instantanée. Si la puissance de transmission instantanée augmente, la consommation d'énergie augmente aussi, et vice-versa. De plus, la consommation d'énergie en réception ne dépend que de la durée de

réception. Pour une carte réseau donnée, l'énergie consommée en réception pour une durée de réception t est toujours constante.

L'énergie consommée $E_n(R)$ sur un lien donné avec un besoin de trafic B et un débit physique R est donnée par :

$$E_n(R) = \left(\frac{B}{\text{packet_size}} \right) \times [P_{tx_basic_rate} \times (t_{RTS} + t_{CTS} + t_{ACK} + t_{PLCP}) + P_{tx} \times t_{DATA}(R)] \quad (4.1)$$

où packet_size est la longueur de la charge utile de chaque trame de données, t_{RTS} , t_{CTS} , t_{ACK} représentent les durées de transmission d'une trame RTS, d'une trame CTS, et d'une trame ACK, respectivement ; t_{PLCP} est la durée de transmission de l'en-tête physique d'une trame de données, $t_{DATA}(R)$ celle d'une trame de données avec un débit R . $t_{DATA}(R)$ est donnée par :

$$t_{DATA}(R) = (\text{packet_size} + \text{overhead_size})/R \quad (4.2)$$

où overhead_size est la longueur de l'entête d'une trame de données. $P_{tx_basic_rate}$ est la puissance de transmission de l'overhead de la couche physique (t_{PLCP}) et de la couche MAC (t_{RTS} , t_{CTS} , t_{ACK}), sa valeur est plus élevée de 3 dB par rapport au niveau requis pour les données P_{tx} , de manière à ce que l'overhead des paquets soit reçu avec un taux d'erreur binaire très faible. Les overheads des couches physique et MAC sont constants lors de la transmission d'une trame, leurs consommations d'énergie sont fixes pour chaque transmission, quel que soit le débit utilisé pour la partie DATA (charges utiles de données). Pour une demande de trafic donnée, le nombre total de transmissions est presque fixe, ce qui donne un temps d'overhead fixe et une consommation d'énergie fixe par unité de temps (par exemple 1 s). Par conséquent, on ne considère que l'énergie de la trame de données:

$$E_n(R) = \left(\frac{B}{\text{packet_size}} \right) \times (P_{tx} \times t_{DATA}(R)) \quad (4.3)$$

On remplace $t_{DATA}(R)$ par sa valeur :

$$E_n(R) = \left(\frac{B}{\text{packet_size}} \right) \times (P_{tx} \times (\text{packet_size} + \text{overhead_size})/R) \quad (4.4)$$

De la dernière formule nous pouvons déduire la relation qui lie la consommation d'énergie E_n et le débit physique R . Plus le débit PHY de données est élevé, plus la

consommation d'énergie est réduite. Il existe une relation inversement proportionnelle entre le débit PHY et l'économie d'énergie.

4.3. Relation entre la puissance de transmission et le débit physique

Dans les communications sans fil, le taux d'erreur binaire (BER) doit être typiquement inférieur à un certain seuil. Sinon, le nombre de retransmissions de paquets peut être intolérablement élevé. Cela implique que les différents débits PHY (ou différentes tailles de constellation de modulation) ont des exigences minimales de SNR appelées SNR seuil (SNR_{th}). D'une manière générale, plus le débit PHY est élevé, plus il est vulnérable aux erreurs du canal, entraînant une exigence de SNR_{th} supérieur et donc une puissance d'émission élevée. Prenant comme exemple le standard IEEE 802.11a [Ieee99], nous utilisons le tableau 4.1 pour caractériser le SNR_{th} et le RXSensing (le niveau de puissance d'entrée minimum) en fonction des débits PHY correspondants. Les cartes WIFI actuelles peuvent facilement permettre les différents niveaux de débit PHY proposés par la norme.

Soit C la vitesse de la lumière et soit f la fréquence centrale du spectre sans fil. En se fondant sur le modèle de propagation path-loss, la puissance au niveau du récepteur qui est à d mètres de la distance de référence d_0 (soit 1m dans un environnement général) de l'émetteur est:

$$P_{rx}^i = P_{tx}^i \times \left(\frac{C}{4\pi f d_0}\right)^2 \times \left(\frac{d_0}{d}\right)^k \quad (4.5)$$

que nous pouvons simplifier:

$$P_{rx}^i = P_{tx}^i \times \left(\frac{C}{4\pi f}\right)^2 \times \frac{1}{d^k} \text{ avec } d_0 = 1 \quad (4.6)$$

Où P_{tx}^i et P_{rx}^i sont, respectivement, la puissance de transmission de l'émetteur et la puissance du signal au niveau du récepteur lorsque le $i^{\text{ème}}$ débit PHY est utilisé. k est l'exposant du path-loss et sa valeur est comprise entre 2 et 5 ($2 \leq k \leq 5$).

Soit P_n le niveau de la puissance du bruit blanc gaussien additif (AWGN : additive white Gaussian noise). On note SNR_{th}^i le niveau minimum de SNR requis pour le $i^{\text{ème}}$ débit PHY (par exemple SNR_{th}^1 (dB) = 6,02 dB dans le tableau 4.1). La puissance d'émission minimale pour permettre le débit R_i est donnée par :

$$P_{tx}^i \geq P_n \times d^k \times SNR_{th}^i \times \left(\frac{4\pi f}{C}\right)^2 \quad (4.7)$$

La puissance du signal 802.11a a un intervalle dynamique très large, c'est pour cela que le SNR est généralement exprimé en échelle logarithmique (décibel). Par définition, le SNR(dB) est égal à 10 fois le logarithme du rapport des puissances.

$$SNR_{th}^i(dB) = 10 \times \log_{10}(SNR_{th}^i) \quad (4.8)$$

ce qui implique que :

$$SNR_{th}^i = 10^{(1/10) \times SNR_{th}^i(dB)} \quad (4.9)$$

Donc, la puissance d'émission minimale peut être exprimée en utilisant les variantes suivantes:

$$P_{tx}^i \geq P_n \times d^k \times 10^{(1/10) \times SNR_{th}^i(dB)} \times \left(\frac{4\pi f}{C}\right)^2 \quad (4.10)$$

Ou

$$P_{tx}^i(dB) \geq P_n(dB) \times SNR_{th}^i(dB) + 10k \times \log_{10}(d) + PL(d_0) \quad (4.11)$$

où $PL(d_0) = 20 \log_{10}(4\pi f / C)$ est le path-loss à la distance de référence d_0 .

Selon les valeurs des SNR_{th} disponibles dans le tableau 4.1 et selon l'équation 4.10, nous pouvons exhiber la relation entre la puissance d'émission et le débit PHY. Nous pouvons voir dans la figure 4.1 qu'un débit PHY plus élevé exige un niveau de SNR_{th} plus élevé donc un niveau de puissance d'émission plus élevé pour permettre un décodage réussi au niveau du récepteur.

Pour un BER inférieur ou égal à 10^{-5} , le SNR minimum requis pour proposer le débit PHY correspondant est :

Mode	Débit PHY Mbit/s	RXSensitivity	SNR _{th} (dB)	SNR _{th}	Modulation	Taux de codage
1	6	-82	6.02	3,9994475	BPSK	1/2
2	9	-81	7.78	5,99791076	BPSK	3/4
3	12	-79	9.03	7,99834255	QPSK	1/2
4	18	-77	10.79	11,994993	QPSK	3/4
5	24	-74	17.04	50,5824662	16-QAM	1/2
6	36	-70	18.80	75,8577575	16-QAM	3/4
7	48	-66	24.05	254,097271	64-QAM	2/3
8	54	-65	24.56	285,759054	64-QAM	3/4

Tableau 4.1 : Les différentes valeurs de Débits PHY et leur SNR minimal requis dans le standard IEEE 802.11a

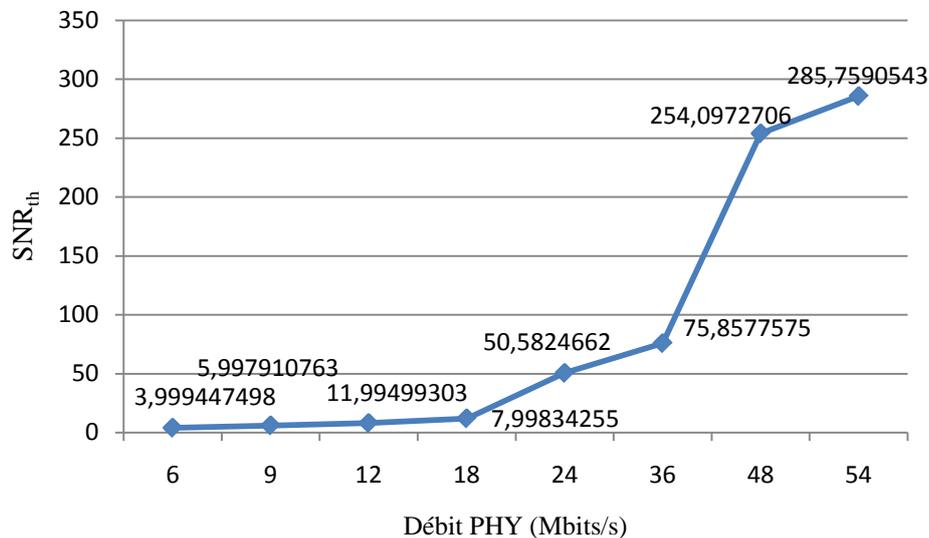


Figure 4.1 : La courbe SNR_{th}-débit

4.4. Description du protocole

Afin d'atteindre une efficacité énergétique de transmission de données tout en augmentant le débit global du réseau, PRACT utilise un mécanisme d'adaptation de puissance et de débit (TPRC : Transmit Power and Rate Control) combiné avec un mécanisme de communication coopérative (CT : Cooperative Transmission). Le protocole possède deux caractéristiques principales. La première est la stratégie de transmission qui consiste à sélectionner le niveau de puissance et le débit PHY à partir de la table puissance-débit. La deuxième caractéristique clé est le mode de transmission (Transmission scheme) qui peut être soit direct ou relayé, en fonction de la qualité de la liaison. Donc, l'idée est d'ajuster, pour chaque transmission de trames de données, à la fois la puissance

d'émission et le débit PHY. Si nécessaire une transmission coopérative est initiée entre les nœuds source et destination afin d'améliorer la qualité du lien direct.

4.4.1. La stratégie de transmission dans les réseaux WLAN 802.11

La couche PHY du standard IEEE 802.11 fournit de multiples débits de transmission en employant différentes modulations et différents types de codage de canal. Par exemple, la couche PHY de l'IEEE 802.11b [Ieee00] [Ieee00] fournit 4 débits allant jusqu'à 11 Mbit/s dans la bande 2,4 GHz, tandis que la version 802.11a [Ieee99] fournit 8 débits allant jusqu'à 54 Mbit/s dans la bande de 5 GHz. La norme IEEE 802.11g [Ieee06] offre 12 débits avec un débit maximal de 54 Mbit/s dans la bande 2,4 GHz. De plus, un nombre grandissant de produits commerciaux 802.11 prend en charge plusieurs niveaux de puissance de transmission. Par exemple, l'adaptateur sans fil Alfa AWUS036NH [Alfa00] propose plusieurs niveaux de puissance d'émission allant de 0 dBm à 33dBm (2000mW).

Sélectionner le niveau de puissance d'émission et le débit PHY et/ou la taille des paquets de données est connu sous le nom de stratégie de transmission (transmission-strategy). Différentes stratégies de transmission pourraient être utilisées entre deux nœuds communicants. Cette variété de choix est appelée diversité de stratégie de transmission (transmission-strategy diversity). Considérant un rapport signal à bruit plus interférences donné (SINR : Signal to interference and Noise Ratio), des paquets de données de petite taille ont une grande probabilité d'être reçus correctement comparé à des paquets de grande taille. Par conséquent, l'adaptation de la taille des paquets aux conditions de liaison peut améliorer la performance globale du système. Toutefois, les auteurs de [AbJT03] ont démontré que le partitionnement de paquet de grande taille (appelé fragmentation dans la norme IEEE 802.11) pour s'adapter à la qualité de liaison apporte un gain faible et qu'il est plus approprié d'adapter le débit de données que d'adapter la taille des paquets. Ainsi, dans ce document, nous ne considérons pas l'adaptation de la taille des paquets dans la stratégie de transmission.

4.4.2. Table puissance-débit

Dans le protocole PRACT, chaque nœud crée sa table avec les combinaisons puissance-débit optimales autorisées par le NIC. Afin d'obtenir cette table, le protocole MiSer, proposé dans [QCJS03, QiCS07], nécessite l'acquisition précise de nombreux paramètres concernant la topologie du réseau, la propagation radio et le modèle de trafic. Les informations, telles que le nombre de stations en contention, la probabilité de collision des RTS, le taux d'erreur des transmissions de données, la taille utile de données, etc, rend la création et le maintien de cette table à jour difficile. En outre, afin d'obtenir certains

paramètres, tels que le Path-loss, les stations doivent échanger des trames supplémentaires. Cet échange consomme de l'énergie et affecte le débit global du réseau. En revanche, la création de notre table repose uniquement sur les spécifications de la carte d'interface réseau.

Supposons que la carte réseau permette m niveaux de puissance de transmission (TPL : Transmit Power level) : $P_0, P_1, P_2, \dots, P_{m-1}$ où $P_0 > P_1 > P_2 > \dots > P_{m-1}$ (dBm) et n débit PHY : $R_0, R_1, R_2, \dots, R_{n-1}$ où $R_0 < R_1 < R_2 < \dots < R_{n-1}$ (Mbit/s). P_0 est le niveau de puissance maximale disponible P_0 et R_0 le débit PHY de données minimal.

(P_0, R_0) est le couple de base et il est considéré comme couple de référence. Les trames de contrôle sont transmises avec le couple de base (P_0, R_0) . On définit la valeur $Req.SINR_{th}(P_i, R_j)$ (Required Signal To Noise and Interference Ratio threshold) comme le niveau SINR minimum requis pour recevoir des données avec la puissance P_i et avec le débit PHY R_j . Dans le tableau 4.2 nous montrons un exemple avec quatre niveaux de puissance ($P_0=15, P_1=13, P_2=7, P_3=0$ dBm) et quatre débits PHY ($R_0= 6, R_1= 12, R_2= 24$ et $R_3=54$ Mbit/s). Nous avons seize combinaisons puissance-débit possibles. Si nous prenons le couple puissance-débit n°7, le SINR seuil nécessaire pour une transmission réussie avec le débit 12Mbit/s et à la puissance de 7dBm est 37,844dB. La consommation d'énergie pour une transmission avec ce couple est 70% inférieure à celle d'une transmission avec le couple de base ($(P_0, R_0) = (15 \text{ dBm}, 6\text{Mbit/s})$).

Lorsqu'un nœud source S reçoit la trame CTS, il mesure l'intensité du signal de la trame et calcule la valeur de SINR. Puis, S choisit, à partir de la table puissance-débit, l'une des combinaisons puissance-débit satisfaisant :

$$SINR > Req.SINR_{th}(P_i, R_j) \quad (4.12)$$

Par exemple, si l'on mesure un SINR égal à 92 dB, parmi toutes les combinaisons satisfaisant la condition $Req.SINR_{th}(P_i, R_j) < 92$ dB, on choisit une combinaison avec une consommation d'énergie minimale. Nous pouvons remarquer que la combinaison choisie correspond à la paire optimale avec le débit PHY maximum. Dans cet exemple, la stratégie de transmission optimale consiste à sélectionner la paire n ° 8 (13dBm, 24 Mbit/s). Le rapport de la consommation d'énergie de cette combinaison est de 0,2 ce qui représente la plus faible consommation d'énergie parmi toutes les combinaisons possibles.

La sélection est fondée sur des mesures de SINR faites sur les signaux des trames de contrôle reçus. L'acquisition d'informations d'état du canal $1F^2$, qui est représentée dans notre travail par le SINR, et la sélection du couple puissance-débit sont faites au niveau de l'émetteur. Chaque débit PHY correspond à une valeur seuil de SINR ($SINR_{th}$) qui garantit une certaine valeur de BER. Lorsque le SINR mesuré, par un nœud N , est égal ou supérieur à

² CSI : Channel State Information

une valeur de SINR_{th} donnée, le nœud N peut recevoir avec succès la trame de données avec le débit qui correspond à ce seuil. Le canal étant supposé symétrique, l'atténuation entre l'émetteur A et le destinataire N est la même dans les deux sens, d'où R_{AN} est égale à R_{NA} .

Notons que, la colonne « Pow.Cons.ratio » dans tableau 4.2 représente le rapport de la consommation d'énergie de la paire (P_i, R_j) sur la paire de base (P_0, R_0) . Les valeurs de consommation d'énergie sont équivalentes à celles de la carte réseau Cisco Aironet Serie 350 [Cisc00], et elles sont données dans le tableau 4.5. La consommation d'énergie est calculée pour la transmission d'un paquet de taille 1500 octets avec un overhead MAC de 34 octets en utilisant le niveau de puissance P_i et le débit R_j .

N°	i	j	Puissance P_i dBm	Débit R_j Mbits/s	Req.SINR _{th} (P_i, R_j) dB	Pow.Cons. ratio
1	0	0	15	6	3,162	1
2	1	0	13	6	4,742	0,777777778
3	0	1	15	12	6,309	0,50483559
4	1	1	13	12	9,462	0,392649903
5	2	0	7	6	18,967	0,611111111
6	0	2	15	24	31,622	0,257253385
7	2	2	7	12	37,844	0,308510638
8	1	2	13	24	44,261	0,200085966
9	3	0	0	6	91,680	0,548888889
10	3	1	0	12	186,072	0,277098646
11	2	2	7	24	186,508	0,157210402
12	0	3	15	54	313,0655	0,133462282
13	1	3	13	54	471,079	0,103803997
14	3	2	0	24	945,256	0,141203525
15	2	3	7	54	1893,543	0,081560284
16	3	3	0	54	9484,185	0,073255964

Tableau 4.2 : Table puissance-débit

Une remarque très importante que nous pouvons tirer du tableau 4.2, est qu'il est préférable d'augmenter le débit de transmission que de réduire la puissance d'émission afin de consommer moins d'énergie. Comme nous pouvons le constater avec les paires 1, 9 et 12, dans une transmission, si nous gardons le débit de base et nous réduisons la puissance d'émission de la valeur maximale à la valeur minimale (de 15 dBm à 0dBm), la puissance consommée se réduit de moitié. En revanche, si nous gardons la même puissance d'émission

de base et nous augmentons le débit, de la valeur minimale à la valeur maximale (de 6 Mbits/s à 54Mbits/s), nous pouvons réduire la consommation d'énergie jusqu'à 86% de l'énergie initiale. Cependant, le niveau de SINR requis pour une bonne réception est élevé. Par conséquent, il y a un compromis entre la réduction de la puissance d'émission et l'augmentation de débit de transmission.

4.4.3. Mode de transmission

Lorsque la destination D reçoit la trame de contrôle RTS elle choisit le mode de transmission (directe (4.13), relayé (4.14)) en se fondant sur la valeur du SINR mesurée à partir du signal de la trame RTS ; D compare cette valeur de SINR avec une autre valeur de SINR prédéfinie que nous appellerons SINRcoop (voir chapitre 3 section 3.2.3). La valeur seuil de SINRcoop permet de déclencher la coopération si le SINR du signal reçu a une valeur au-dessous de SINRcoop. A noter que dans notre protocole la valeur de SINRcoop est définie de telle sorte qu'une transmission relayée soit choisie sur le lien S - R - D uniquement lorsque le débit PHY de la liaison directe est inférieur à 12 Mbit/s (c.à.d. que la liaison directe ne permet qu'une transmission avec le débit PHY de base 6Mbit/s).

La durée de transmission pour le lien directe ($T_{DirectTX}$) vaut alors :

$$T_{DirectTX} = 3 \times SIFS + RTS + CTS + DATA_{SD} + ACK \quad (4.13)$$

La durée de transmission pour le lien relayé ($T_{RelayedTX}$) :

$$T_{RelayedTX} = 5 \times SIFS + RTS + CTS + CFC + DATA_{SR_i} + DATA_{R_iD} + ACK \quad (4.14)$$

Ainsi, lorsque la valeur de SINR est supérieure à SINRcoop, une transmission directe est mise en œuvre et notre protocole se réduit simplement au mécanisme de contrôle de puissance et de débit TPRC. Dans le cas contraire, la coopération est déclenchée et le nœud D envoie une trame CCTS³ vers le nœud S . Le CCTS indique à la source S que le niveau du SINR est très faible au niveau du nœud D et que la transmission directe ne permet pas un débit PHY élevé. Chaque nœud Re_i situé entre S et D écoute le trafic de contrôle en cours. Après avoir réussi à décoder la trame de contrôle RTS envoyée par S , un nœud Re_i mesure le SINR à partir du signal de la trame. En se fondant sur cette mesure, Re_i choisit à partir de la table puissance débit la paire (P_{SRe_i}, R_{SRe_i}) qui peut garantir une bonne communication entre les nœuds S et Re_i .

³ Dans le chapitre 3 section 3.2.5 nous avons décrit les formats des trames CCTS et CFC.

De la même façon, lorsque le nœud Re_i reçoit avec succès la trame CCTS envoyée par la destination D , il calcule le couple réalisable (P_{Re_iD}, R_{Re_iD}) entre les nœuds D et Re_i en utilisant la table puissance-débit. Les nœuds qui ont réussi à décoder avec succès les deux trames RTS et CTS sont considérés comme étant des relais potentiels pour la paire $S-D$. Ces nœuds entrent alors dans une phase de sélection de relais.

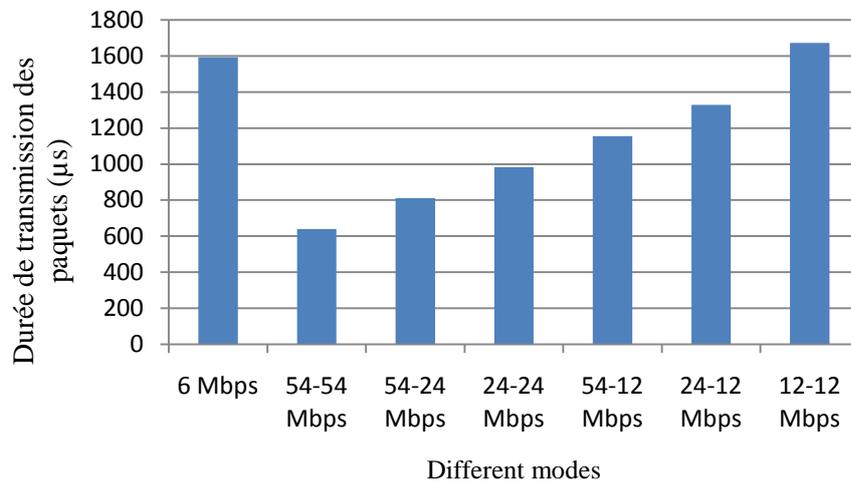


Figure 4.2 : Comparaison de la durée de transmission d'un paquet pour différents modes de transmission (coopératif et direct)

Classe A_j	Débit $R_{SRe_i} - R_{Re_iD}$ (Mbits/s)
A_1	54-54
A_2	54-24
A_3	24-24
A_4	54-12
A_5	24-12
A_6	12-12

Tableau 4.3 : Les différentes classes (modes) de relais potentiel

4.4.4. Sélection de relais et relayage des données

La phase de sélection de relais dans PRACT est identique à celle utilisée dans le protocole RACT. Les relais potentiels seront classifiés selon leur débit dans les deux sauts, à savoir, R_{SRe_i} et R_{Re_iD} . Le meilleur relais sera celui avec la meilleure qualité du lien relayé $S-Re_i-D$ (source-relais-destination). La figure 4.3 illustre la résolution de contention entre relais potentiels. Dans cette figure nous pouvons voir que chaque relais potentiel déclenche un temporisateur de back-off dans la période relative à sa classe. Les relais dans la deuxième classe, par exemple, doivent attendre la durée β_1 qui est égale à $\delta_{max} + \epsilon$ avant de déclencher leurs temporisateur de back-off, tandis que, les nœuds de la première classe déclenchent immédiatement leurs temporisateurs. De cette manière, les classes avec un débit élevé seront prioritaires pour l'accès au médium.

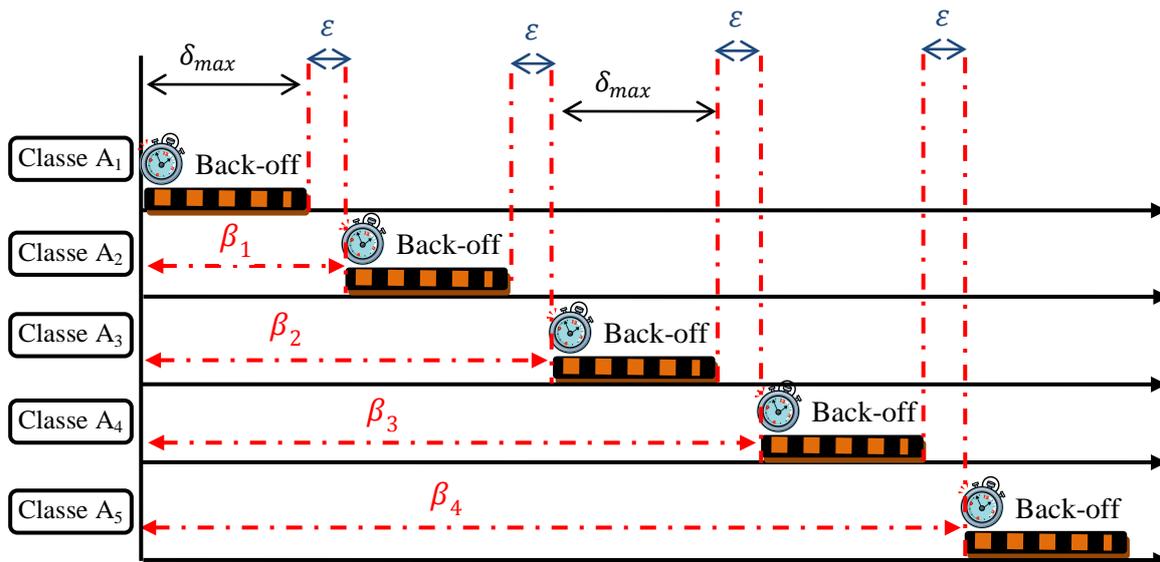


Figure 4.3 : Résolution de contention entre relais potentiels

Le meilleur relais Re_b envoie une trame CFC (Clear For Cooperation frame) pour indiquer sa volonté de participer à la transmission des données de S vers D . Les autres relais arrêtent la phase de sélection de relais une fois qu'ils observent que le canal est occupé (état du canal passe de idle à Busy). Ensuite, ils mettent à jour leurs NAV (Network Allocation Vector) à la réception la trame CFC envoyée par Re_b . L'annulation de la phase de sélection de relais s'effectue dès que l'état du canal passe de libre à occupé au lieu d'attendre la fin de la trame CFC ce qui réduit la probabilité de collision entre les relais.

Quand la source S décode avec succès la trame CFC, une transmission coopérative est initiée après une durée SIFS. S envoie les données au meilleur relais Re_b avec la paire (P_{SRe_b}, R_{SRe_b}) calculée à partir de la trame CFC. Le relais transmet ensuite ce paquet immédiatement après une durée SIFS vers la destination D avec la paire (P_{Re_bD}, R_{Re_bD}) . D envoie une trame ACK directement à la source après le décodage avec succès de la trame envoyée par le meilleur relais. En cas de collision entre relais de la même classe ou en l'absence de relais potentiels, la source envoie les données directement vers la destination sans coopération après une durée SIFS avec la paire de base (P_0, R_0) .

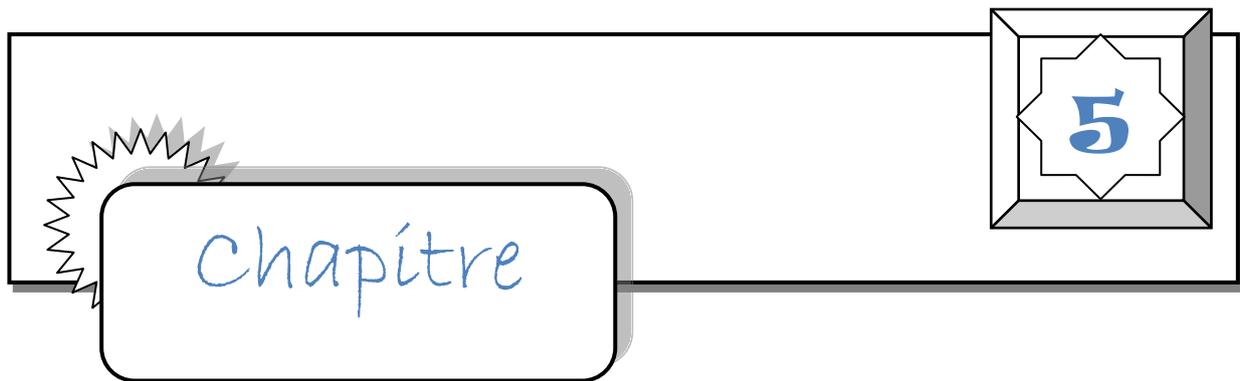
4.4.5. Réserveation et annulation du Support

En ce qui concerne le mécanisme de réserveation et d'annulation de la réserveation du support, il reste le même que celui utilisé par RACT. Pour plus de détails voir le chapitre 3 la section 3.2.4. Conclusion

4.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit un nouveau protocole MAC, appelé PRACT, qui combine un mécanisme TPRC et un système coopératif. Nous avons étudié la relation qui lie la consommation d'énergie et le débit physique ainsi que la relation entre la puissance d'émission et le débit physique. En outre, nous avons déduit du tableau 4.2 que l'augmentation du débit économise davantage l'énergie que la réduction de la puissance d'émission. Cependant, en raison de la dépendance entre le débit et la puissance d'émission, un compromis entre les deux sera plus judicieux et donnera un meilleur résultat. Notons que notre protocole avec son mécanisme TPC est un régime complémentaire du mécanisme d'économie d'énergie (PSM : Power Saving Mechanism) utilisé dans la norme IEEE 802.11 qui permet à un nœud d'entrer dans un état de sommeil (doze state) au moment jugé raisonnable pour économiser l'énergie des batteries.

Dans le chapitre qui suit, nous allons évaluer les performances du protocole PRACT.



5. Evaluation de PRACT

5.1. Introduction

Dans le but de comparer et d'évaluer les performances du protocole PRACT, nous utiliserons le simulateur NS2 [Ns00]. Nous divisons les simulations en deux parties. Dans la première partie de notre analyse, nous allons valider les performances de PRACT. Nous évaluons le débit global, la consommation totale d'énergie, l'efficacité énergétique et l'énergie par bit. Dans la deuxième partie, nous étudierons plus spécifiquement le problème des interférences "intercellulaires" et nous démontrons que ce problème peut être réduit avec le protocole PRACT, ce qui a un impact sur le débit global du réseau et sur la réutilisation spatial.

5.2. Etude des performances de PRACT

Dans cette section, nous évaluons le débit global, la consommation totale d'énergie, l'efficacité énergétique et l'énergie par bit. La consommation d'énergie totale est définie comme la somme de l'énergie utilisée par les cartes d'interface réseau pour transmettre et recevoir toutes les trames de tous les nœuds du réseau. Notons que nous considérons la consommation d'énergie due à l'overhead (la réception des CFC par tous les nœuds dans le réseau qui ne sont pas concernés par la coopération). L'efficacité énergétique est définie comme le rapport entre le débit global et la consommation totale d'énergie. La consommation d'énergie des nœuds est à celle de la carte réseau Cisco Aironet Serie 350 [Cisc00] et est définie par le tableau 5.1.

Mode opératoire		Consommation
Transmission	TX à 15 dBm	2.25 W
	TX à 13 dBm	1.75W
	TX à 7 dBm	1.375W
	TX à 0 dBm	1.235 W
Réception		1.35 W

Tableau 5.1 : Consommation d'énergie

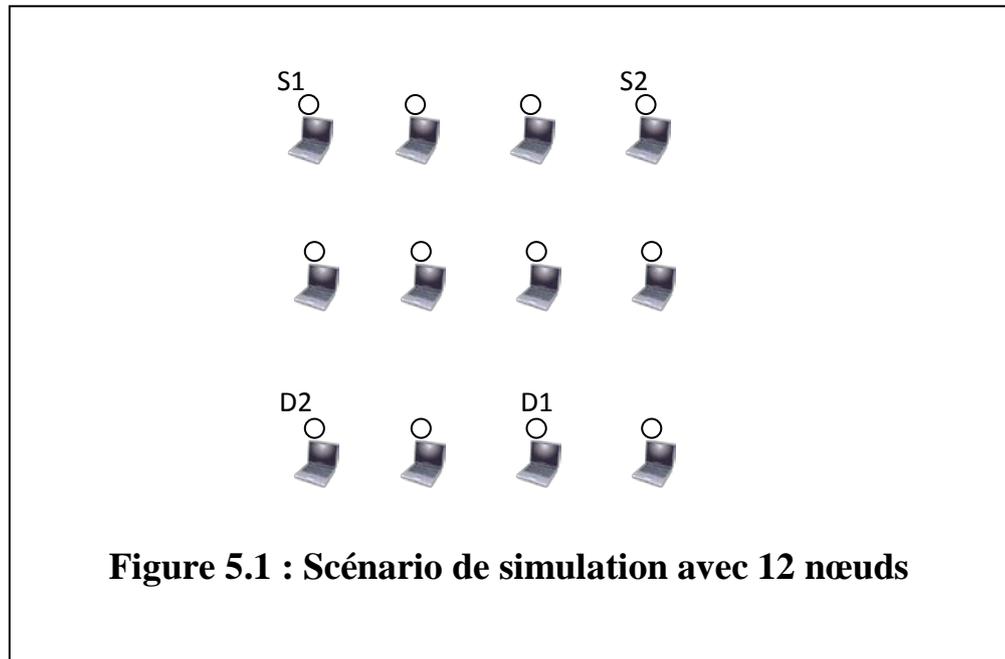
A. Définition des paramètres de simulation

Nous avons implanté notre protocole dans le simulateur NS2 en se fondant sur le modèle étendu 802.11Ext du simulateur. La couche physique du standard IEEE 802.11g est utilisée dans les simulations avec les débits : 6, 12, 24 et 54 Mbit/s. Les paramètres de simulation utilisés dans les deux parties sont résumés dans le tableau 5.2.

RTS	160 bits
CTS/ACK/CFC	112 bits
Durée SIFS	10 μ s
SlotTime (Short SlotTime)	9 μ s
Durée DIFS (Short DIFS)	28 μ s
Mobilité des nœuds	aucune
Trafic	CBR/UDP
Protocole de routage	aucun
Modèle de propagation-Radio	Two-Ray-Ground
Tableau 5.2 : paramètres de simulation	

B. Environnement de simulation

Nous étudierons les performances de notre protocole dans un réseau ad-hoc avec une topologie de réseau en grille (figure 5.1). Pour étudier l'efficacité du système coopératif combiné avec le mécanisme TPRC, nous avons mis deux sources sur le bord supérieur de la région et leurs destinations sont fixées sur le bord inférieur. Les relais potentiels sont situés au milieu de cette zone. Les flux sont de type CBR. Nous avons répété les simulations avec un nombre variable de nœuds afin de voir l'impact du nombre de nœuds sur les performances du réseau.



C. Analyse des résultats des simulations

Dans la figure 5.2, nous présentons le débit global en fonction de la taille des paquets. Dans cette courbe, le débit en paquets/s est constant et nous augmentons la charge en augmentant la taille des paquets. Nous pouvons remarquer que PRACT offre un débit plus élevé que le protocole standard IEEE 802.11. Lorsque la coopération est effectuée, un lien direct à faible débit est remplacé par un lien haut débit à deux sauts. Par conséquent, le nombre de paquets livrés par unité de temps augmente, ce qui améliore le débit. Une autre conclusion importante de cette figure est que l'anomalie du débit dans la norme IEEE 802.11

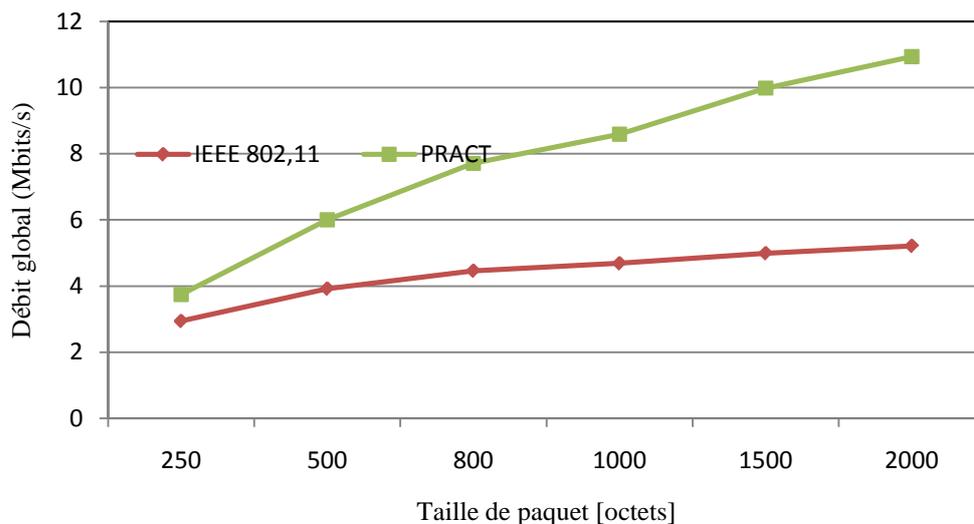


Figure 5.2 : Débit global vs. taille de paquet

[FRBD03] « rate anomaly problem » due à des nœuds à faible débit PHY de données peut être atténuée puisque maintenant ces nœuds sont assistés par des nœuds intermédiaires et les communications lentes sont accélérées via les communications coopératives.

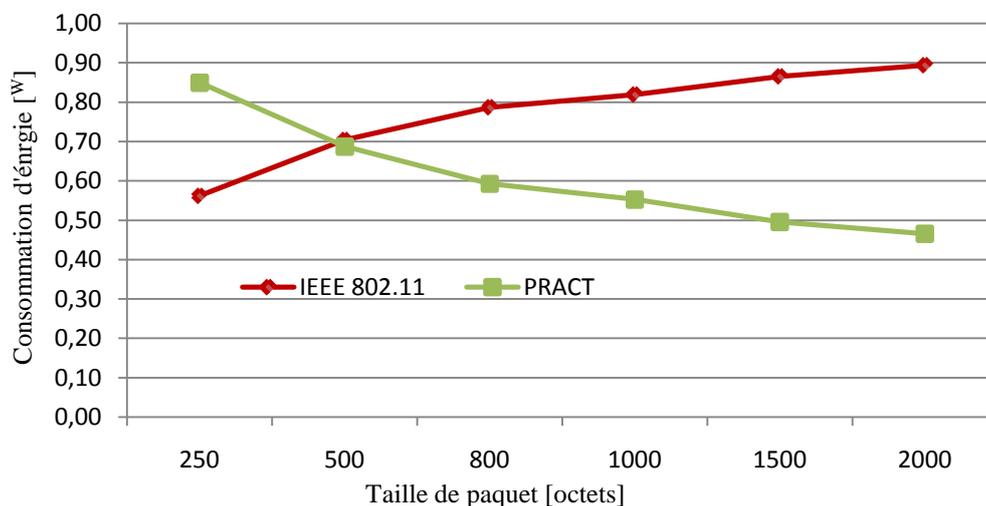


Figure 5.3 : Consommation d'énergie vs. taille de paquet

La figure 5.3 représente la consommation d'énergie totale par rapport à la taille des paquets. A noter que la consommation d'énergie est calculée pour transmettre et recevoir la même quantité de données. Cette figure montre qu'après une certaine valeur de charge, PRACT consomme moins d'énergie que le mécanisme standard et la consommation diminue de manière significative lorsque la taille des paquets augmente. En effet, pour de petites tailles de paquet le surcoût (overhead) introduit par les transmissions coopératives affecte la consommation d'énergie, mais pour des grandes tailles de paquets ce surcoût n'est pas significatif par rapport à la taille du paquet. De plus, la coopération a lieu uniquement lorsque le mode direct ne peut être effectué qu'au débit de base. Le temps d'émission et de réception des paquets de données dans ce mode direct est plus grand que dans le mode relayé, par conséquent, le gain de la coopération est important et la transmission directe consomme plus d'énergie que la transmission coopérative. Donc, nous concluons de cette figure que notre protocole consomme moins d'énergie que le mode standard pour transmettre la même quantité de données.

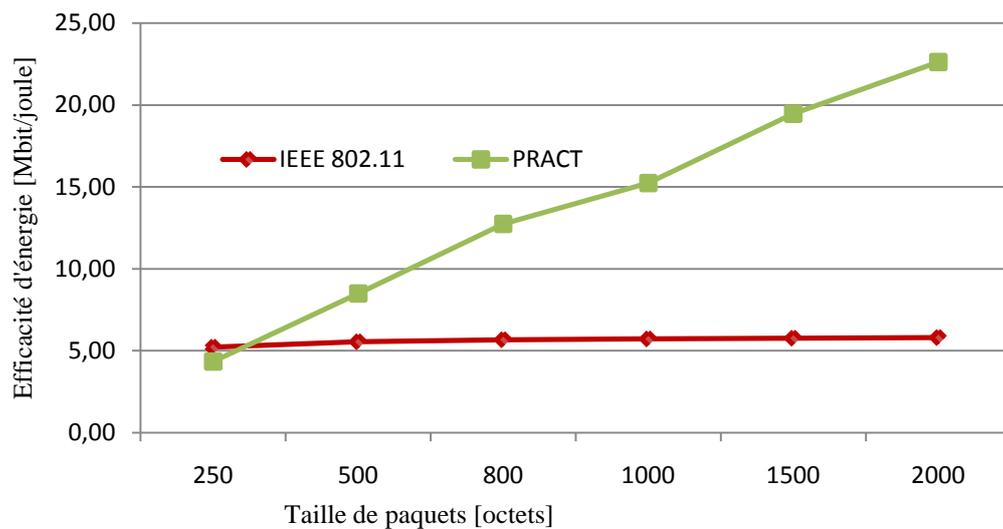


Figure 5.4 : Efficacité d'énergie vs. taille de paquet

La figure 5.4 révèle la relation entre l'efficacité énergétique et les tailles de paquets. Nous pouvons remarquer qu'il y a une relation de proportionnalité entre l'efficacité énergétique de PRACT et la taille des paquets ; lorsque la taille des paquets augmente l'efficacité énergétique aussi. Pour l'IEEE 802.11, l'augmentation de l'efficacité énergétique n'est pas significative. Cela est dû au fait que dans PRACT les deux paramètres débit et consommation d'énergie sont améliorés lorsque la taille des paquets augmente. En revanche, pour de grandes tailles de paquet, l'IEEE 802.11 consomme plus d'énergie que PRACT. Ainsi, notre mécanisme délivre plus de données par unité de consommation d'énergie que le mécanisme standard.

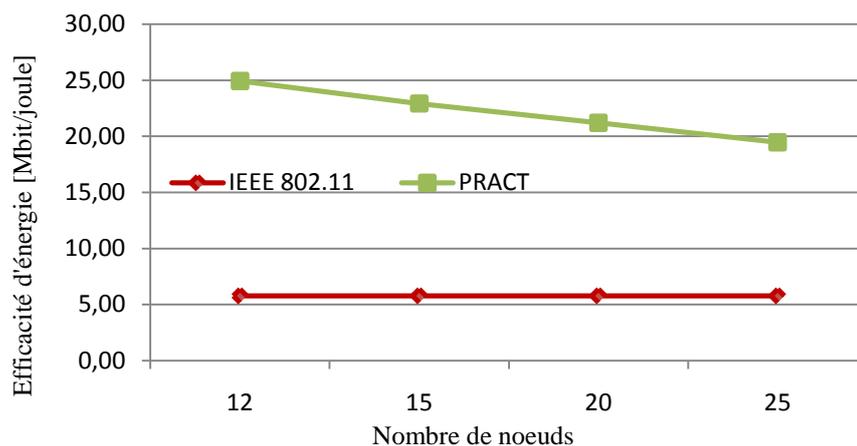


Figure 5.5 : Efficacité d'énergie vs. Nombre de nœuds

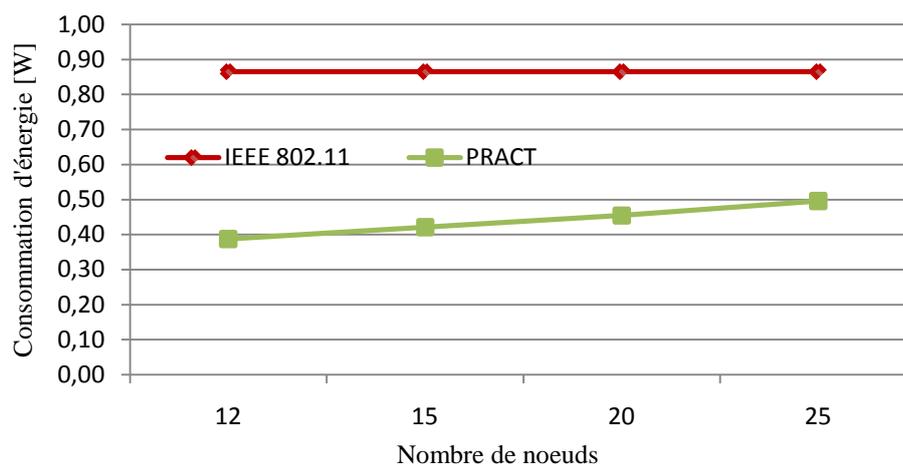


Figure 5.6 : Consommation d'énergie vs. nombre de nœuds

L'étude de l'impact du nombre de nœuds sur les performances du système est représentée sur les figures 5.5 et 5.6. La première figure donne la comparaison de l'efficacité énergétique entre PRACT et l'IEEE 802.11, tandis que l'autre figure donne la consommation d'énergie pour les deux régimes. Nous constatons que le nombre de nœuds n'a aucun impact ni sur la consommation d'énergie ni sur l'efficacité énergétique du système standard. Cela est dû au fait qu'il n'y a pas d'écoute passive des trames de données. Les nœuds décodent uniquement la partie entête de la trame, et si elle ne leur est pas destinée, ils annulent la réception du reste de la trame. Notons que pour des raisons de simplification de calcul, nous n'avons pas considéré l'énergie consommée pour décoder la partie d'entête de la trame. En revanche, pour PRACT, l'efficacité énergétique diminue à mesure que le nombre de nœuds augmente néanmoins elle demeure meilleure que pour la norme IEEE 802.11. En ce qui concerne la consommation d'énergie, elle augmente dans PRACT avec le nombre de nœuds mais reste inférieure à la consommation énergétique de l'IEEE 802.11. La raison est que, lorsque le nombre de nœuds augmente la consommation d'énergie augmente également en raison de la surcharge (trames CFC).

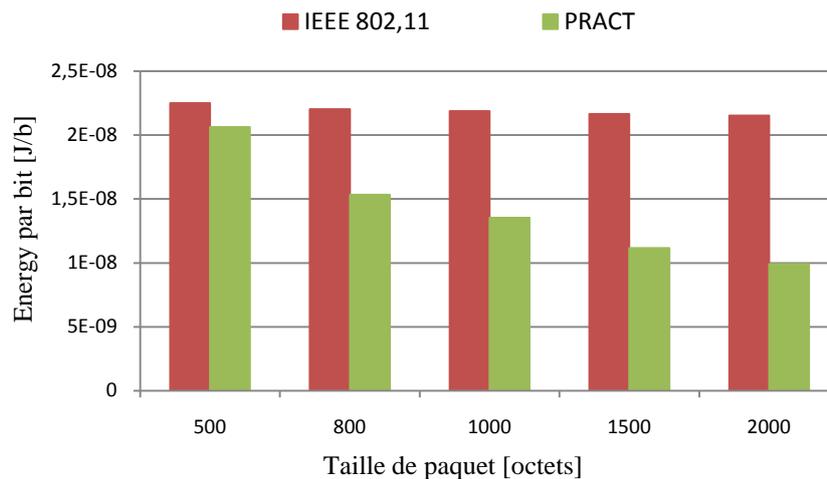


Figure 5.7 : Energie-par-bit vs. Taille de paquet

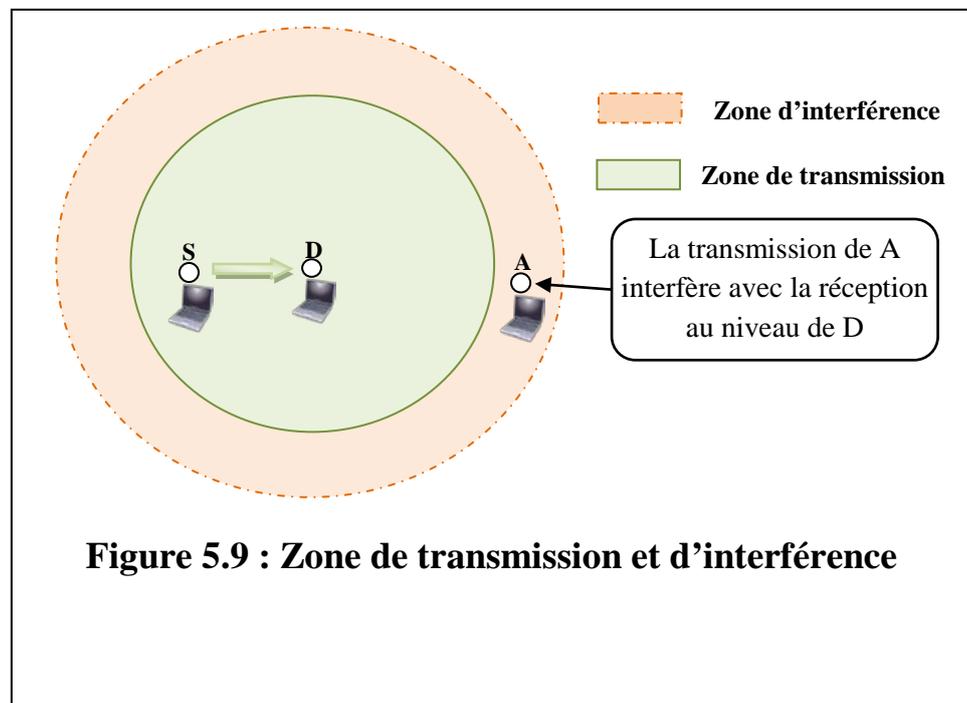
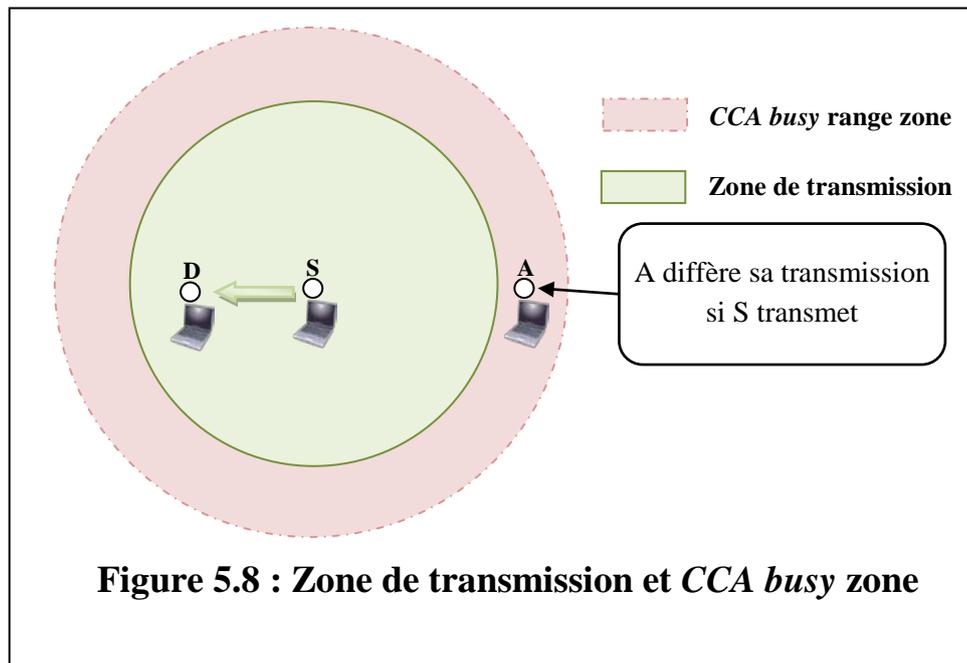
La figure 5.7 donne le diagramme de l'énergie consommée par bit des deux régimes pour différentes tailles de charge utile. Notons que la consommation d'énergie est calculée pour le même temps de simulation T et ceci pour tous les régimes. Nous pouvons remarquer que PRACT améliore l'énergie consommée par bit. En effet, comme le temps de transmission est réduit en raison de l'adaptation du débit (RA) et de la coopération, le temps passé par les NIC à la fois en transmission et en état de réception est réduite, entraînant ainsi une consommation d'énergie réduite. En outre, la réduction du temps de transmission permet de délivrer un plus grand nombre de trames au cours de la durée T . Par conséquent, l'énergie par bit est encore améliorée.

5.3. Etude des interférences avec PRACT

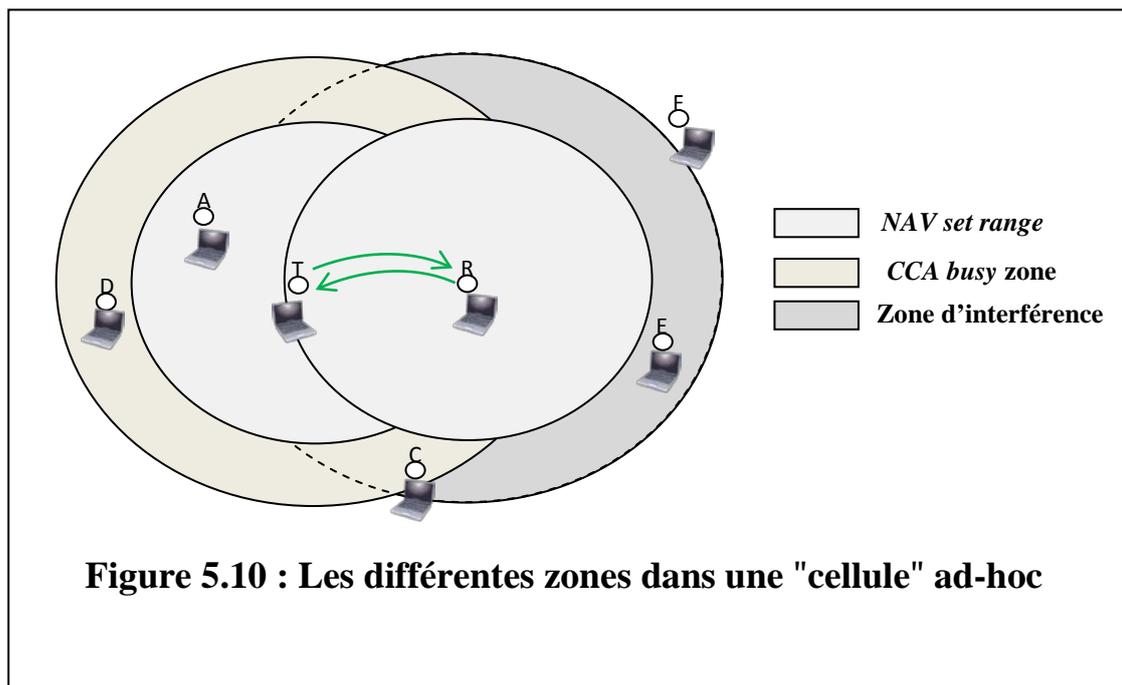
Dans cette partie nous allons étudier l'impact des interférences "intercellulaires" sur le débit global et sur la réutilisation spatiale de fréquence de transmission dans le système IEEE 802.11. Afin d'étudier le comportement de PRACT vis-à-vis du problème d'interférences et l'impact de l'utilisation de contrôle de puissance seul et de la coopération avec et sans contrôle de puissance, nous allons comparer le protocole PRACT avec le standard IEEE 802.11 et avec deux autres modes. Le premier de ces modes utilise uniquement la coopération sans contrôle de puissance (Coop); en revanche, dans le deuxième mode seul le contrôle de puissance est utilisé (PwrCtrl). Afin d'atteindre cet objectif, nous allons recenser tous les scénarios possibles qui présentent un risque d'interférence avec le standard IEEE 802.11 en prenant un exemple simple de deux "cellules" ad-hoc avec une communication dans chacune des deux cellules (C1 et C2). Avant cela, nous allons décrire les différentes zones dans une "cellule" ad-hoc.

A. Les différentes zones dans une cellule ad-hoc

Nous considérons une cellule ad-hoc comme étant constituée d'au moins deux stations, une station source et une autre station destination. En général, il y a quatre types de zones radio dans les systèmes 802.11 : zone de transmission, NAV zone (ou NAV set range), CCA (Clear Channel Assessment) busy zone, et zone d'interférence. Les figures 5.8, 5.9 et 5.10 illustrent les quatre types de zone.

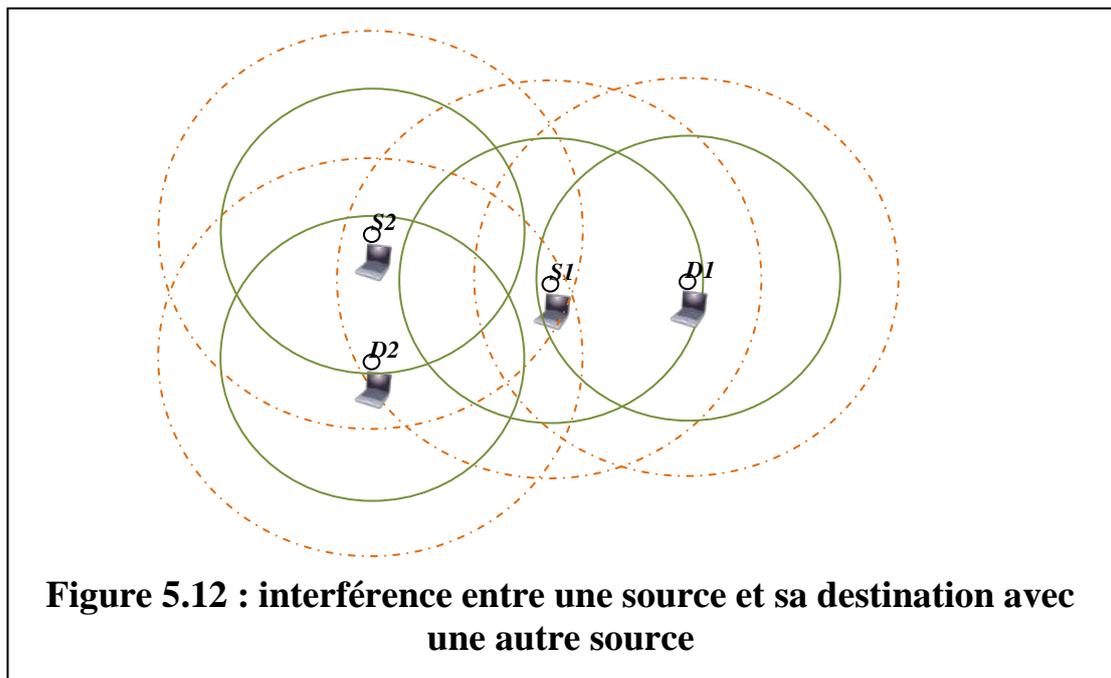
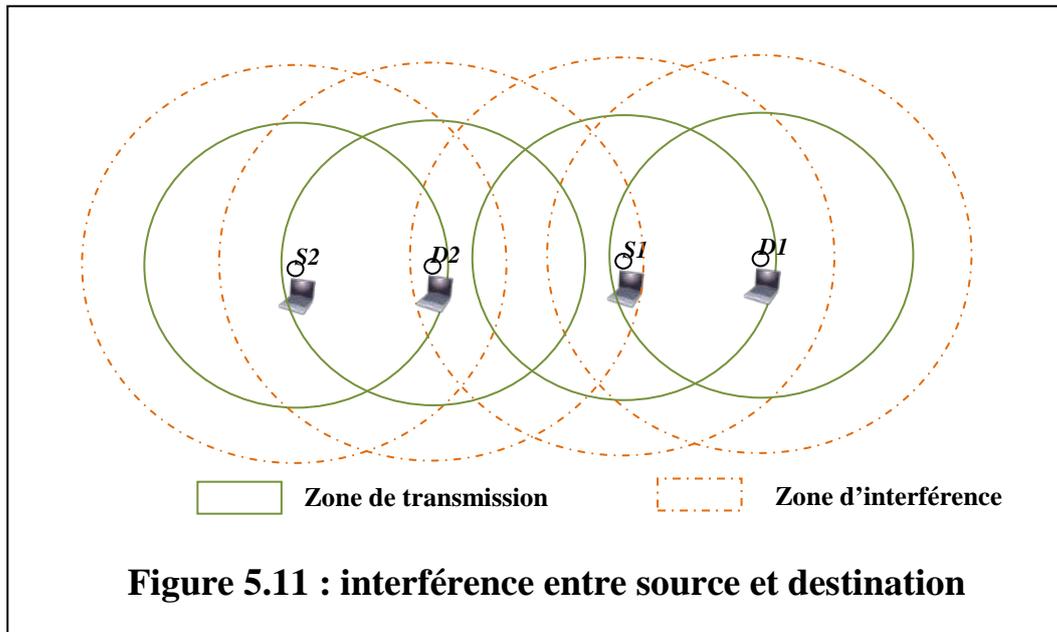


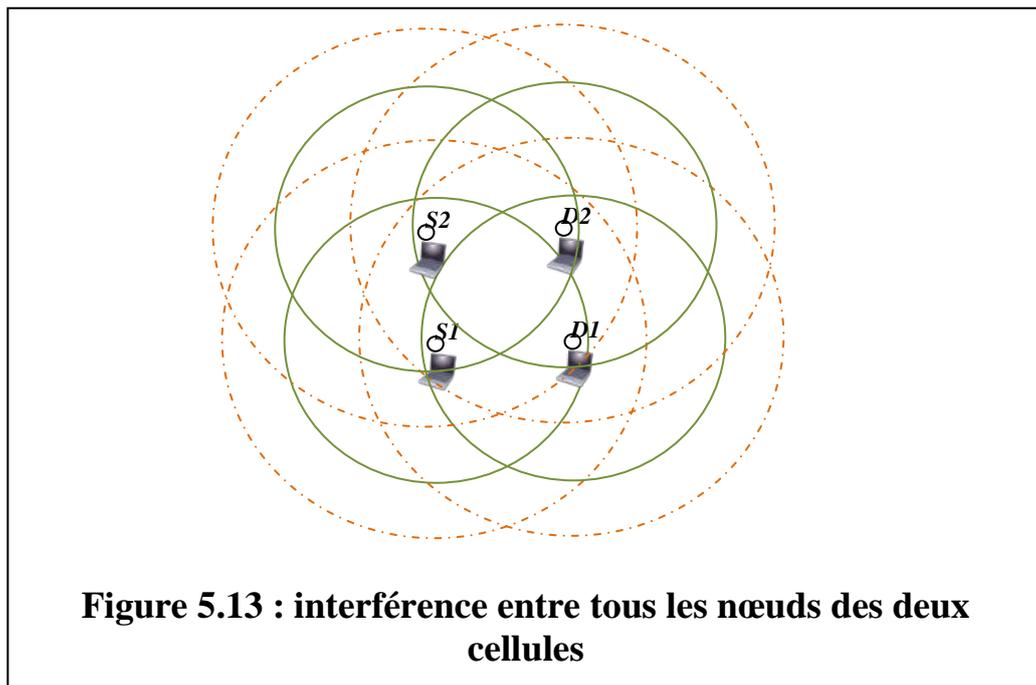
- **La zone de transmission** est la zone centrée sur l'émetteur et elle représente la portée dans laquelle un récepteur peut recevoir une trame avec succès, en supposant qu'aucune station voisine n'interfère avec le récepteur. Cette zone varie en fonction de la taille des paquets, du débit physique utilisé, de la puissance de transmission, du bruit du côté du récepteur et du modèle de propagation des ondes radio qui détermine les pertes dues au trajet (path-loss).
- **La zone d'interférence** est centrée sur le récepteur et représente la zone dans laquelle une station sans fil peut interférer avec la réception des données au niveau du récepteur.
- **CCA busy range zone** est une zone centrée sur l'émetteur. Elle représente la zone dans laquelle les stations sans fil peuvent détecter physiquement que le canal est occupé durant la transmission (par l'émetteur). Ces stations vont différer leurs tentatives de transmission. Il y a deux méthodes pour signaler l'occupation du canal (CCA busy) dans le standard IEEE 802.11. La première méthode est fondée sur la détection de porteuse (carrier detection). Dans ce cas la zone CCA busy est incluse dans la zone de transmission. La seconde méthode, est fondée sur la détection d'énergie (energy detection). Dans ce second cas la station signale le canal comme occupé après la détection de n'importe quel signal ayant une puissance supérieure au seuil de détection d'énergie (energy detection threshold) et la zone CCA busy est plus grande que la zone de transmission.
- **NAV set range** est la zone dans laquelle les stations sans fil peuvent mettre la valeur de leurs NAVs correctement en se fondant sur la valeur du champ *Duration field* qui est transmis dans les trames de contrôle RTS/CTS (ou dans la trame DATA en cas de désactivation du mécanisme RTS/CTS). Ces stations ne vont pas interférer avec l'échange des trames DATA et ACK puisque les trames RTS/CTS sont toujours transmises avec un débit fixe (par exemple 6Mbit/s dans le 802.11g). La zone NAV set range est indépendante du débit utilisé au niveau physique pour transmettre la trame DATA. En réalité, elle représente la zone qui résulte de l'union des zones de transmission de l'émetteur et du récepteur.



B. Recensement des scénarios possibles

Afin de recenser tous les scénarios possibles dans lesquels se posent des problèmes d'interférence intercellulaire avec le standard IEEE 802.11, nous allons prendre deux "cellules" ad-hoc adjacentes utilisant la même fréquence de transmission. Dans chaque cellule on a une communication courante entre deux nœuds ; une source et une destination. Avec deux cellules, on peut avoir plusieurs scénarios en fonction de la position géographique des nœuds dans une cellule par rapport à la position des autres nœuds dans l'autre cellule. Les figures suivantes (5.11, 5.12 et 5.13) montrent quelques exemples de scénario avec interférence.





Dans la figure suivante (5.14) nous nous recensons tous les scénarios possibles avec interférences.

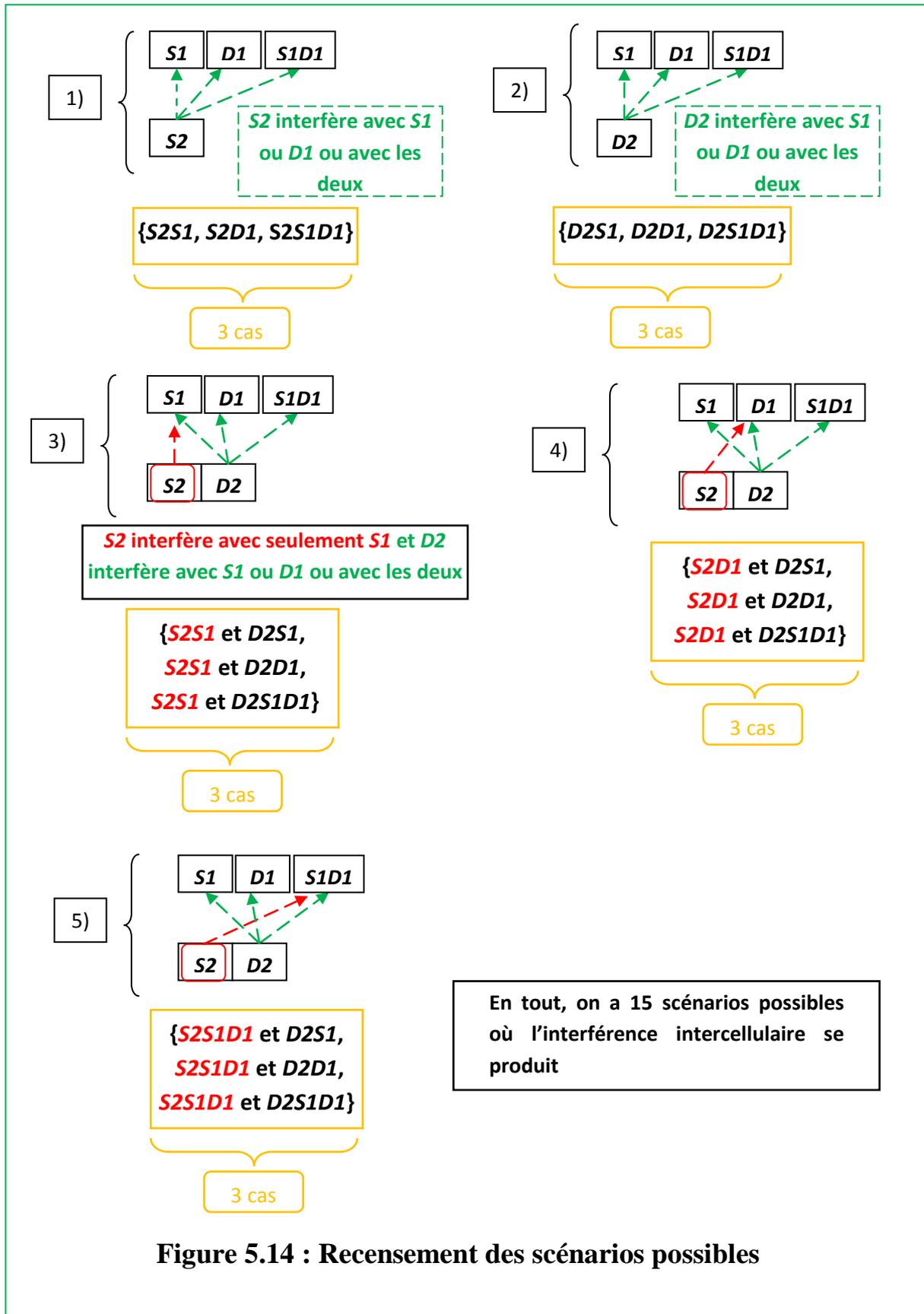


Figure 5.14 : Recensement des scénarios possibles

En raison du nombre important de scénario présentant des interférences, nous ne pouvons pas tous les simuler. Par conséquent, nous allons prendre quelques scénarios qui nous semblent intéressants à étudier. Pour chacun, quatre variantes seront testées : mode Standard, Coop, PwrCtrl et PRACT. Afin de permettre la coopération dans les modes PRACT et Coop, nous allons utiliser un relais entre chaque source et destination.

Notons que le nombre de scénarios possibles qui présentent des interférences augmente avec l'utilisation d'un relais comme le montre la figure 5.15 qui recense le nombre de cas possibles lorsque nous utilisons la coopération dans une cellule, par exemple.

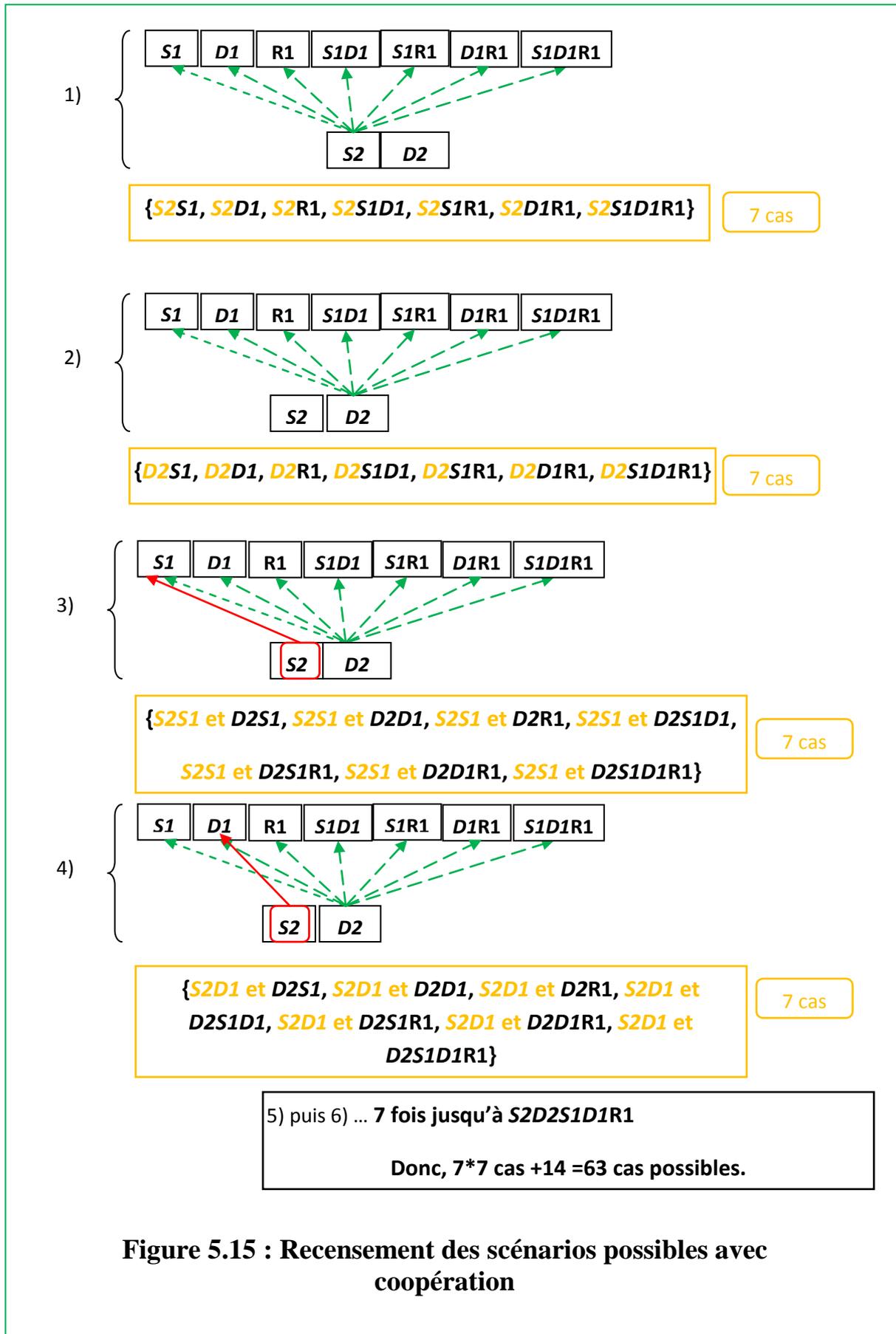
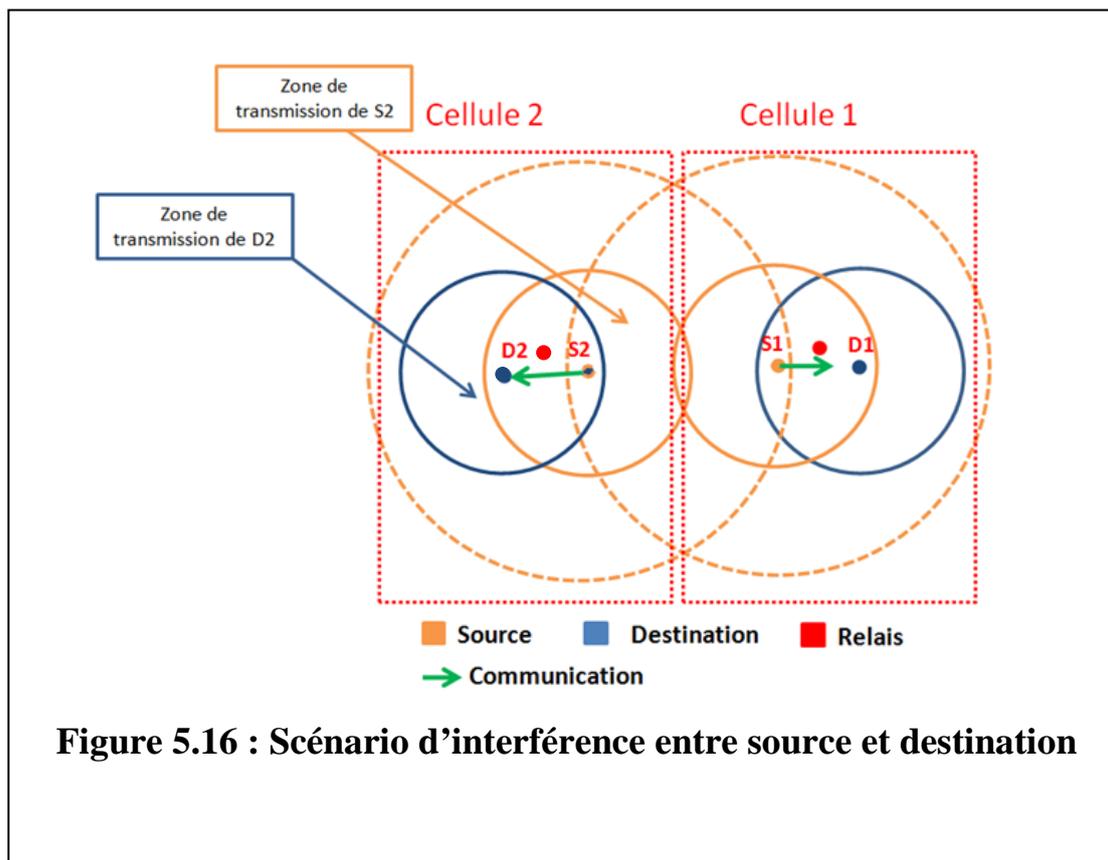


Figure 5.15 : Recensement des scénarios possibles avec coopération

C. Scénario 1 : Deux sources qui interfèrent l'une avec l'autre

Dans ce scénario, les deux sources $S1$ et $S2$ dans les deux cellules communiquent avec leurs destinations respectives simultanément. La figure 5.16 illustre le scénario utilisé dans la simulation.



Les figures 5.17 et 5.18 montrent le débit reçu en fonction de différentes valeurs de débit offert des cellules C1 et C2, respectivement. Nous pouvons déduire des deux figures que les deux cellules ont le même comportement. En fait, avec une taille de paquet de 1500 octets et une capacité du canal de 6 Mbits/s, le débit global dans les deux cellules devrait donner une valeur aux alentours de 5.15 Mbits/s avec le mode standard (calcul à l'aide d'une simple règle à trois tenant compte des délais protocolaires que nous allons expliciter ci-après). Nous retrouvons cette valeur par simulation en utilisant une seule cellule. Cependant, ce que nous remarquons, c'est que les deux communications ont partagé le canal et que la valeur du débit global obtenu, dans chaque cellule, avec le mode Standard, est égale à la moitié de celle que devrait obtenir chaque cellule. Le débit dans les quatre modes augmente avec l'augmentation du débit théorique. Dans les deux modes Coop et Standard, lorsque le débit atteint un certain seuil il s'arrête d'augmenter tandis que les modes PwrCtrl et PRACT permettent d'atteindre la capacité maximale du canal.

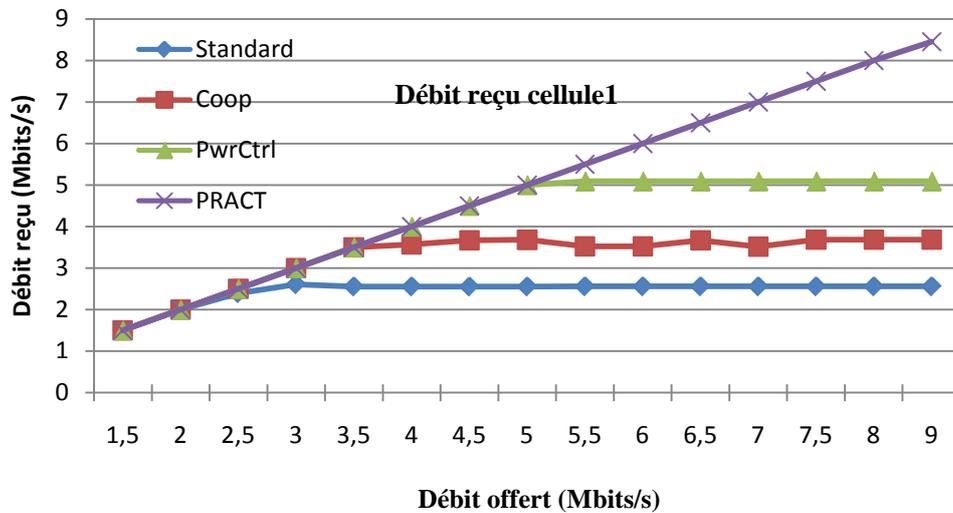


Figure 5.17 : Débit reçu vs. Débit offert pour scénario1 cellule1

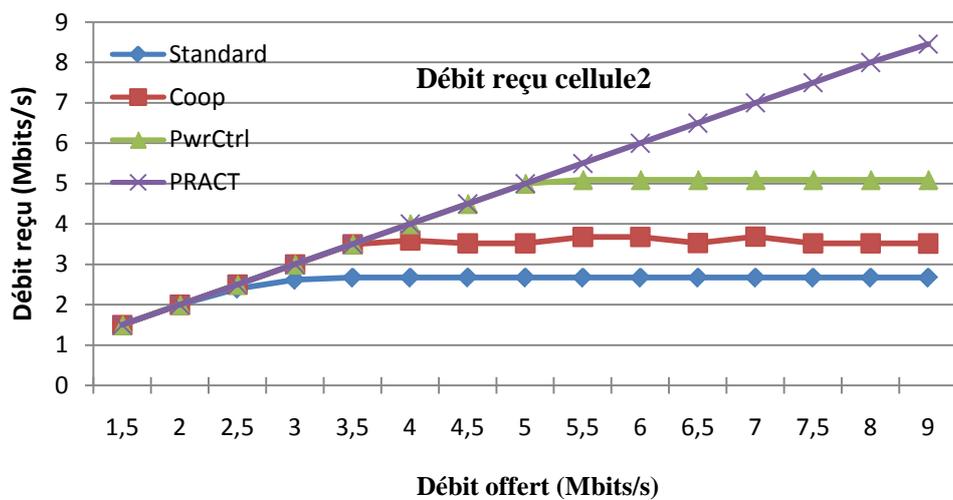


Figure 5.18 : Débit reçu vs. Débit offert pour scénario1 cellule2

Pour expliquer les valeurs numériques, nous allons calculer la durée moyenne d'un cycle CSMA/CA pour une communication sans et avec coopération :

En sachant que :

$$TimeSlot (802.11g) = 9\mu s$$

$$T_{RTS} = 52\mu s, T_{CTS} = T_{ACK} = T_{CFC} = 44\mu s$$

$$SIFS (802.11g) = 10 \mu s$$

$$Difs = 28 \mu s (SIFS + (2 \times TimeSlot))$$

$$T_{DATA_{SRe}} (24Mbits/s) = 532 \mu s$$

$$T_{DATA_{ReD}} (24Mbits/s) = 532 \mu s$$

$$CWmin (802.11g) = 15 \text{ (valeur minimale de la fen\^etre de contention)}$$

- **Calcul de la dur\^ee moyenne d'un cycle CSMA/CA sans coop\^eration :**

$$\begin{aligned} \text{Dur\^ee moyenne d'un cycle CSMA/CA} &= T_{moy_B.off} + T_{DATA} + T_{over\ head} \\ &= 2329,5 \mu s \end{aligned} \quad (4.1)$$

o\^u T_{DATA} est la dur\^ee d'une transmission DATA pour une taille de 1500 octets plus 34 octets d'overhead MAC elle est \^egale \^a 2064 μs pour un d\^ebit de transmission de base (6Mbits/s). $T_{over\ head}$ est la dur\^ee de l'overhead qui est \^egal \^a :

$$T_{over\ head} = T_{RTS} + T_{CTS} + T_{ACK} + Difs + 3 \times SIFS = 198 \mu s \quad (4.2)$$

$T_{moy_B.off}$ est la dur\^ee moyenne d'un back-off et est \^egal \^a :

$$T_{moy_B.off} = (CWmin/2) \times TimeSlot = 67,5 \mu s \quad (4.3)$$

La dur\^ee de transmission d'un paquet est donc \^egale \^a 2329.5 μs

\Rightarrow D\^ebit th\^eorique = 5.15Mbits/s

\Rightarrow D\^ebit mesur\^e = 5.13 Mbits/s (avec une seule cellule)

- **Calcul de la dur\^ee moyenne d'un cycle CSMA/CA avec coop\^eration :**

$$\begin{aligned} \text{Dur\^ee moyenne d'un cycle CSMA/CA} \\ &= T_{moy_B.off} + T_{DATA_{SRe}} + T_{DATA_{ReD}} + T_{over\ head_coop} = 1393,5 \mu s \end{aligned}$$

o\^u $T_{over\ head} = T_{RTS} + T_{CTS} + T_{ACK} + Difs + 5 \times SIFS = 262 \mu s$

La dur\^ee de transmission d'un paquet est donc \^egale \^a 1383,5 μs

\Rightarrow D\^ebit th\^eorique = 8.61Mbits/s

\Rightarrow D\^ebit mesur\^e = 8.52Mbits/s (une seule cellule)

Nous pouvons remarquer que la durée moyenne d'un cycle CSMA/CA avec coopération est plus courte que celle sans coopération. Cette durée avec coopération peut être encore plus courte lorsque nous utilisons des liaisons coopératives plus rapides que celle utilisée dans cet exemple (24-24Mbits/s).

Ce qui se passe dans les deux cellules est que la transmission d'une source perturbe la réception de l'autre source. Les deux sources transmettent des trames de contrôle RTS et de données et reçoivent des trames CTS et ACK. Donc, la transmission des trames RTS et DATA d'une source perturbent la réception des trames CTS et ACK de l'autre source. Cependant, en raison de leur grande durée de transmission, les trames de données causent un grand risque d'interférences. La transmission de ces trames par une source empêche la réception des trames de contrôle de l'autre source. Le risque d'interférence entre la transmission des trames RTS et la réception des trames CTS et ACK est très faible vu leur courte durée de transmission. Ainsi, la transmission des trames de données est la cause principale du grave problème d'interférence pour ce scénario.

A faible débit, ce risque d'interférence est faible. La raison pour cela est que, comme le montre la figure 5.20, l'intervalle d'arrivée des paquets est plus grand qu'un cycle CSMA/CA ce qui permet la transmission et la réception des deux sources. En revanche, lorsque nous augmentons le débit, l'intervalle diminue (voir figure 5.19), ainsi, la source qui accède au support en premier occupe tout l'intervalle et empêche l'autre source de recevoir les trames de contrôle CTS et ACK. La figure 5.21 explique ce qui se passe entre les deux sources dans le mode standard.

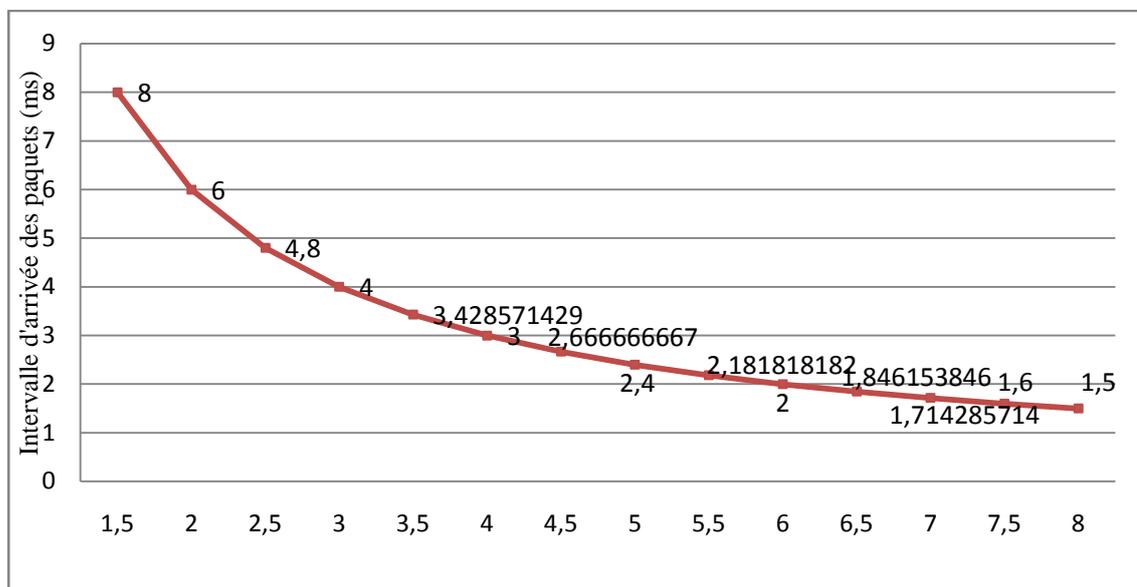
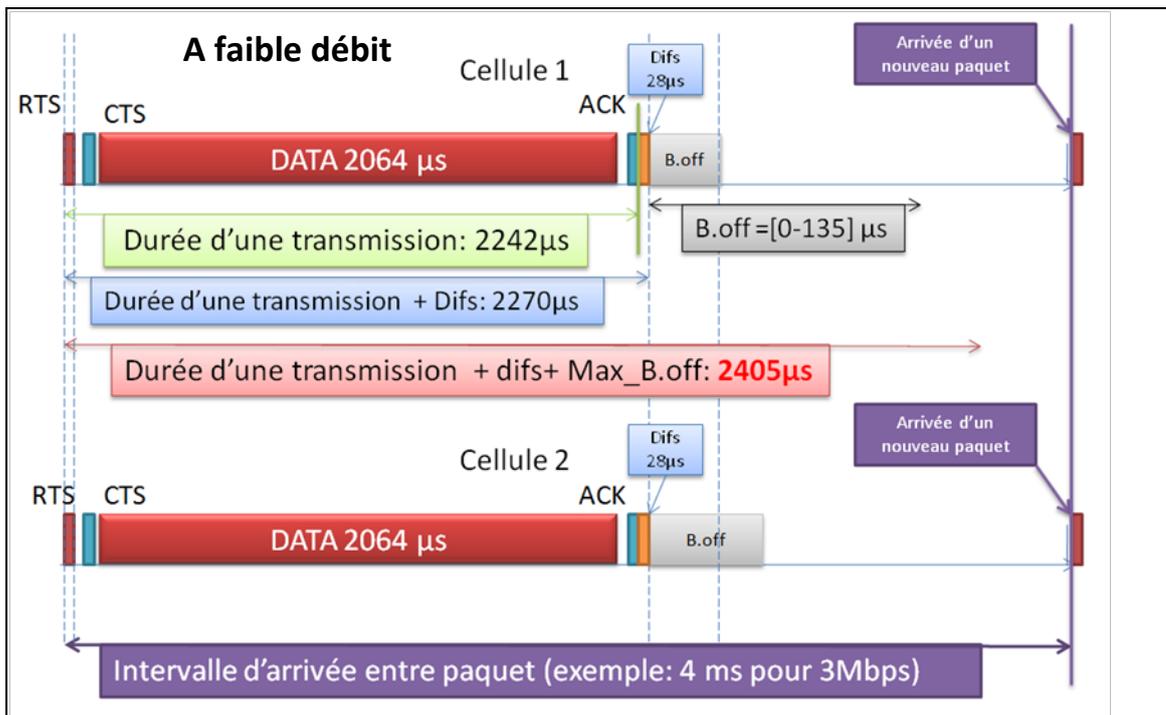


Figure 5.19 : Relation entre intervalle d'arrivée et débit



Débit augmente => intervalle d'arrivée entre deux paquets diminue



Figure 5.20 : Cycle CSMA/CA et intervalle d'arrivée des paquets

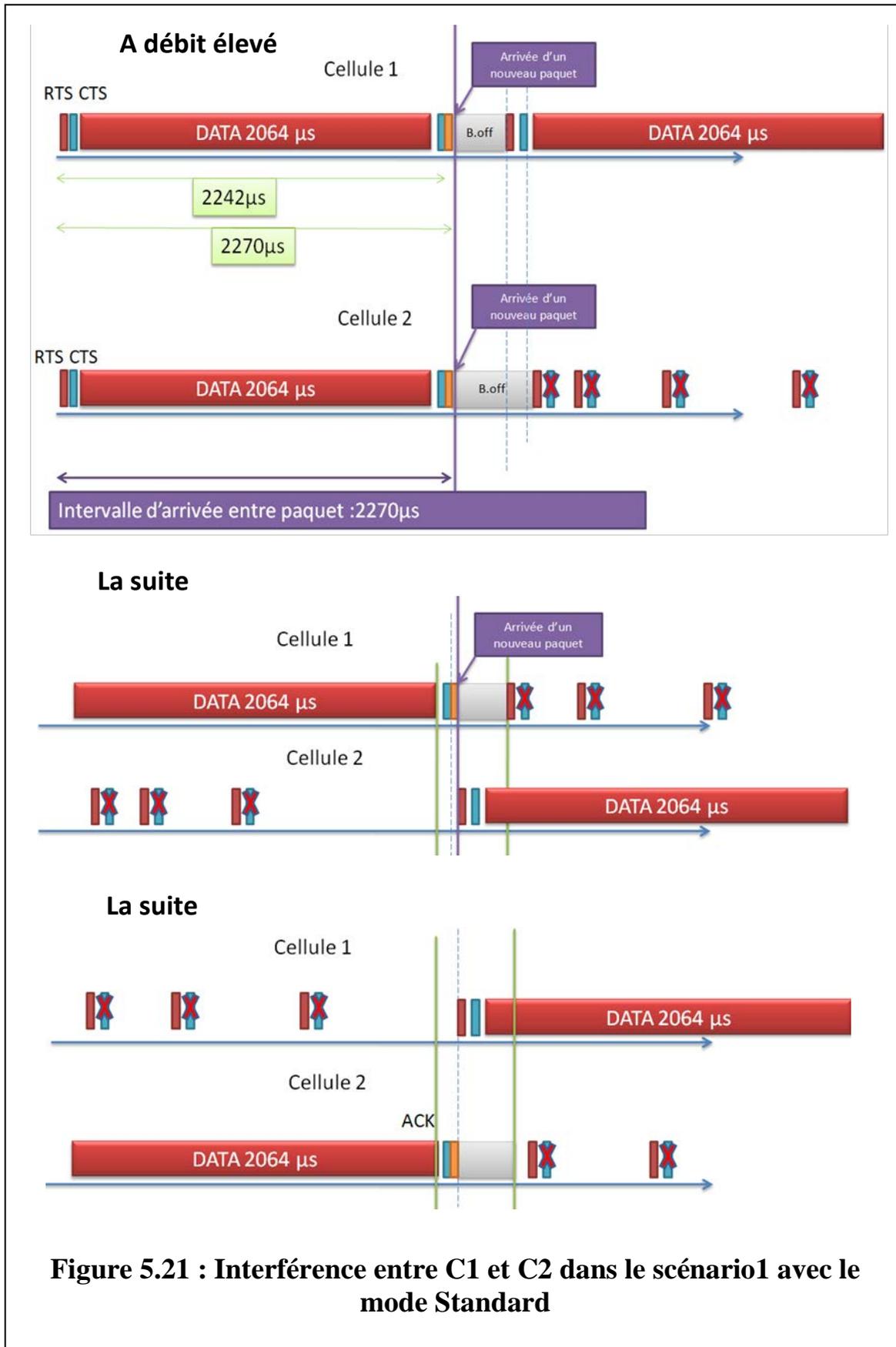


Figure 5.21 : Interférence entre C1 et C2 dans le scénario1 avec le mode Standard

Lorsque nous utilisons la coopération sans contrôle de puissance (Coop), nous réduisons la durée du cycle CSMA/CA. Cela permet de réduire la durée de transmission, ce qui réduit le risque d'interférence. Toutefois, le risque existe toujours vu qu'il n'y a pas de contrôle de puissance (pour plus d'explication voir la figure 5.22a). D'autre part, les deux modes qui utilisent le contrôle de puissance PRACT et PwrCtrl ont obtenus une meilleure performance en termes de débit global. Dans ces deux modes, les trames de données sont transmises avec une puissance d'émission plus faible. Ainsi, la zone d'interférence est réduite, et chaque source est en dehors de la zone d'interférence de l'autre source lors de la transmission des données. Cependant, les trames RTS sont toujours transmises avec la puissance maximale. Mais, vu la taille de ces trames, le risque d'interférence entre trames de contrôle est faible. Les figures 5.22b et 5.23 expliquent les modes PwrCtrl et PRACT, respectivement.

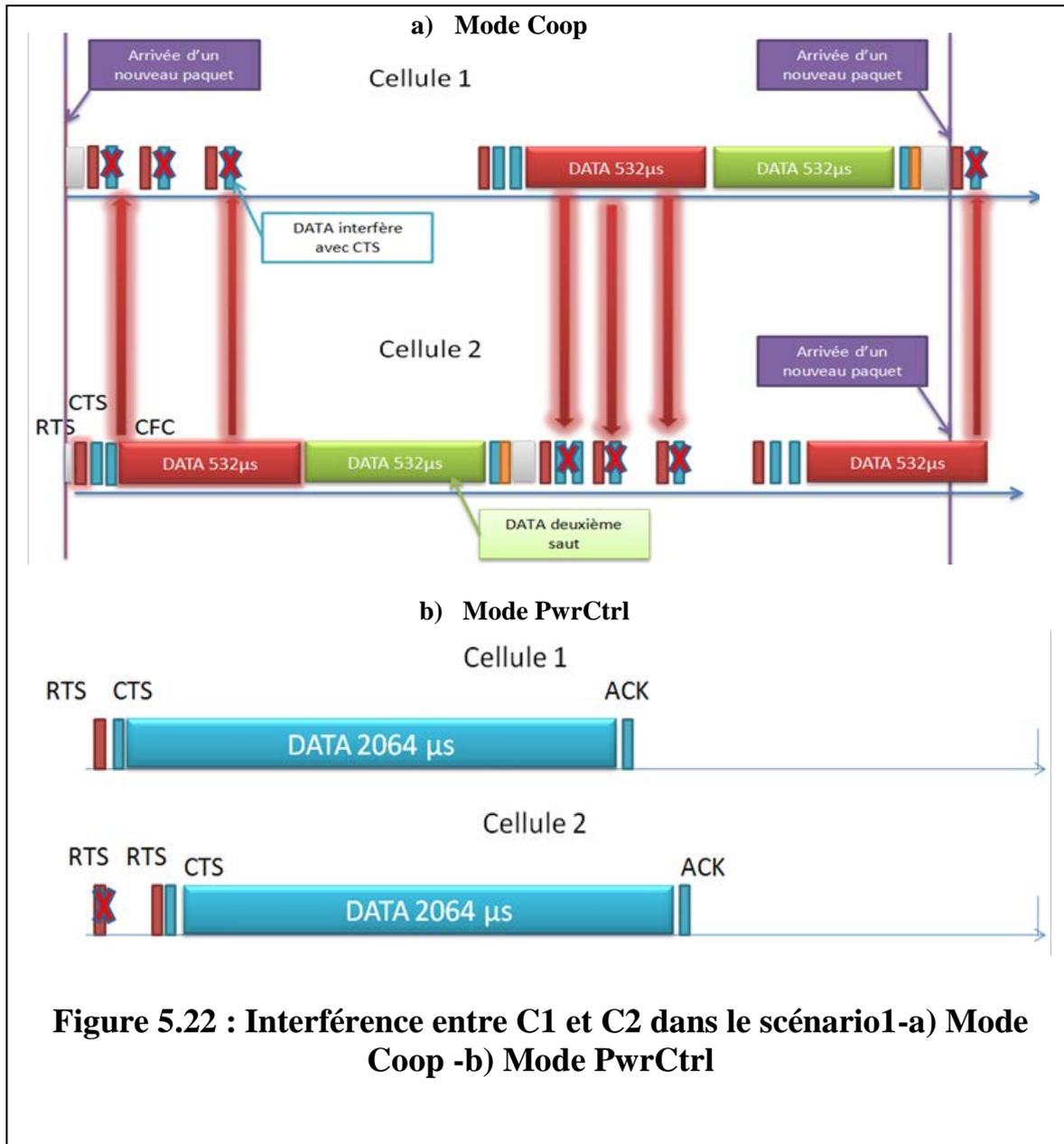


Figure 5.22 : Interférence entre C1 et C2 dans le scénario1-a) Mode Coop -b) Mode PwrCtrl

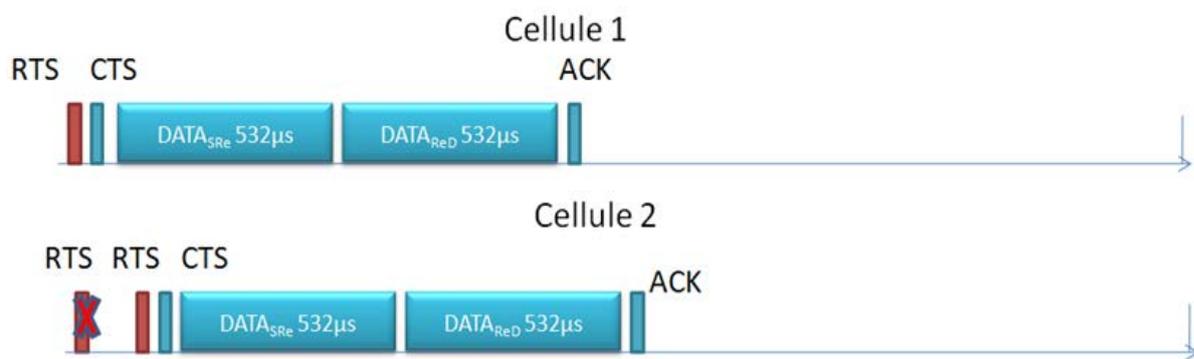


Figure 5.23: Interférence entre C1 et C2 dans le scénario1-mode PRACT

D. Scénario 2 : Une source et une destination qui interfèrent l’une avec l’autre

La figure 5.24 explique le scénario de cette simulation. La source doit transmettre des trames RTS et DATA, tandis que la destination doit transmettre des trames CTS et ACK et recevoir des Trames RTS et DATA. Les figures 5.25 et 5.26 montrent le débit reçu en fonction du débit offert pour C1 et C2, respectivement.

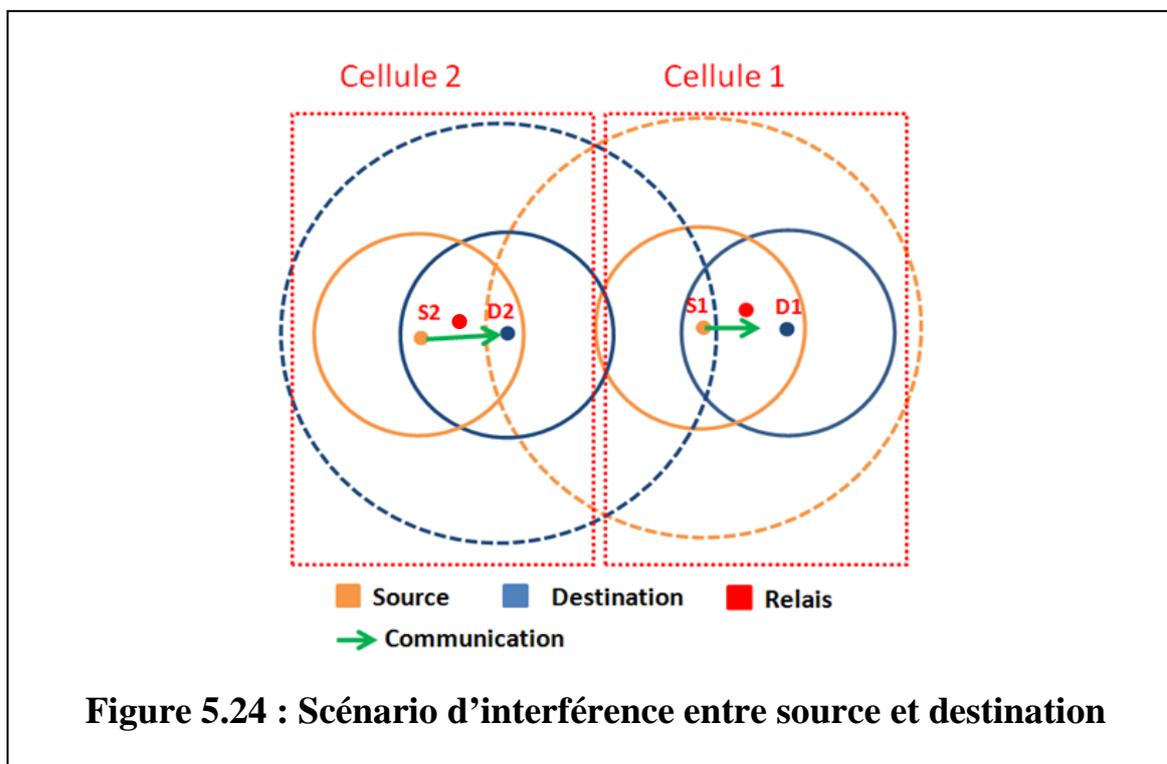


Figure 5.24 : Scénario d’interférence entre source et destination

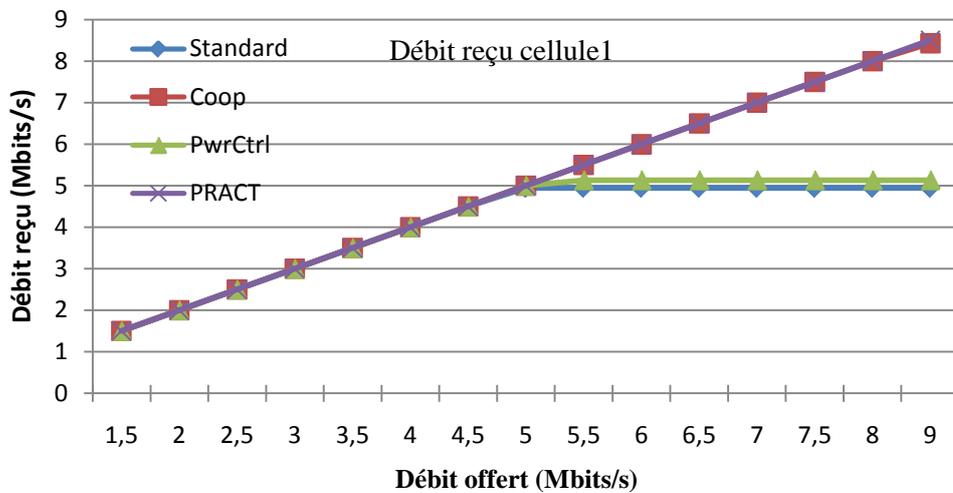


Figure 5.25 : Débit reçu vs. Débit offert pour scénario2 cellule1

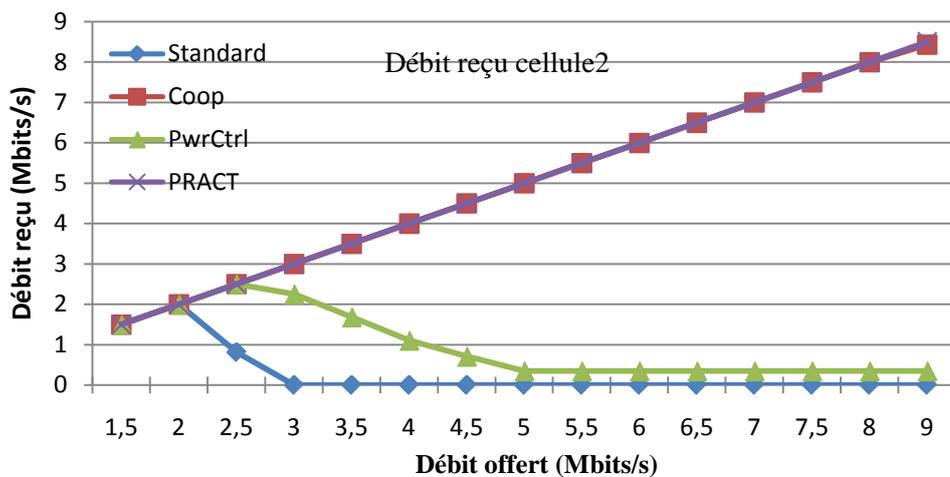


Figure 5.26 : Débit reçu vs. Débit offert pour scénario2 cellule2

A partir des deux figures, nous pouvons remarquer que le débit global avec les modes Standard et PwrCtrl dans la première cellule est meilleur que celui de la deuxième cellule. En fait, la cellule2 est perturbée par les transmissions de la cellule1. En effet, la réception des trames DATA et CTS par la destination $D2$ est perturbée par la transmission des trames DATA et RTS par la source $S1$ (figure 5.27). En raison de la taille des trames DATA, ces trames présentent un grand risque de subir des interférences, lors de leur réception au niveau de $D2$, par la transmission des trames RTS et DATA envoyées par $S1$. En revanche, la transmission de $D2$, si elle a lieu, ne perturbe pas la réception par $S1$ des trames ACK et CTS.

Cela est dû au fait que les trames de contrôle ont une petite taille, ce qui donne une courte durée de transmission et de réception. Ainsi, le risque d'interférence est très faible. L'utilisation du contrôle de puissance n'améliore pas la situation de la cellule 2 puisqu'il suffit que la source *S1* envoie une trame RTS pour que la réception de *D2* soit perturbée (figure 5.28). En revanche, l'utilisation de la coopération permet de remplacer le lien direct, avec une faible qualité de signal au niveau de la réception, par un lien à double sauts avec une meilleure qualité du signal au niveau de *D2*. Cela permet d'éliminer le risque d'interférence. En ce qui concerne les trames RTS, elles ne vont pas perturber la réception des trames de données au niveau de *D2*, puisque la qualité de signal au niveau de cette destination est améliorée en utilisant un lien relayé (liaison coopérative).

Ainsi, PRACT et Coop offrent un meilleur débit global que celui obtenu avec les autres modes et il est identique pour les deux cellules. La figure 5.29 explique ce qui se passe dans les deux cellules avec le mode PwrCtrl. Tandis que les figures 5.30, 5.31 et 5.32, 5.33 donnent la comparaison entre le mode Standard et les modes Coop et PRACT, respectivement.

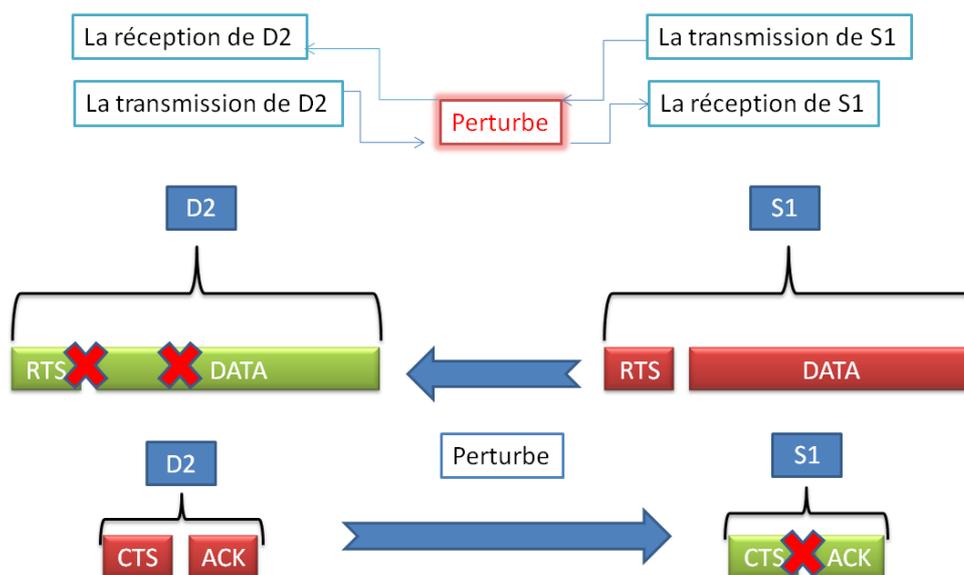


Figure 5.27 : Perturbation mutuelle entre source et destination

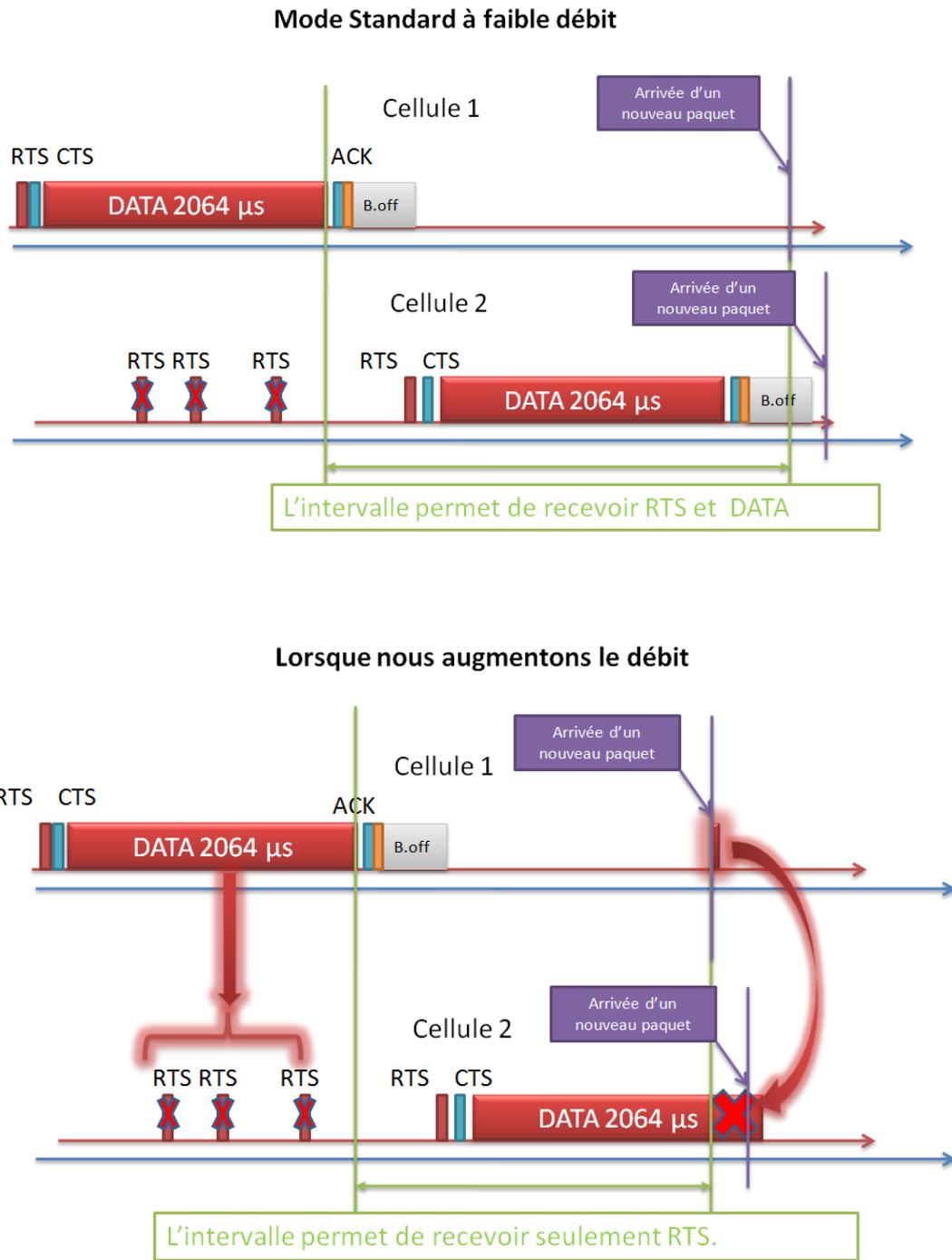


Figure 5.28 : Interférence entre C1 et C2 dans le scénario 2-mode Standard à débit faible et élevé

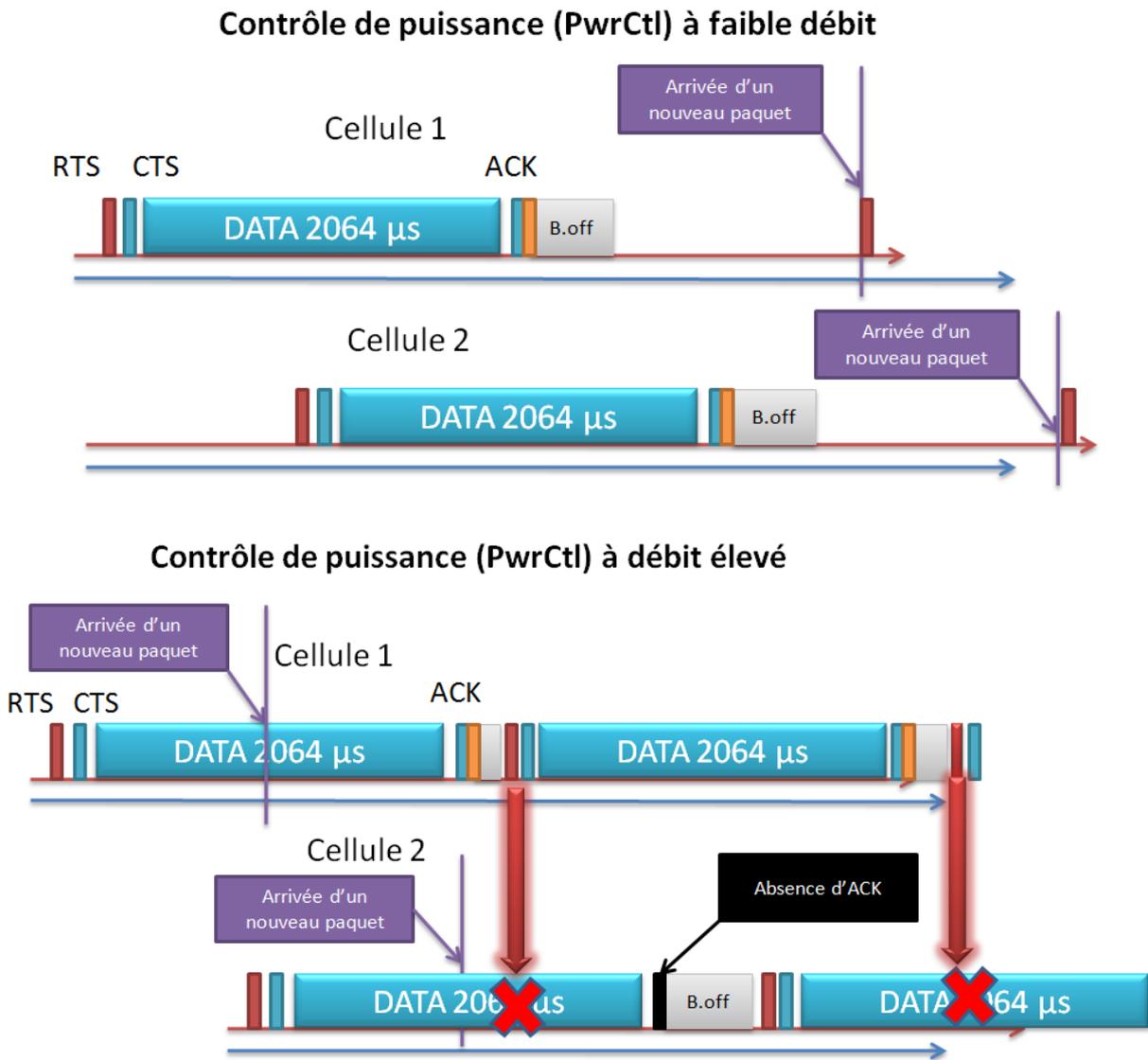


Figure 5.29 : Interférence entre C1 et C2 dans le scénario2-mode PwrCtrl à débit faible et élevé

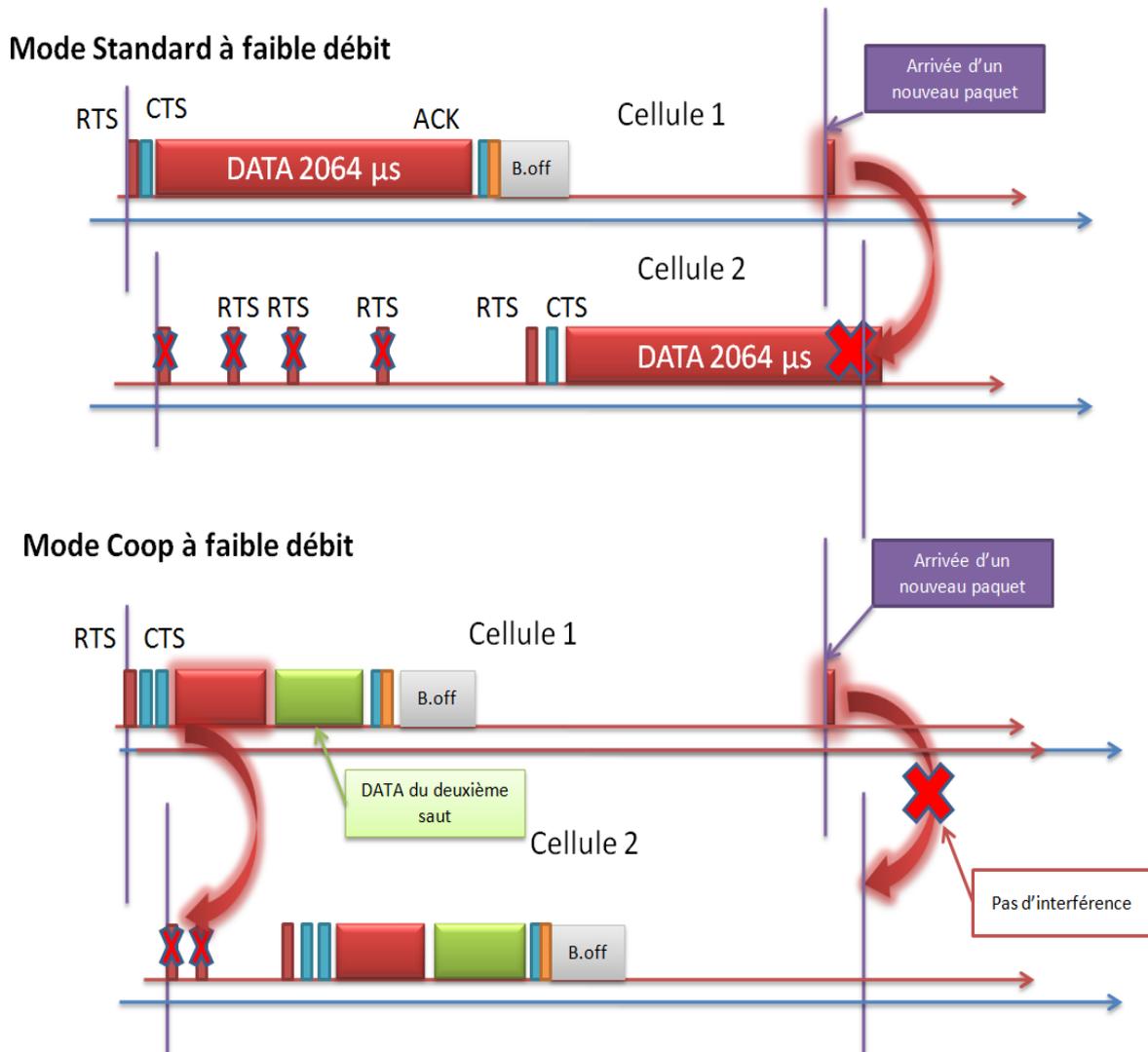


Figure 5.30 : Comparaison entre le mode standard et Coop à faible débit

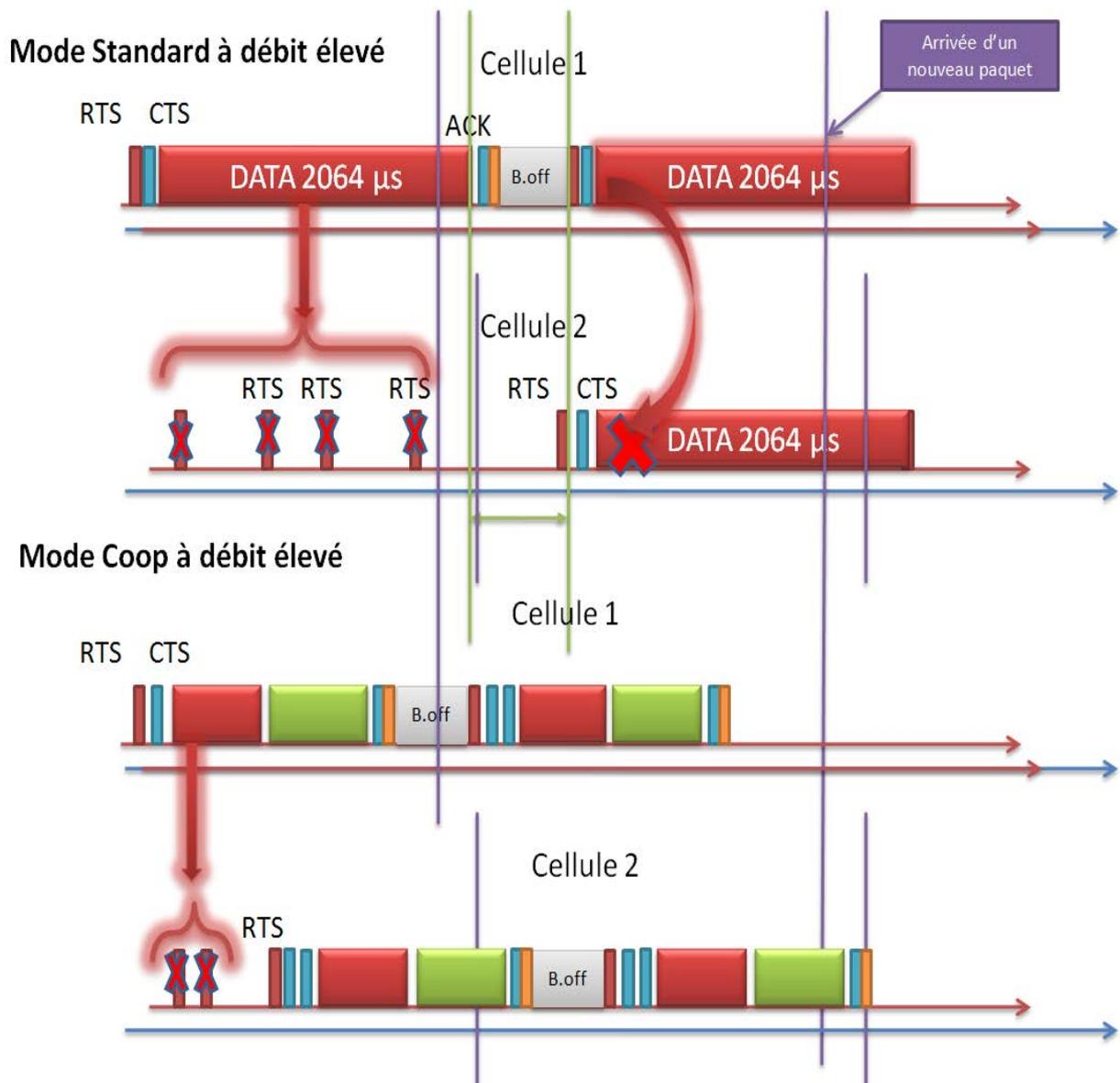


Figure 5.31 : Comparaison entre mode standard et Coop à débit élevé

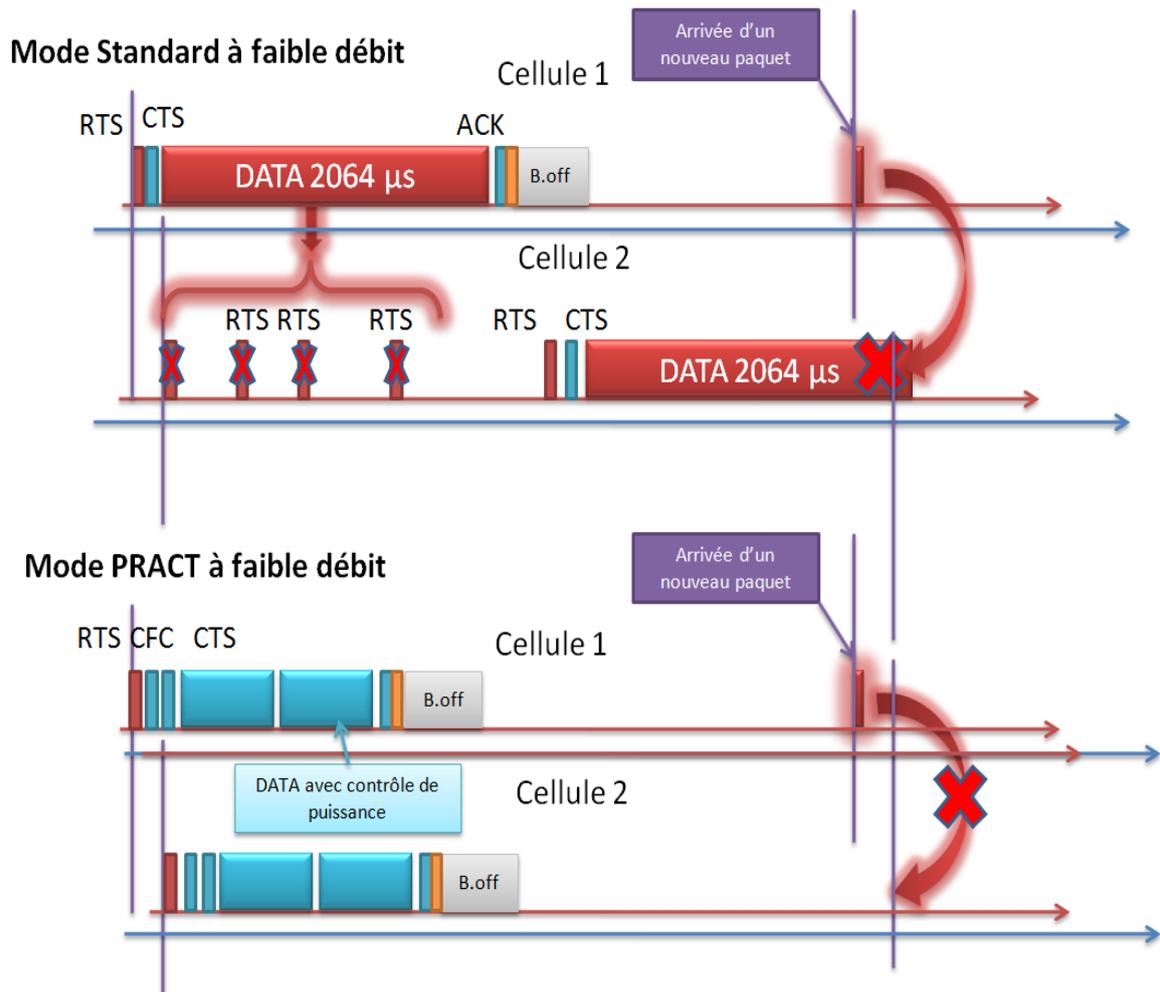


Figure 5.32 : Comparaison entre mode standard et PRACT à faible débit

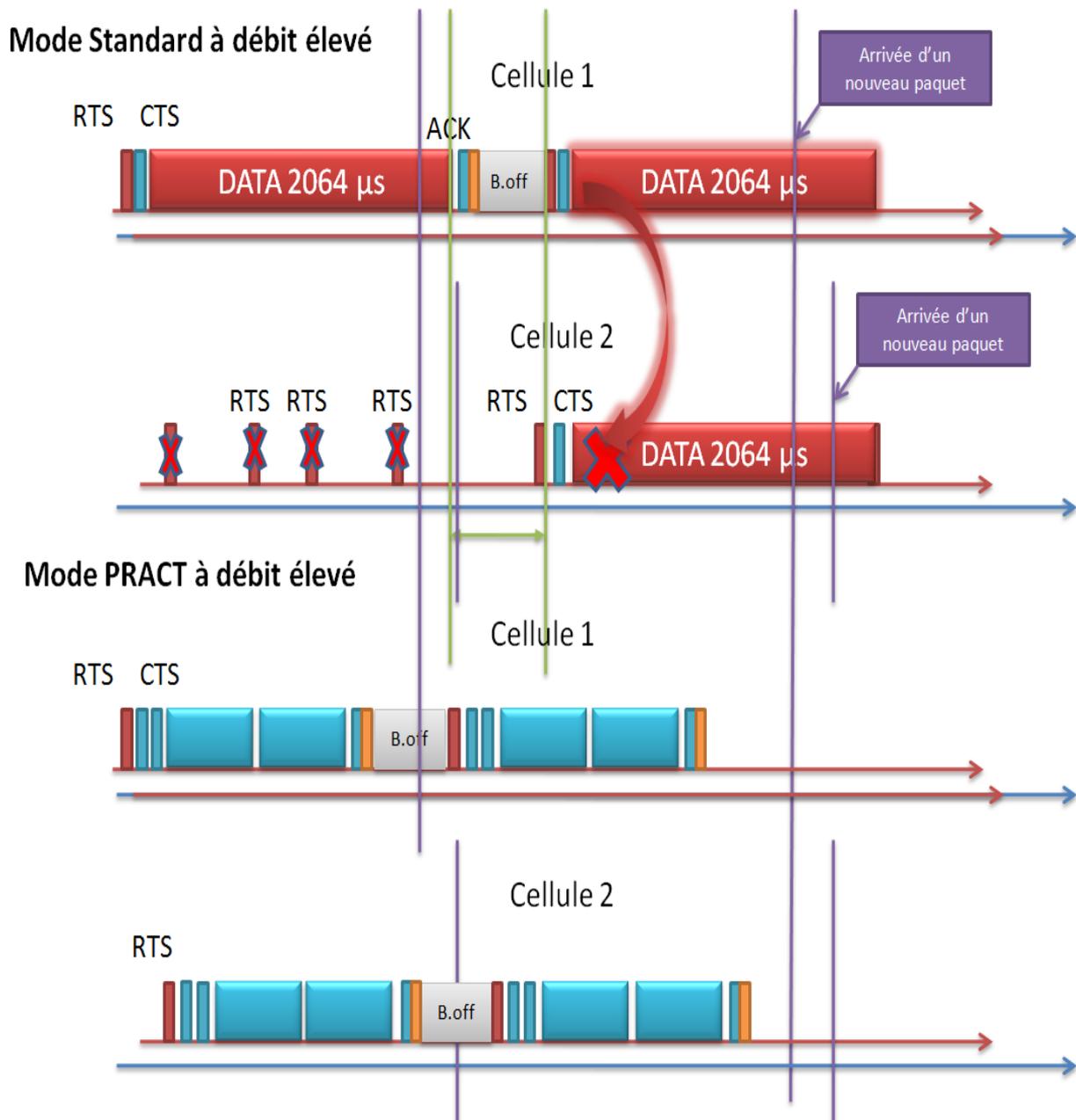
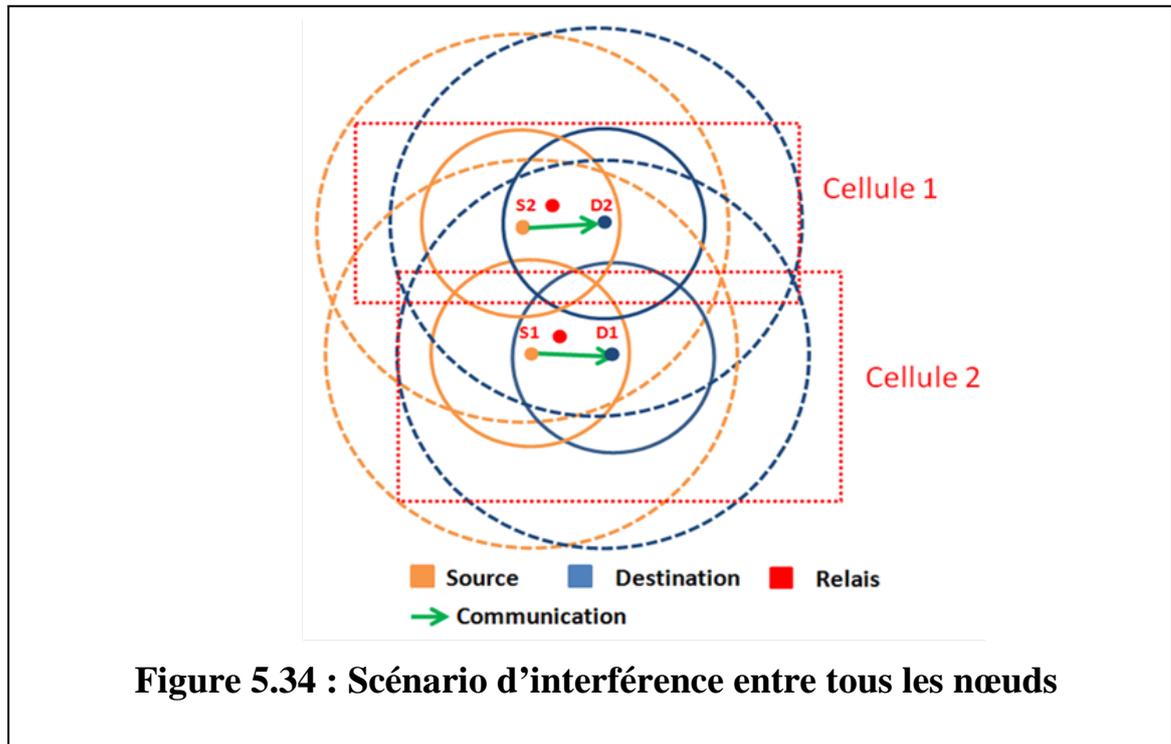


Figure 5.33 : Comparaison entre mode standard et PRACT à débit élevé



E. Scénario 3 : Tous les nœuds de la première cellule interfèrent avec tous les nœuds de l'autre cellule et inversement

La figure 5.34 illustre le scénario de cette simulation. Les figures 5.35 et 5.36 montrent le débit reçu en fonction du débit offert. Dans ce scénario, la source qui a accès en premier au canal domine le support et empêche les nœuds de l'autre cellule de communiquer. Ainsi, le support est partagé entre les deux cellules avec le mode Standard. L'utilisation du contrôle de puissance dans ce scénario empire la situation puisque les nœuds de la cellule bloquée pensent que le support est devenu libre et tentent de transmettre, ce qui interfère avec la transmission en cours dans l'autre cellule. Par conséquent, aucune cellule n'arrive à communiquer. En revanche, l'utilisation de la coopération permet de diminuer la durée d'occupation du canal et d'améliorer la qualité du signal des trames de données au niveau des destinations, ce qui améliore relativement le débit global. Toutefois, Les trames de données sont toujours transmises avec une grande puissance, ce qui perturbe la réception des trames de contrôle CTS, ACK au niveau des destinations et les trames RTS au niveau des sources. En outre, la transmission de n'importe quelle trame dans une cellule annule la phase de sélection de relais dans l'autre cellule. Cela est dû au fait que le mécanisme de sélection de relais arrête la contention entre les relais potentiels dès qu'ils s'aperçoivent que le support est occupé. Par conséquent, le relais ne va pas participer à la coopération et la transmission coopérative à deux sauts n'aura pas lieu.

En revanche, l'utilisation de la coopération combinée avec le contrôle de puissance donne une meilleure performance en termes de débit global par rapport aux autres modes. Toutefois, les trames de contrôle sont toujours transmises avec une puissance élevée, ce qui explique que le débit global obtenu avec PRACT n'a pas pu atteindre la capacité maximale du lien coopératif.

Notons que tous les résultats obtenus avec les modes PRACT et Coop pour les trois scénarios dépendent des modes de coopération utilisés dans le scénario de simulation. Un mode rapide comme le mode 54-54Mbits/s donnera de meilleurs résultats que le mode utilisé dans nos simulations (24-24Mbits/s).

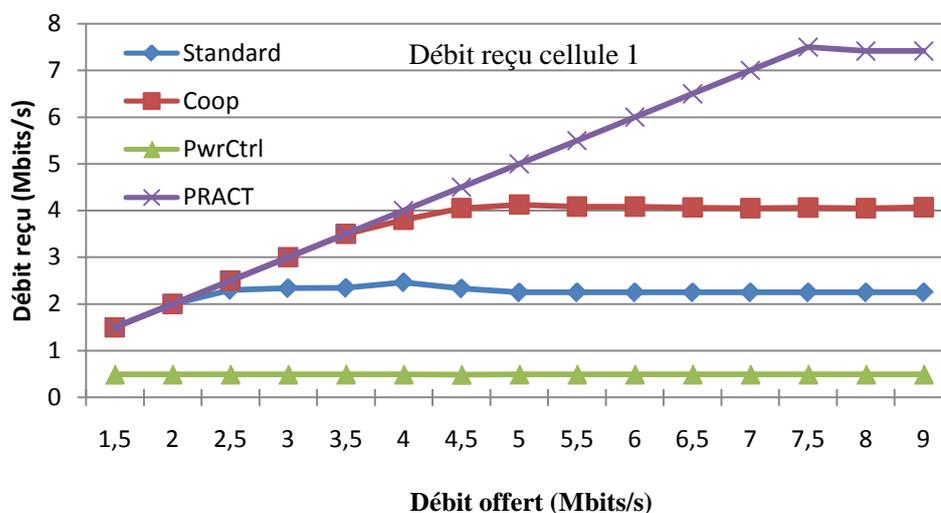


Figure 5.35 : Débit reçu vs. Débit offert pour scénario3 cellule1

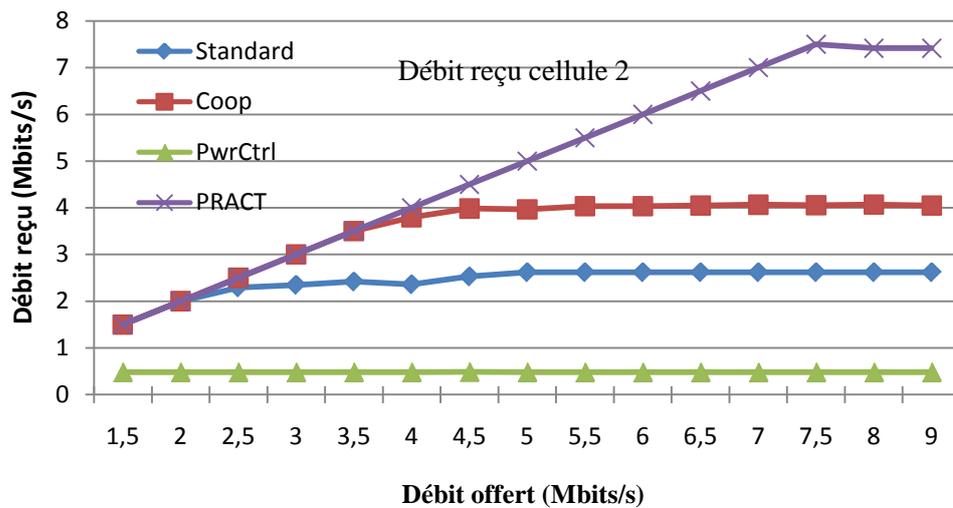


Figure 5.36 : Débit reçu vs. Débit offert pour scénario3 cellule2

5.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous évalué les performances du protocole PRACT, qui combine contrôle de puissance, adaptation de débit et la coopération. Effectuer à la fois du contrôle de puissance et de l'adaptation du débit permet une amélioration importante en termes de débit global et en termes de conservation d'énergie. De plus, lorsque nous utilisons la coopération en conjonction avec un mécanisme de TPRC, les performances du réseau peuvent être encore améliorées. La coopération est utilisée comme un mode complémentaire par rapport aux communications directes et non comme un concurrent. En outre, nous avons démontré que l'utilisation de seule la coopération ou du seul contrôle de puissance n'est pas suffisant pour réduire les interférences intercellulaires afin d'augmenter le débit global. En revanche, l'utilisation d'un mécanisme qui combine coopération et contrôle de puissance permet de réduire de manière significative ces interférences et par conséquent d'augmenter le débit global du réseau. Nous pouvons aussi conclure que le problème de « rate anomaly problem » peut être réduit avec l'utilisation de la coopération combinée avec le contrôle de puissance et l'adaptation du débit.



6. Conclusions et perspectives

6.1. Conclusions

Afin de répondre aux exigences croissantes des utilisateurs pour des communications robustes, rapides, fiables, économes, et avec une grande capacité, les futures communications sans fil doivent faire face à de grands défis comme celui de lutter contre la dynamique du canal radio. Ce canal radio n'est pas stable et est perturbé par plusieurs phénomènes, le fading, les bruits et les interférences. Cependant, il possède une caractéristique importante qui est sa nature différente. Les communications coopératives tirent profit de cette caractéristique clé, afin de combattre sa fragilité en offrant une diversité spatiale. Cette diversité dans les réseaux coopératifs est obtenue en utilisant les nœuds au voisinage d'une source et d'une destination comme des antennes virtuelles pour transmettre les données envoyées par la source. Les communications coopératives permettent potentiellement d'augmenter le débit global du réseau et de diminuer la consommation d'énergie. Afin d'améliorer les performances des réseaux sans fil, les techniques de coopération peuvent être combinées avec d'autres techniques de communications sans fil, comme le contrôle de puissance et l'adaptation de débit. C'est dans ce contexte que se situent les travaux de la thèse avec, comme cadre applicatif, les réseaux ad hoc.

En utilisant les communications coopératives avec les techniques de contrôle de puissance et d'adaptation de débit, le travail dans cette thèse offre des solutions afin de faire face à la non fiabilité du support sans fil, d'augmenter le débit global du réseau, de diminuer les délais, et de réduire la consommation d'énergie.

Notre première solution RACT propose un protocole coopératif permettant d'accélérer les communications lentes en choisissant un chemin à double sauts plus rapide et plus économe. En plus d'être un protocole coopératif, RACT comporte aussi un mécanisme permettant l'adaptation de débit pour les communications non coopératives classiques. Dans RACT, la sélection de relais et l'adaptation de débit sont réactives vis-à-vis des variations dynamiques du canal et de la topologie du réseau. Les résultats des simulations montrent que l'on peut améliorer considérablement les performances du protocole MAC IEEE

802.11[Isoi99], à savoir, le débit global et l'énergie consommée. En outre, le gain de transmission coopérative peut atteindre 70% avec l'utilisation d'un lien coopératif avec un débit de 54Mbits/s dans les deux sauts. Ce gain peut atteindre jusqu'à 75% si nous utilisons une carte réseau utilisant la version IEEE 802.11b avec le mode coopératif 11-11Mbit/s, voire davantage avec les nouvelles versions du standard qui permettent des débits plus élevés.

Power and Rate Adaptation with Cooperative Transmission (PRACT) a été notre deuxième solution pour les communications coopératives. Ce protocole combine un mécanisme TPRC avec un système coopératif afin d'améliorer les performances du réseau. Le protocole utilise la connaissance de l'état du canal et des consultations de tables pour choisir un couple puissance-débit qui permette d'augmenter le débit de la transmission courante tout en réduisant la consommation d'énergie. Afin de mieux s'adapter aux perturbations du canal radio instable, la sélection de la paire puissance-débit est faite pour chaque transmission de données. La table puissance-débit résume toutes les paires puissance-débit possibles autorisées par la carte réseau et qui sont optimales en termes de consommation d'énergie.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation du contrôle de puissance avec l'adaptation du débit en conjonction avec la coopération nous a permis de réduire sensiblement l'énergie consommée et d'augmenter le débit global. De plus, PACT permet de réduire les interférences intercellulaires et d'augmenter la réutilisation spatiale, ce qui améliore davantage le débit global. Le problème des stations à faible débit est également réduit. En outre, un point très important, auquel nous avons abouti, est que, pour économiser l'énergie consommée, il est préférable d'augmenter le débit de transmission plutôt que de réduire la puissance de transmission. Cependant, en raison du problème d'interférence et de la relation de dépendance entre débit PHY et puissance de transmission, un compromis entre réduction de puissance d'émission et augmentation de débit sera une bonne solution.

6.2. Perspectives

À travers des travaux effectués dans cette thèse, nous avons traité quelques problèmes relatifs aux communications coopératives, à savoir la sélection de relais, l'adaptation du débit et le contrôle de puissance. Néanmoins, plusieurs autres questions pourraient être traitées et des améliorations envisagées.

- Les scénarios utilisés dans notre travail concernent des réseaux moyennement denses (entre 9 et 30 nœuds). Cependant, il peut être important d'étudier des scénarios réseaux denses. Ainsi, notre premier objectif pour nos futurs travaux consiste à pousser encore la recherche et à étudier nos protocoles proposés dans différentes conditions de réseau, en particulier, le contexte de forte densité des nœuds. Cela nous permettra de voir l'impact de la forte charge du réseau sur les performances globales du système.

- Pour sélectionner le meilleur relais, nous avons utilisé un système distribué fondé sur la technique du back-off. Cette technique est très efficace lorsque nous utilisons une longue période de sélection de relais. Cependant, une longue période de sélection réduit l'efficacité de sélection de relais et réduit le gain de la coopération. A contrario, une courte période, augmente la probabilité de collision entre les relais potentiels. Par conséquent, il existe un compromis entre l'efficacité de sélection de relais et la probabilité de collision. Améliorer cette technique de contention entre les relais ou proposer d'autres solutions est une perspective pour nos futurs travaux. Plusieurs approches ont été proposées afin de réduire la probabilité d'une collision. Dans [MeSh10], deux approches optimales sont présentées. La première minimise la probabilité d'une collision entre plusieurs relais et la seconde minimise la durée de la sélection. L'étude et la mise en œuvre de ces régimes optimaux pourrait être un bon chemin à explorer.

- Dans cette thèse nous avons proposé deux protocoles coopératifs au niveau de la couche MAC. La couche MAC est responsable des transmissions de proche en proche. Pour un réseau entièrement connecté (fully-connected), l'utilisation de la coopération au niveau MAC uniquement, peut être suffisante pour améliorer les performances de ce réseau sur un seul saut. Cependant, dans un réseau ad hoc multi-saut, les nœuds ne sont pas forcément à portée les uns des autres, ils doivent impérativement faire appel à la couche réseau afin de communiquer avec les autres nœuds qui ne sont pas à leur portée. Cela permet de créer un réseau ad hoc multi-saut entièrement connecté. Par conséquent, l'utilisation de la coopération avec une approche inter-couche entre la couche MAC et la couche réseau peut être très bénéfique pour l'amélioration des performances du réseau ad hoc multi-saut.

Cette conception inter-couche entre les couches MAC et réseau peut être utilisée pour lutter contre la rupture des liens et pour établir des routes plus stables et profiter ainsi des avantages des communications coopératives en termes d'énergie économisée lorsque plusieurs terminaux coopèrent pour transmettre l'information au prochain saut le long de la route vers la destination. De plus, les informations de routage peuvent aider à améliorer la fiabilité de la transmission en prenant une meilleure décision de coopération [LVKA08]. Faire de la coopération avec une conception inter-couche MAC-réseau sera une autre perspective pour notre travail.

- Le contexte de notre travail été celui des réseaux sans fil ad hoc. En raison de leur nature sans infrastructure, ces réseaux sont relativement difficiles à gérer dans la mesure où il n'y a pas de contrôleur central qui permette de gérer tout le réseau. En revanche, les communications sans fil dans les réseaux WLANs sont faciles à gérer, puisque tout est centralisé et que le point d'accès contrôle et coordonne tout l'accès au support sans fil. Cependant, le problème des stations à faible débit reste encore un problème à régler dans ce type de réseaux. De plus, dans les réseaux WLANs, les interférences intercellulaires et la réutilisation spatiale représentent un grand défi à relever.

Nous pensons que l'implantation de notre protocole PRACT avec son contrôle de puissance et son adaptation de débit, peut apporter des solutions à ces problèmes dans les réseaux

WLANs. Le contrôle de puissance permet de réduire la zone d'interférences. Par conséquent, réduire les interférences entre cellules adjacentes utilisant la même fréquence de transmission et augmenter la réutilisation spatiale, tandis que l'adaptation du débit permet d'accélérer les transmissions depuis et vers le point d'accès. Ainsi, le problème des stations à faible débit sera réduit. Notre perspective d'implanter le protocole PRACT dans les réseaux WLANs, peut être considérée comme une continuation de notre travail, mais dans un autre contexte.

- Le protocole pourra aussi être déployé dans les réseaux de capteurs où la consommation d'énergie est un grand obstacle. Toutefois, le contexte de réseaux de capteurs va engendrer de nouveaux défis. Le réseau de capteurs est fondé sur le standard IEEE 802.15.4 [Ieee11]. Ce standard contrairement au standard Wifi (IEEE 802.11), ne propose pas d'échange des trames de contrôle RTS/CTS. Il faudra donc adapter PRACT pour acquérir des informations sur l'état du canal afin de choisir le mode de transmission (direct ou coopératif) et d'adapter le débit et la puissance. Par conséquent, il faudra trouver des solutions pertinentes pour contourner cet obstacle. En outre, dans, les deux protocoles proposés, nous avons utilisé comme métrique de sélection de relais la qualité de la liaison coopérative. Ainsi, vu l'importance de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs, nous pouvons ajouter à notre mécanisme de sélection de relais la métrique d'énergie résiduelle pour s'adapter mieux à ces réseaux.

Liste des publications

- ✓ Hicham Slimani, Benoit Escrig, Riadh Dhaou, and André-Luc Beylot, “Energy and Throughput Efficient Transmission Strategy with Cooperative Transmission in Ad-hoc Networks,” in The 9th IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing Conference - IWCMC '13 (Cagliari, Sardinia – Italy, 2013), pp. 381–386.

- ✓ Hicham Slimani, Benoit Escrig, Riadh Dhaou, and André-Luc Beylot, “Cooperative MAC Protocol with Distributed Relay Selection and Physical Rate Adaptation,” in The 10th IEEE Consumer Communications and Networking Conference - CCNC' 13 (Las Vegas, USA, 2013), pp. 641–644.

Acronymes

3G	Third Generation
4G	Fourth Generation
ACK	Acknowledgement
AF	Amplify and Forward
AHN	Ad Hoc Network
AP	Access Point
ARF	Auto Rate Feedback
AARF	Adaptative Auto Rate Feedback
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BC	Broadcast Channel
BEB	Binary Exponential Backoff
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BSS	Basic Service Set
CDMA	Code Division Multiple Access
CD-MAC	Cooperative Diversity MAC
CF	Compress and Forward
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CSMA/CA Avoidance	Carrier Sense Multiple Access with Collision
CTS	Clear-To-Send
CCTS	Cooperative Clear-To-Send
CFC	Clear For Cooperation
CW	Contention Window
DARPA	Defense Advanced Projects Agency
DCF	Distributed Coordination Function
DIFS	DCF Inter Frame
DF	Decode and Forward
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DSTBC	Distributed Space Time Block Coding

EIFS	Extended Inter Frame
EMR	Efficient Multi-rate Relying
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
IBSS	Independent Basic Service Set
IR	Infra Red
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LLC	Logical Link Control
MAC	Medium Access Control
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MANET	Mobile Ad hoc Network
MRC	Maximum Ratio Combining
NAV	Network Allocation Vector
NIC	Network Interface Card
NGN	Next Generation Network
NS2	Network Simulator
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSI	Open System Interconnection
PCF	Point Coordination Function
PCS	Physical Carrier Sensing
PDA	Personal Digital Assistant
PC	Personal Computer
PDP	Packet Drop Probability
PDT	Packet Drop Time
PLCP	Physical layer convergence procedure
PMD	Physical Medium Dependant
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RAMA	Relay-Aided Medium Access
RA	Rate Adaptation

RACT	Rate Adaptation with Cooperative Transmission
RAAM	Rate Adaptation Mechanism
RBAR	Receiving-based Auto Rate
RCTS	Relay-Clear-To-Send
rDCF	relay-enabled Distributed Coordination Function
RTR	Ready-To-Relay
RTS	Ready-To-Send
SIFS	Short Inter Frame Space
SINR	Signal-to-Interference plus Noise ratio
SNR	Signal-to-Noise ratio
SF	Store and Forward
STC	Space Time Coding
TDMA	Time Division Multiple Access
TPC	Transmit Power Control
TPRC	Transmit Power and Rate Control
VCS	Virtual Carrier Sensing
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Networks

Bibliographies

- [Abdr08] ABDRABOU, A.: Network-layer resource allocation for wireless ad hoc networks. *Ph.D. dissertation, University of Waterloo, 2008.*
- [AbJT03] A. BARRETO ; JELLITTO, H. ; TRUONG, J.: Power and rate adaptation in IEEE 802.11a wireless LANs. In: *IEEE VTC'03, 2003*
- [ACKT07] AGARWAL, N ; CHANNEGOWDA, D ; KANNAN, L ; TACCA, M ; FUMAGALLI, A: IEEE 802.11b cooperative protocols - a performance study. In: *LECT NOTES COMPUT SC'07, 2007*
- [AgJ11] AGUILAR, T ; -J., S: CoopGeo: a beaconless geographic cross-layer protocol for cooperative wireless ad hoc networks. In: *IEEE Trans. Wireless Commun.* vol. 10 (2011), Nr. 8, pp. 2554–2565
- [AJEL07] A. E., KHANDANI ; J., ABOUNADI ; E., MODIANO ; L., ZHENG: Cooperative routing in static wireless networks. In: *IEEE Trans. Commun.* vol. 55 (2007), Nr. 11, pp. 2185–2192
- [AKAV11] ALONSO-Z´ARATE, J ; KARTSAKLI, E ; ALONSO, L ; VERIKOUKIS, C: *Cooperative ARQ: a medium access control (MAC) layer perspective* : Radio Communications, Bazzi, Sciyo, 2011
- [Alam98] ALAMOUTI, S: A simple transmit diversity technique for wireless communications. In: *IEEE J. Select. Areas Commun.* vol. 16 (1998), Nr. 8, pp. 1451–1458
- [Alfa00] ALFA-NETWORKS: *Alfa* *AWUS036NH.* URL
http://www.alfa.com.tw/press_c_show.php?sn=5
- [ASSA11] ALONSO-ZARATE, J ; STAVROU, E ; STAMOU, A ; ANGELIDIS, P ; ALONSO, L ; VERIKOUKIS, C: Energy-efficiency evaluation of a medium access control protocol for cooperative ARQ. In: *IEEE ICC'11, 2011*
- [BKRL06] BLETSAS, A ; KHISTI, A ; REED, D ; LIPPMAN, A: A simple cooperative diversity method based on network path selection. In: *IEEE J. Select. Areas Commun.* vol. 24 (2006), Nr. 3, pp. 659–672
- [BLL09] B., GUI ; L., DAI ; L. J., CIMINI JR.: Routing strategies in multihop cooperative networks. In: *IEEE Trans. Commun.* vol. 8 (2009), Nr. 2, pp. 843–855
- [BILR05] BLETSAS, A ; LIPPNIAN, A ; REED, D P: A simple distributed method for relay selection in cooperative diversity wireless networks, based on reciprocity and channel measurements. In: *VTC'05.* vol. 3, 2005, pp. 1484–1488
- [CaFL11] CAO, B ; FENG, G ; LI, Y: Relay selection for cooperative MAC considering retransmission overhead. In: *IEEE GLOBECOM'11, 2011*
- [CES03] C., PERKINS ; E. B., ROYER ; S., DAS.: Ad hoc On-Demand Distance. Vector (AODV) Routing. In: *IETF Network Working Group, RFC 3561, 2003*

- [ChYW07] CHOU, CHUN-TING ; YANG, JUN ; WANG, DONG: Cooperative MAC Protocol with Automatic Relay Selection in Distributed Wireless Networks. In: *IEEE PerCom Workshops '07*, 2007, pp. 526–531
- [Cisc00] CISCO: *Cisco Aironet 350 Series*. URL <http://www.cisco.com/en/US/products/hw/wireless/ps458/index.html>
- [CoGa79] COVER, T. M. ; GAMAL, A. A. E.: Capacity Theorems for the Relay Channel. In: *IEEE Trans. Inform. Theory* vol. 25 (1979), Nr. 5, pp. 572 – 584
- [CP94] C., PERKINS ; P., BHAGWAT: Highly dynamic destination-sequenced distance-vector (DSDV) for mobile computers. In: *ACM SIGCOMM'94*, 1994, pp. 153–181
- [CuGB04] CUI, S ; GOLDSMITH, A ; BAHAI, A: Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks. In: *IEEE J. Select. Areas Commun.* vol. 22 (2004), Nr. 6, pp. 1089–1098
- [CZZZ07] CHEN, CHAO ; ZHENG, BAOYU ; ZHAO, XIANJING ; ZHENYA YAN: A novel weighted cooperative routing algorithm based on distributed relay selection. In: *IEEE ISWPC'07*, 2007, pp. 224–229
- [DbDa96] D. B., JOHNSON ; D. A., MALTZ: Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In: *Mobile computing edited by Tomasz Imielinski and Henry F. Korth, Kluwer Academic Publishers*, 1996, pp. 153–181
- [DLNS06] DIANATI, M ; LING, X ; NAIK, K ; SHEN, X: A node-cooperative ARQ scheme for wireless ad hoc networks. In: *IEEE Trans. on Veh. Technol.* vol. 55 (2006), Nr. 3, pp. 1032–1044
- [Dpor02] D. PORCINO, G. SHOR: Response to CFA - ULTRAWAVES. *IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE 802.15-SGAP3a-02/119r0*, 2002.
- [Ecva71] E. C. VAN DER MEULEN: Channels, Three-terminal communication. In: *Advances in Applied Probability* vol. 3 (1971), pp. 120–154
- [Escr11a] ESCRIG, B: Splitting algorithm for DMT optimal cooperative MAC protocols in wireless mesh networks. In: *Physical Communication* vol. 4 (2011), Nr. 3, pp. 218–226
- [Escr11b] ESCRIG, B: DMT Optimal Cooperative Protocols with Destination-Based Selection of the Best Relay. In: *IEEE Trans. Wireless Commun.* vol. 10 (2011), Nr. 7, pp. 2218–2227
- [Escr13] ESCRIG, BENOÎT ; CHILAMKURTI, N. (ed.): *Security, Design, and Architecture for Broadband and Wireless Network Technologies* : IGI Global, 2013 — ISBN 9781466639027
- [EsRo09] ESCRIG, B ; ROVIRAS, D: Optimal Cooperative MAC Protocol for IEEE 802.11-based Mesh Networks. In: *International Conference on Next Generation Wireless Systems 2009*, 2009
- [FoGa98] FOSCHINI, G. ; GANS, M.: On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. In: *Wireless personal communications* vol. 6 (1998), Nr. 3, pp. 311–335

- [Fosc96] FOSCHINI, G.: Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multielement antennas. In: *Bell labs technical journal* vol. 1 (1996), Nr. 2, pp. 41–59
- [FRBD03] FRANCK, MARTIN HEUSSE ; ROUSSEAU, FRANCK ; BERGER-SABBATEL, GILLES ; DUDA, ANDRZEJ: Performance Anomaly of 802.11b. In: *IEEE INFOCOM*, 2003, pp. 836–843
- [GuCW08] GUO, TAO ; CARRASCO, R ; WOO, WAI LOK: Performance of a Cooperative Relay-Based Auto-Rate MAC Protocol for Wireless Ad Hoc Networks. In: *VTS'08*, 2008, pp. 11–15
- [Guo09] GUO, ROLANDO CARRASCO TAO: CRBAR: Cooperative Relay-Based Auto Rate MAC for Multirate Wireless Networks. In: *IEEE Trans. Commun.* vol. 8 (2009), pp. 5938–5947
- [HeLi11] HE, X ; LI, F: An optimal energy efficient cooperative retransmission MAC scheme in wireless networks. In: *Wireless VITAE'11*, 2011
- [HKRW03] HAMMERSTROEM, I ; KUHN, M ; RANKOV, B ; WITTNEBEN, A: Space-time processing for cooperative relay networks. In: *VTC'03-Fall*. vol. 1, 2003, pp. 404–408
- [HoVB01] HOLLAND, GAVIN ; VAIDYA, NITIN ; BAHL, PARAMVIR: A rate-adaptive MAC protocol for multi-Hop wireless networks. In: *ACM Mobicom'01*: ACM, 2001 — ISBN 1-58113-422-3, pp. 236–251
- [HRBD03] HEUSSE, M ; ROUSSEAU, F ; BERGER-SABBATEL, G ; DUDA, A: A Performance anomaly of 802.11b. In: *IEEE INFOCOM'03*, 2003
- [HuNo02] HUNTER, T. E. ; NOSRATINIA, A.: Cooperation diversity through coding. In: *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, 2002, p. 220
- [HuTh10] HU, Z ; THAM, C: CCMAC: coordinated cooperative MAC for wireless LANs. In: *Computer Networks* vol. 54 (2010), Nr. 4, pp. 618–630
- [IbHL07] IBRAHIM, A S ; HAN, ZHU ; LIU, K J R: Distributed Energy-Efficient Cooperative Routing in Wireless Networks. In: *IEEE GLOBECOM '07*, 2007, pp. 4413–4418
- [Ieee00] IEEE-STD: Supplement to IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange Between Systems- Local and Metropolitan Area Networks- Specific Requirements- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Sp. In: *IEEE Std 802.11b-1999* (2000)
- [Ieee06] IEEE-STD: *IEEE Std 802.11gTM-2003 Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band*, 2006
- [Ieee11] IEEE-STD: IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and Metropolitan networks-specific requirements-Part II: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Amendment. In: *Amendment to IEEE Std* (2011), pp. 1–208

- [Ieee99] IEEE-STD: Supplement to IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY). In: *IEEE Std 802.11a-1999* (1999)
- [Isoi99] ISO/IE 8802-11: 1999(E), 1999: *IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications*, 1999
- [ISSK08] IBRAHIM, A. S. ; SADEK, A. K. ; SU, W. ; K. J. R. LIU: Cooperative communications with relay-selection: when to cooperate and whom to cooperate with? In: *IEEE Trans. Wireless Commun.* vol. 7 (2008), Nr. 7, pp. 2814–2827
- [JiDB10] JIBUKUMAR, M ; DATTA, R ; BISWAS, P: CoopMACA: a cooperative MAC protocol using packet aggregation. In: *Wireless Networks* vol. 16 (2010), Nr. 7, pp. 1865–1883
- [JKFK06] JAKLLARI, G ; KRISHNAMURTHY, S V ; FALOUTSOS, MICHALIS ; KRISHNAMURTHY, P V ; ERCETIN, O: A Framework for Distributed Spatio-Temporal Communications in Mobile Ad Hoc Networks. In: *INFOCOM'06*, 2006, pp. 1–13
- [KaMo97] KAMERMAN, A ; MONTEBAN, L: *WaveLAN II: A high performance wireless LAN for the unlicensed band* : Bell Labs Technical Journal, Tech, 1997
- [KaSS02] KANODIA, V ; SABHARWAL, A ; SADEGHI, E KNIGHTLY B: Opportunistic Media Access for Multirate Ad Hoc Networks. In: *ACM Mobile Computing and Networking'02*, 2002
- [KrMY06] KRAMER, G. ; MARIĆ, I. ; YATES, R. D.: Cooperative Communication. In: *Foundations and Trends in Networking* vol. 1 (2006), Nr. 3-4, pp. 271 – 425
- [KuRD06] KUMAR, SUNIL ; RAGHAVAN, VINEET S ; DENG, JING: Medium Access Control protocols for ad hoc wireless networks : A survey. In: *Ad Hoc Netw.* vol. 4 (2006), Nr. 3, pp. 326–358
- [KWIS11] KHALID, M ; WANG, Y. ; I. HO RA ; SANKAR, R.: Two-relay-based cooperative MAC protocol for wireless ad hoc networks. In: *IEEE Trans. Veh. Technol.* vol. 60 (2011), Nr. 7, pp. 3361–3373
- [LaWo00] LANEMAN, J. N. ; WORNELL, G. W.: Energy-efficient antenna sharing and relaying for wireless networks. In: *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2000, pp. 7 – 12
- [LaWo03] LANEMAN, J ; WORNELL, G: Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks. In: *IEEE Trans. Inform. Theory* vol. 49 (2003), Nr. 10, pp. 2415–2425
- [LaWT01] LANEMAN, J. N. ; WORNELL, G. W. ; TSE, D. N. C.: An efficient protocol for realizing cooperative diversity in wireless networks. In: *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, 2001

- [LiLZ08] LIU, Y ; LIU, K ; ZENG, F: A relay-contention-free cooperative MAC protocol for wireless networks. In: *IEEE Globecom'08*, 2008
- [LiTP05] LIU, PEI ; TAO, ZHIFENG ; PANWAR, S: A cooperative MAC protocol for wireless local area networks. In: *ICC'05*. vol. 5, 2005, pp. 2962–2968
- [LTNK07] LIU, P ; TAO, Z ; NARAYANAN, S ; KORAKIS, T ; PANWAR, S S: CoopMAC: a cooperative MAC for wireless LANs. In: *IEEE J. Select. Areas Commun.* vol. 25 (2007), Nr. 2, pp. 340–354
- [LVKA08] LICHTÉ, H ; VALENTIN, S ; KARL, H ; AAD, I ; LOYOLA, L ; WIDMER, J: Design and evaluation of a routing-informed cooperative MAC protocol for ad hoc networks. In: *IEEE INFOCOM'08*, 2008
- [Madw11] MADWIFI: The minstrel autorate selection algorithm (2011)
- [MoYu11] MOH, S ; YU, C: A cooperative diversity-based robust MAC protocol in wireless ad hoc networks. In: *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.* vol. 22 (2011), Nr. 3, pp. 353–363
- [MuRZ11] MUNARI, A ; ROSSETTO, F ; ZORZI, M: Impact of medium access control strategies on the effectiveness of advanced cooperative hybrid ARQ techniques. In: *IEEE Trans. Commun.* vol. 10 (2011), Nr. 9, pp. 2860–2871
- [MYAB09] MARCHENKO, N ; YANMAZ, E ; ADAM, H ; BETTSTETTER, C: Selecting a spatially efficient cooperative relay. In: *IEEE GLOBECOM'09*, 2009
- [NaPa07] NARAYANAN, S. ; PANWAR, S.S.: To forward or not to forward – that is the question. In: *Wireless Personal Communications* vol. 43 (2007), Nr. 1
- [NoHH04] NOSRATINIA, A. ; HUNTER, T. E. ; HEDAYAT, A.: Cooperative Communication in Wireless Networks. In: *IEEE Communication Magazine* vol. 42 (2004), pp. 74 – 80
- [Ns00] NS2: *Network Simulator 2*. URL <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [NSGA11] NACEF, A ; SENOUCI, S ; GHAMRI-DOUDANE, Y ; A.-L., BEYLOT: COSMIC: a cooperative MAC protocol for WSN with minimal control messages. In: *IFIP NTMS'11*, 2011
- [OhLe11] OH, C Y ; LEE, T J: Cooperative MAC protocol using active relays for multi-rate WLANs. In: *J. Commun. Netw.* vol. 13 (2011), Nr. 5, pp. 463–471
- [QCJS03] QIAO, DAJI ; CHOI, SUNGHYUN ; JAIN, AMIT ; SHIN, KANG G: MiSer: an optimal low-energy transmission strategy for IEEE 802.11a/h. In: *Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*. New York, NY, USA : ACM, 2003 — ISBN 1-58113-753-2, pp. 161–175
- [QiCS07] QIAO, D ; CHOI, SUNGHYUN ; SHIN, K G: Interference Analysis and Transmit Power Control in IEEE 802.11a/h Wireless LANs. In: *IEEE/ACM Transactions on Networking* vol. 15 (2007), Nr. 5, pp. 1007–1020

- [RiCG05] RIBEIRO, A ; CAI, X ; GIANNAKIS, G: Symbol error probabilities for general cooperative links. In: *IEEE Trans. Wireless Commun.* vol. 4 (2005), Nr. 3, pp. 1264–1273
- [RNAJ09] R., MADAN ; N. B., MEHTA ; A. F., MOLISCH ; J., ZHANG: Energy-efficient decentralized cooperative routing in wireless networks. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* vol. 54 (2009), Nr. 3, pp. 512–527
- [SeEA03a] SENDONARIS, A. ; ERKIP, E. ; AAZHANG, B.: User cooperation diversity, part II: implementation aspects and performance analysis. In: *IEEE Trans. Commun.* vol. 51 (2003), Nr. 11, pp. 1939 – 1948
- [SeEA03b] SENDONARIS, A. ; ERKIP, E. ; AAZHANG, B.: User Cooperative Diversity, Part I: System. In: *IEEE Trans. Commun.* vol. 52 (2003), Nr. 11, pp. 1927 –1938
- [SeEA03c] SENDONARIS, A ; ERKIP, E ; AAZHANG, B: User cooperation diversity. Part I. System description. In: *IEEE Trans. Commun.* vol. 51 (2003), Nr. 11, pp. 1927–1938
- [ShCZ11] SHAN, H ; CHENG, H T ; ZHUANG, W: Cross-layer cooperative MAC protocol in distributed wireless networks. In: *IEEE Trans. Commun.* vol. 10 (2011), Nr. 8, pp. 2603–2615
- [ShMY10] SHAH, V ; MEHTA, N ; YIM, R: Splitting algorithms for fast relay selection: generalizations, analysis, and a unified view. In: *IEEE Trans. Wireless Commun.* vol. 9 (2010), Nr. 4, pp. 1525–1535
- [ShZW09a] SHAN, H ; ZHUANG, W ; WANG, Z: Cooperation or not in mobile ad hoc networks: a MAC perspective. In: *IEEE ICC'09, 2009*
- [ShZW09b] SHAN, HANGGUAN ; ZHUANG, WEIHUA ; WANG, ZONGXIN: Distributed cooperative MAC for multihop wireless networks. In: *IEEE Communications Magazine* vol. 47 (2009), Nr. 2
- [SuSL03] SU, W. ; SAFAR, Z. ; LIU, K.: Space-time signal design for time-correlated Rayleigh fading channels. In: *IEEE ICC'03, 2003*
- [SWZZ08] SHAN, H. ; WANG, P. ; ZHUANG, W. ; Z. WANG: Cross-layer cooperative triple busy tone multiple access for wireless networks. In: *IEEE Globecom'08, 2008*
- [Szh08] S.ZHOU J.-H. CUI ; ZHOU, S CUI Z: Energy-efficient cooperative communication based on power control and selective single-relay in wireless sensor networks. In: *IEEE Trans. Wireless Commun.* vol. 7 (2008), Nr. 8, pp. 3066–3078
- [VaCo03] VALENTI, M. ; CORREAL, N.: Exploiting macrodiversity in dense multihop networks and relay channels. In: *IEEE WCNC'03, 2003*
- [VLKV06] VALENTIN, STEFAN ; LICHTER, HERMANN S ; KARL, HOLGER ; VIVIER, GUILLAUME: Cooperative wireless networking beyond store-and-forward: perspectives for PHY and MAC design. In: *Wireless World Research Forum, WWRF '06, WG3 whitepaper, 2006*

- [WaCL12] WANG, Z ; CHEN, Y ; LI, C: CORMAN: a novel cooperative opportunistic routing scheme in mobile ad hoc networks. In: *IEEE J. Select. Areas Commun.* vol. 30 (2012), Nr. 2, pp. 289–296
- [YSLA07] Y., SUNG ; S., MISRA ; L., TONG ; A., EPHREIMIDES: Cooperative routing for distributed detection in large sensor networks. In: *IEEE J. Select. Areas Commun.* vol. 25 (2007), Nr. 2, pp. 471–483
- [ZhCa05] ZHU, HAO ; CAO, GUOHONG: rDCF: a relay-enabled medium access control protocol for wireless ad hoc networks. In: *INFOCOM '05*. vol. 1, 2005, pp. 12–22 vol. 1
- [ZhCa06] ZHU, H ; CAO, G: rDCF: a relay-enabled medium access control protocol for wireless ad hoc networks. In: *IEEE Trans. Mobile Comput.* vol. 5 (2006), Nr. 9, pp. 1201–1214
- [ZhIs12] ZHUANG, W ; ISMAIL, M: Cooperation in wireless communication networks. In: *IEEE Wireless Commun. Mag.* vol. 19 (2012), Nr. 2, pp. 10–20
- [ZhZh08a] ZHANG, J ; ZHANG, Q: Cooperative routing in multi-source multi-destination multi-hop wireless networks. In: *IEEE INFOCOM'08, 2008*
- [ZhZh08b] ZHANG, Q ; ZHANG, Y: Cross-layer design for QoS support in multihop wireless networks. In: *Proceedings of the IEEE* vol. 96 (2008), Nr. 1, pp. 64–76
- [ZhZh13] ZHOU, Y ; ZHUANG, W: “Beneficial cooperation ratio in multi-hop wireless ad hoc networks. In: *IEEE INFOCOM'13, 2013*
- [ZhZM12] ZHAI, C ; ZHANG, W ; MAO, G: Uncoordinated cooperative communications with spatially random relays. In: *IEEE Trans. Commun.* vol. 11 (2012), Nr. 9, pp. 3126–3135
- [ZJA05] Z., YANG ; J., LIU ; AND A., HOST-MADSEN: Cooperative routing and power allocation in ad hoc networks. In: *IEEE GLOBECOM'05, 2005*, pp. 153–181
- [ZLZX09] ZHAI, C ; LIU, J ; ZHENG, L ; XU, H: Lifetime maximization via a new cooperative MAC protocol in wireless sensor networks. In: *IEEE GLOBECOM'09, 2009*
- [ZLZZ10] ZHOU, Y ; LIU, J ; ZHAI, C ; ZHENG, L: Two-transmitter two-receiver cooperative MAC protocol: cross-layer design and performance analysis. In: *IEEE Trans. Veh. Technol.* vol. 59 (2010), Nr. 8, pp. 4116–4127
- [ZLZZ11] ZHOU, Y ; LIU, J ; ZHENG, L ; ZHAI, C ; CHEN, H: Link-utility-based cooperative MAC protocol for wireless multi-hop networks. In: *IEEE Trans. Commun.* vol. 10 (2011), Nr. 3, pp. 995–1005
- [ZSHM11] ZHOU, T ; SHARIF, H ; HEMPEL, M ; MAHASUKHON, P ; WANG, W ; MA, T: A novel adaptive distributed cooperative relaying MAC protocol for vehicular networks. In: *IEEE J. Select. Areas Commun.* vol. 29 (2011), Nr. 1, pp. 72–82
- [ZZSW05] ZHENG, H. ; ZHU, Y. ; SHEN, C. ; WANG, X.: On the effectiveness of Cooperative Diversity in Ad Hoc Networks: A MAC layer study. In: *IEEE ICASSP'05, 2005*, pp. 509 – 512