

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
**UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMCCEN**  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET ELECTRONIQUE



# MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de  
**MASTER en**

**Réseaux Mobile et Systèmes de Télécommunications**

Réalisé par

- SI ABDELKADER Sarah
- MESLI Amina

THEME

**Conception et implémentation d'un protocole MAC  
coopératif pour le standard IEEE 802.11 sous  
l'environnement Network Simulator**

Soutenu en 23 Mai 2016 devant le Jury:

Dr. M. HADJILA	MC à l'Université de Tlemcen	Président
Dr. R. MERZOUGUI	MC à l'Université de Tlemcen	Examineur
Dr. H. SLIMANI	MC à l'Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2015 - 2016

# REMERCIEMENT

*Nous tenons à remercier tout d'abord DIEU le tout puissant qui nous a donné durant toutes ces années la santé, le courage et la foi.*

*Nous tiendrons à remercier, monsieur **SLIMANI HICHAM**, pour avoir accepté de nous encadrer, pour ses conseils judicieux et sa grande disponibilité. Nous lui exprimons notre profonde gratitude pour nous avoir fait profiter de ses connaissances, mais aussi de sa méthode de travail.*

*Nous remercions également les membres de jury de nous avoir fait l'honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail.*

*Nous tiendrons aussi à exprimer toute notre gratitude envers nos parents, nos frères et nos sœurs dont l'aide et l'encouragement.*

*Nous terminerions en remerciant tous les amis et les collègues qui ont aidé à l'accomplissement de ce travail.*

*Sarah & Amina*

# RÉSUMÉ

---

Le concept de la communication coopérative a été proposé afin d'améliorer la capacité et la fiabilité de transmission des liaisons sans fil ainsi que la couverture du réseau multi-utilisateurs. Selon les normes IEEE 802.11, un réseau WLAN peut prendre en charge plusieurs débits de données de transmission en fonction de l'état du canal instantané entre deux stations. Dans un tel réseau à multi-débit, les stations à faible débit occuperont le canal de communication pour une période plus longue, lors de la transmission d'un paquet, que les autres stations à haut débit qui seront pénalisées en conséquence. De plus, ce problème, connu sous le nom "*rate anomaly problem*", va affecter le débit global du réseau.

Le protocole coopératif CLA-MAC, étudié dans ce travail, peut remédier à ce problème de débit dans les réseaux WLAN. Dans ce protocole, il y a deux modes de transmission de données : un mode direct : de la source à la destination et un mode coopératif en utilisant un relais. Ce dernier mode est déclenché lorsque la destination a échoué à décoder les données directement depuis la source. Dans ce cas, la destination sélectionnera le relais avec la meilleure qualité de canal.

Dans ce travail, nous avons montré par la simulation sur NS2 que la coopération, plus précisément, le protocole CLA-MAC peut, en plus de l'augmentation du débit global, réduire l'énergie consommée et améliorer la fiabilité de la transmission sans fil.

## MOT CLÉS:

Coopération, CLA-MAC, Débit global, IEEE 802.11, NS2, relais.

# ABSTRACT

---

The concept of cooperative communication has been proposed to improve the capacity and reliability of the transmission in wireless links and enhance the coverage of multi-user network. According to the IEEE 802.11 standards, a WLAN can support multiple transmission data rates depending on the state of the instantaneous channel between two stations. In such a multi-data-rate network, low data-rate stations occupy the channel for a longer period during the transmission of a packet, then the other high data-rate stations that will be penalized accordingly. Moreover, this problem, known as the “the rate anomaly problem”, will affect the overall network throughput.

The cooperative protocol CLA-MAC, studied in this work, can solve this throughput problem in WLANs. In this protocol, there are two data transmission modes: direct mode: from the source to the destination and a cooperative mode by using a relay. This last mode, is triggered when the destination failed in decoding the data directly from the source. In this case, the destination selects the relay with the best channel quality.

In this work, we have shown by simulation on NS2 that cooperation, more precisely, CLA-MAC protocol can, in addition to increasing the overall throughput, reduce energy consumption and improve the reliability of the wireless transmission.

## KEYWORDS:

Cooperation, CLA-MAC, throughput, IEEE 802.11, NS2, relays.

## ملخص

تم إقتراح مفهوم الإتصال التعاوني لتحسين قدرة الإرتباط، موثوقية النقل وتغطية الشبكة للمستخدمين. طبقا لمعايير IEEE802.11 فإن شبكات WLAN يمكن أن تحتوي علي عدة سرعات لنقل البيانات إعتقادا على الحالة اللحظية للقناة بين محطتين. في بعض شبكات WLAN متعددة السرعات نجد محطات ذات التدفق منخفض تحثل قناة الإتصال لفترة أطول لنقل البيانات.

البروتوكول التعاوني MAC – CLA يمكن حل مشكلة التدفق لنقل البيانات في الشبكات WLAN. في هذا البروتوكول يوجد إحتمايين لنقل البيانات: إما مباشرة من المصدر إلى الوجهة، أو تعاونية بإستخدام وسيط، نقل البيانات بشكل تعاوني تكون في حالة فشل المحطة المستقبلية في فك البيانات فتختار وسيط مع أفضل نوعية للقناة.

لقد أضحونا عن طريق المحاكاة على NS2 أن البروتوكول CLA - MAC يمكن أن يقلل من إستهلاك الطاقة ويزيد الإنتاجية الشاملة و يجعل الإنتقال أكثر موثوقية.

## كلمات البحث:

التعاون، CLA-MAC، سرعات نقل البيانات، IEEE 802.11، NS2

# TABLE DES MATIÈRES

Résumé	i
Table des figures	iv
Introduction générale	1
<b>Chapitre I : Etat de l'art</b>	
I.1 Introduction	5
I.2 Les réseaux sans fil	5
I.2.1 Définition	5
I.2.2 Protocoles MAC dans les réseaux sans fil	6
I.2.3 Les sources de perturbation pour une communication sans fil	7
I.3 Les communications coopératives	8
I.4 La coopération à différents niveaux	9
I.4.1 La coopération au niveau physique	9
I.4.2 Coopération à la couche MAC	10
I.4.2.1 Les protocoles MAC coopératifs proactifs et réactifs	15
I.4.2.1.1 Protocoles réactifs	16
I.4.2.1.2 Protocoles proactifs	18
I.4.3 Coopération à la couche réseaux	21
I.5 Classification des systèmes coopératifs	21
I.6 Les avantages et les inconvénients de la communication coopérative	23
I.7 Conclusion	25
<b>Chapitre II : Le standard IEEE 802.11</b>	
II.1 Introduction	27
II.2 La norme IEEE 802.11	27
II.2.1 Généralités	27
II.2.2 La famille IEEE 802 et les standards 802.11	27
II.3 Topologies	29
II.3.1 Réseaux WLAN avec Infrastructure	29
II.3.2 Réseau WLAN Ad Hoc	29
II.4 Architecture de la norme IEEE 802.11	29
II.4.1 La couche physique	30
II.4.2 La couche liaison de données	30
II.5 Protocoles d'accès au médium sans fil pour la norme 802.11	30
II.5.1 CSMA/CA (CSMA with Collision Avoidance)	30
II.6 Les problèmes de standard IEEE 802.11	32
II.7 Format générale des trames MAC	33
II.7.1 Format des trames les plus courantes	35
II.8 Diagramme de fonctionnement	36
II.9 Conclusion	37

<b>Chapitre III : Cla-mac: Cooperative Load-Adaptive MAC</b>	
III.1	Introduction ..... 40
III.2	Processus de communication ..... 40
III.3	Format des trames dans le protocole CLA-MAC ..... 41
III.3.1	Trame d’acquittement ACK ..... 42
III.3.2	Trame d’acquittement négative NACK ..... 42
III.3.3	Trame de demande de relais RReq ..... 43
III.3.4	Trame de demande REQ ..... 44
III.3.5	Trame de répondre REP ..... 44
III.3.6	Trame de données ..... 45
III.4	Mécanisme de commande ..... 46
III.4.1	Phase d'initialisation ..... 46
III.4.1.1	Description du Mécanisme ..... 46
III.4.1.2	Les tables de voisins ..... 50
III.4.2	Transmission directe ..... 52
III.4.2.1	Processus de communication Source-Destination ..... 53
III.4.3	Transmission coopérative ..... 55
III.4.3.1	Diagramme d'activité ..... 58
III.4.4	Sélection de relais ..... 59
III.5	Conclusion ..... 61
<b>Chapitre IV : Implémentation du protocole CLA-MAC</b>	
IV.1	Introduction ..... 63
IV.2	Environnement de simulation ..... 63
IV.3	Implémentation du protocole CLA-MAC ..... 64
IV.3.1	Implémentation de la phase d’initialisation ..... 64
IV.3.2	Implémentation de la transmission directe ..... 67
IV.3.3	Implémentation de la transmission coopérative ..... 69
IV.3.4	Implémentation de la phase de sélection de relais ..... 71
IV.4	Résultat de simulation ..... 72
IV.5	Conclusion ..... 78
	Conclusion générale ..... 77
	Acronymes ..... 78
	Bibliographies ..... 81

# TABLE DES FIGURES

Figure I.1 : Transmission directe et coopérative .....	8
Figure I.2 : L'impact de la coopération sur l'interférence .....	11
Figure I.3: Fonctionnement du protocole .....	15
Figure I.4 : Classifications des protocoles MAC coopératifs .....	16
Figure I.5 : Classification des systèmes coopératifs .....	22
Figure I.6 : La consommation d'énergie dans différents protocoles .....	24
Figure II.1: Réseau WLAN avec infrastructure .....	29
Figure II.2: Réseau WLAN Ad Hoc .....	29
Figure II.3: Les IFS et le backoff dans le mode CSMA/CA .....	31
Figure II.4: Nœuds cachés simples .....	32
Figure II.5: Le phénomène des nœuds exposés .....	33
Figure II.6: Le phénomène de la zone grise .....	33
Figure II.7: Trame 802.11 .....	34
Figure II.8: Trame RTS .....	35
Figure II.9: Trame CTS .....	36
Figure II.10: Trame ACK .....	36
Figure II.11: Procédure CSMA/CA .....	37
Figure III.1: Scénario simple de protocole CLA-MAC .....	41
Figure III.2: Les quatre champs de la trame ACK .....	42
Figure III.3 : Les cinq champs de la trame NACK .....	43
Figure III.4: La trame RReq .....	43
Figure III.5: La trame REQ .....	44
Figure III.6: La trame REP .....	45
Figure III.7: La trame de données .....	45
Figure III.8 : Diffusion de REQ par le nœud 1 .....	47
Figure III.9 : Diffusion de REQ par le nœud 2 .....	47
Figure III.10 : Le temps de transmission de trame REQ .....	48
Figure III.11 : Diffusion de REP par le nœud 1 .....	49
Figure III.12 : Création de table de voisin à 1-saut .....	50
Figure III.13 : Création de la table de voisins à 2-sauts .....	51
Figure III.14 : Transmission directe – nœud 1 transmette les données .....	52
Figure III.15 : Transmission directe – nœud 2 transmette ACK .....	53
Figure III.16 : Transmission directe – processus de communication .....	54
Figure III.17 : Le modèle two-ray ground reflection .....	54
Figure III.18 : Transmission coopérative – nœud 1 transmette les données .....	56
Figure III.19 : Transmission coopérative – le nœud 2 transmette RReq au 3 ....	56
Figure III.20 : Transmission coopérative – le nœud 3 transmette NACK .....	57
Figure III.21 : Transmission coopérative – le nœud 2 transmette RReq au 4 ....	57
Figure III.22 : Transmission coopérative – le nœud 4 transmette les données ...	57
Figure III.23 : Transmission coopérative – le nœud 2 transmette ACK .....	58
Figure III.24 : Diagramme d'activité .....	59
Figure III.25 : Transmission coopérative – nœud 1 transmette les données .....	60
Figure III.26 : La phase de sélection de relais .....	60
Figure III.27 : Sélection de deuxième meilleur relais .....	61

Figure IV.1 : Le délai moyen de bout en bout en fonction de la taille de paquet .	72
Figure IV.2 : Le débit global en fonction de la taille de paquet .....	73
Figure IV.3 : La consommation d'énergie en fonction de la taille de paquet .....	73
Figure IV.4 : L'efficacité d'énergie en fonction de la taille de paquet .....	74
Figure IV.5 : Le débit global en fonction de nombre de nœuds .....	75
Figure IV.6 : La consommation d'énergie en fonction de nombre de nœuds .....	75
Figure IV.7 : L'efficacité d'énergie en fonction de nombre de nœuds .....	75

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

Le progrès technologique, en particulier, l'avènement de la microélectronique et la miniaturisation des circuits imprimés et des puces ont permis la fusion du terminal et de l'interface de communication radio en une seule entité, ce qui a permis le développement des moyens de communications mobiles tels que les téléphones cellulaires, les assistants personnels et les ordinateurs portables.

Le développement important des réseaux sans fil, aussi bien à l'intérieur des entreprises, pour remplacer des réseaux filaires traditionnels, qu'au niveau des lieux publics, ainsi que le grand succès connu par la téléphonie mobile, ont montré l'intérêt des moyens de transmissions sans fil et laisse à penser que l'utilisateur va devenir de plus en plus mobile. Dans ce contexte, des travaux de recherches ont débuté afin d'obtenir des solutions de communication sans fil de plus en plus performantes.

En 1999, l'IEEE a standardisé le protocole d'accès au medium radio 802.11 visant à assurer la communication entre ordinateurs personnels utilisant le medium radio. Aujourd'hui, le protocole IEEE 802.11 a subi plusieurs évolutions et est devenu le standard le plus commercialisé dans la catégorie des WLAN. Cependant, l'utilisation des stations de base pour la communication entre terminaux ne pouvait résister longtemps au désir de s'affranchir de toute contrainte. Les travaux de recherches militaires sur les packet radio networks (PRNet) ont réussi à se passer de ces stations de bases formant ainsi des réseaux mobiles totalement dynamiques et spontanés. Il s'agit des réseaux Ad Hoc.

Un réseau mobile ad hoc est une collection d'entités mobiles, interconnectées par une technologie sans fil formant un réseau temporaire sans l'aide d'aucune infrastructure préexistante ou administration centralisée. Cependant, les utilisateurs d'un réseau ad hoc partagent un seul canal de communication pour transmettre leurs données. Ainsi, le contrôle d'accès au médium (MAC) est primordial pour éviter les interférences entre les signaux transmis, et assurer ainsi un fonctionnement stable et efficace pendant une durée de temps suffisante. Pour accéder au médium, les nœuds dans les réseaux ad hoc utilisent le protocole IEEE 802.11 DCF pour (Distributed Coordination Function) qui est une version améliorée du protocole de base CSMA pour (Carrier Sense Multiple Access) qui appartient à la famille des protocoles à accès aléatoire. Malgré toutes les techniques de prévention qui sont rajoutées au protocole CSMA; la collision persiste encore et influe négativement sur les différentes performances du réseau sans fil.

En plus des problèmes de collision et d'interférence, la perturbation du canal sans fil affecte la réception des données au niveau de la destination ce qui va

engendrer un problème de perte de paquets de données. Et même lorsque la destination arrive à décoder correctement ces paquets dans un tel canal perturbé, le débit global du réseau sera réduit du fait que la transmission des stations à faibles débits va pénaliser les stations à haut débit et par conséquent tout le réseau. Ce problème, connu dans la littérature sous le nom "Rate anomaly problem", est dû au fait que la transmission des stations à faibles débits va occuper le canal plus longtemps que la transmission des stations à haut débit, pour une même taille de paquet.

Afin de contourner ce genre de problème, plusieurs solutions ont été proposées, parmi elles la communication coopérative au niveau physique avec l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et à la réception (MIMO) afin de créer une diversité spatiale et temporelle. Mais la limitation de la taille des périphériques rend l'installation de plusieurs antennes non bénéfique.

La communication coopérative à la couche MAC constitue une solution intermédiaire pour les problèmes des stations à faible débit. Elle propose de remplacer un lien direct à faible débit par deux liens à haut débit à l'aide d'une station relais. Dans le cadre de notre travail, nous nous sommes intéressés au protocole coopératif CLA-MAC pour les réseaux ad hoc. Ainsi, nous avons implémenté ce protocole sous le simulateur NS2 et nous l'avons testé avec plusieurs simulations afin de montrer l'intérêt de la coopération et ces avantages par rapport à la transmission directe avec le standard IEEE 802.11.

Ce manuscrit est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter le concept lié aux réseaux sans fil, leur protocole MAC et les problèmes engendrés par la perturbation du canal sans fil. Nous procédons par la suite à l'introduction de la coopération et de ses techniques avant de recenser les contributions existantes les plus importantes en termes de communication coopérative au niveau de la couche physique, MAC et réseau. Nous donnons également une classification des systèmes coopératifs et leurs avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre est consacré au standard IEEE 802.11, en mettant la lumière sur sa topologie, son architecture, le format général des trames MAC et le protocole d'accès au médium CSMA. Nous présentons aussi les problèmes du standard IEEE 802.11. Nous terminons ce chapitre par un diagramme de fonctionnement du CSMA/CA et une conclusion.

Le protocole CLA-MAC, sa conception, le format de ses trames, ainsi que ses différents mécanismes de commande utilisés sont illustrés dans le troisième chapitre.

Dans le quatrième chapitre, nous allons présenter l'outil de simulation Network Simulator 2 (NS2) ainsi que les détails d'implémentation du protocole CLA-

MAC. Nous présentons également les résultats de simulation et leur analyse et interprétation.

Nous terminerons ce manuscrit par une conclusion générale.



**CHAPITRE I**  
**ETAT DE L'ART**

## I.1 Introduction

L'essor des technologies sans fil offre aujourd'hui de nouvelles perspectives dans le domaine des télécommunications. L'évolution récente des moyens de la communication sans fil (communication entre machines sans besoin de liaisons filaires) a permis la manipulation de l'information à travers des unités de calculs dynamiques qui ont des caractéristiques particulières (une faible capacité de stockage, une source d'énergie autonome...) et accèdent au réseau à travers une interface de communication sans fil, d'où la naissance d'un nouvel environnement de communication appelé environnement mobile sans fil.

Dans ce chapitre nous verrons l'intérêt des réseaux sans fil, ainsi leur protocole MAC, Nous exposons alors les différentes contributions effectuées par les chercheurs concernant les protocoles de communication coopérative au niveau de différentes couches à savoir, physique, MAC et réseau. Nous nous concentrons ensuite sur la couche MAC et les protocoles MAC coopératifs pour les réseaux sans fil et leurs avantages et inconvénients.

## I.2 Les réseaux sans fil

### I.2.1 Définition

Un réseau sans fil est, comme son nom l'indique, un réseau dans lequel au moins deux terminaux (ordinateur portable, PDA, etc.) peuvent communiquer sans liaison filaire. Grâce aux réseaux sans fil, un utilisateur a la possibilité de rester connecté tout en se déplaçant dans un périmètre géographique plus ou moins étendu, c'est la raison pour laquelle on entend parfois parler de "mobilité". Les réseaux sans fil sont basés sur une liaison utilisant des ondes radio-électriques (radio et infrarouges) en lieu et place des câbles habituels. Il existe plusieurs technologies se distinguant d'une part par la fréquence d'émission utilisée ainsi que le débit et la portée des transmissions. Les réseaux sans fil permettent de relier très facilement des équipements distants d'une dizaine de mètres à quelques kilomètres. De plus l'installation de tels réseaux ne demande pas de lourds aménagements des infrastructures existantes comme c'est le cas avec les réseaux filaires (creusement de tranchées pour acheminer les câbles, équipements des bâtiments en câblage, goulottes et connecteurs), ce qui a valu un développement rapide de ce type de technologies.

En contrepartie se pose le problème de la réglementation relative aux transmissions radio-électriques. En effet, les transmissions radio-électriques servent pour un grand nombre d'applications (militaires, scientifiques, amateurs, ...), mais sont sensibles aux interférences, c'est la raison pour laquelle une réglementation est

nécessaire dans chaque pays afin de définir les plages de fréquence et les puissances auxquelles il est possible d'émettre pour chaque catégorie d'utilisation.

De plus les ondes hertziennes sont difficiles à confiner dans une surface géographique restreinte, il est donc facile pour un pirate d'écouter le réseau si les informations circulent en clair (c'est le cas par défaut). Il est donc nécessaire de mettre en place les dispositions nécessaires de telle manière à assurer une confidentialité des données circulant sur les réseaux sans fil.

## **I.2.2 Protocoles MAC dans les réseaux sans fil**

Dans les réseaux sans fil, les supports sont les ondes radio, les ondes lumineuses, magnétiques. Le but de ces supports est de transporter un flot de bits d'information d'une source vers une destination. Le médium de transmission est un dispositif commun pour tous les nœuds du réseau, il nécessite donc un mécanisme qui gère l'accès des nœuds pour déterminer le droit d'émettre de chacun d'entre eux dans le réseau. Le rôle des protocoles MAC est de réguler l'accès au médium entre les nœuds qui désirent parler. Dans les réseaux sans fil, les protocoles MAC peuvent être classés en deux grandes familles :

### **A. Protocoles MAC sans contention**

Dans cette famille de protocoles MAC, les nœuds accèdent au canal sans concurrence. Chaque nœud possède sa propre ressource pour accéder au canal et les autres nœuds ne peuvent pas utiliser cette ressource. La ressource de chaque nœud peut être un intervalle de temps, une bande de fréquence ou un code. Les protocoles MAC sans contention sont divisés en trois catégories principales : Accès multiple par répartition dans le temps TDMA (Time Division Multiple Access), Accès multiple par répartition en fréquence FDMA (Frequency Division Multiple Access) et Accès multiple par répartition en code CDMA (Code Division Multiple Access).

### **B. Protocoles MAC basés sur la contention**

Les protocoles MAC basés sur la contention sont apparus dès le début des communications sans fil. Ils continuent à être améliorés pour s'adapter aux différents types de réseaux. Dans cette partie, nous allons analyser les protocoles MAC pour les réseaux sans fil.

Le protocole d'accès multiple par écoute de porteuse CSMA (Carrier Sense Multiple Access) est proposé comme le protocole de gestion d'accès au canal pour les réseaux sans fil [1]. Dans ce protocole, avant de transmettre des trames de données sur le réseau, un nœud écoute le médium de transmission pour voir ce qui se passe dans le canal. Si le canal est libre, il transmet les trames de données. Sinon, il attend un certain temps et il peut retenter de transmettre à nouveau. Le CSMA et ses versions développées souffrent encore de problèmes de collisions et de congestion. Tel que,

malgré son mécanisme d'écouter le canal avant de commencer la transmission dans un environnement sans fil, le CSMA se trouve en face de nouvelles sources de collision que l'écoute du canal ne peut pas les maîtriser parfaitement.

### I.2.3 Les sources de perturbation pour une communication sans fil

#### Affaiblissement

La puissance d'un signal décroît avec la distance. Pour un média sans guide physique, l'atténuation est fonction de la distance et des conditions atmosphériques. Cet affaiblissement est plus important aux hautes fréquences ce qui entraîne des distorsions plus importantes.

#### Le bruit

Pendant le trajet, le signal est altéré par des signaux perturbateurs, provenant par exemple d'autres antennes. Ce sont ces signaux qui sont appelés bruit. Ce bruit peut être réparti en plusieurs catégories :

- Le bruit thermique ;
- Le bruit d'inter modulation ;
- La diaphonie ;
- Le bruit impulsif.

#### Absorption atmosphérique

La vapeur d'eau et l'oxygène sont deux éléments intervenant fortement dans l'affaiblissement d'un signal, en absorbant une partie de celui-ci.

#### Propagation multi trajet

Rappelons les trois effets de propagation qui entrent en ligne de compte lors d'une transmission :

- La réflexion
- La diffraction
- La dispersion

Dans la plupart des cas, on trouve une multitude d'obstacles entre l'émetteur et le récepteur. Le signal peut donc être réfléchi un grand nombre de fois et plusieurs copies du signal original peuvent exister. Le récepteur capte alors un signal qui est la résultante du signal principal et de tous les signaux réfléchis qui sont captés par son antenne. Le signal peut être renforcé ou atténué (voir même annulé) par ces différentes composantes et les effets de la propagation multi trajet ont donc une importance considérable sur les transmissions sans fils.

En plus des perturbations dont nous venons de discuter, il y a un autre problème qui surgit dans un environnement mobile, c'est le phénomène d'évanouissement (fading). Ce terme désigne la variation dans le temps de la puissance du signal reçu, due à des changements dans le support ou dans le chemin de transmission emprunté.

Ces perturbations diminuent la qualité du canal, qui livrent une transmission de données échouée, il y a un autre problème des stations à faible débit. Cela se traduira par une dégradation des performances car même si nous avons des dispositifs à haut débit, la présence d'une station lente ralentirait l'ensemble du réseau. Pour résoudre l'ensemble de ces problèmes nous avons présenté les communications coopératives dans la section suivante.

### I.3 Les communications coopératives

La recherche dans le domaine de la communication coopérative a été motivée par le gain en termes de capacité de canal réalisé grâce à l'utilisation simultanée de plusieurs antennes pour l'émission/ réception. Ce système de communication est appelé MIMO [2] (Multiple Input Multiple Output), l'émetteur utilise plusieurs antennes pour transmettre ses données (respectivement recevoir). Cela crée un système de diversité spatiale et augmente la robustesse du canal.



*Figure I.1 : transmission directe et coopérative.*

En fait, la communication coopérative simule les systèmes MIMO mais en utilisant des nœuds ayant des antennes uniques. Les nœuds S et D possèdent chacun deux antennes. Ce même système peut être reproduit à l'aide de nœuds ayant une seule antenne mais en introduisant un troisième nœud. Soient les nœuds S, R et D de la figure I.1, S transmet son paquet qui est reçu par R et D. Par la suite, R transmet le paquet vers D. La diversité spatiale et temporelle de ce système est équivalente à celle des nœuds utilisant deux antennes. Les intérêts en sont la réduction des coûts liés à l'utilisation de plusieurs antennes, mais aussi cela permet d'affronter les limites physiques en raison de l'écartement nécessaire des antennes avec le MIMO. Ces facteurs sont particulièrement importants dans le contexte des réseaux sans fil.

Dans la majorité des protocoles de communication sans fil classiques, les communications sont considérées comme si elles étaient point à point. En réalité quand un nœud transmet un paquet sur un canal sans fil, le paquet n'est pas entendu seulement par la destination, mais aussi par les voisins de l'émetteur et de la destination et surtout de leurs voisins communs. Dans un cas classique, quand les voisins entendent une transmission qui ne leur est pas destinée, ils jettent le paquet silencieusement. Dans le cas où le canal direct entre la source et la destination est perturbé, la source est contrainte de transmettre ses paquets sur ce canal médiocre et d'effectuer plusieurs tentatives de retransmissions. Cette communication s'appelle relayage coopératif. Généralement le relayage coopératif se déroule en trois étapes. La transmission directe est l'étape pendant laquelle la source transmet le paquet sur le canal direct. Ensuite vient la sélection du relais, un des voisins est choisi suivant un ou plusieurs critères pour devenir relais et assister la source. En dernier lieu vient la transmission coopérative durant laquelle le relais retransmet le paquet vers la destination sur le canal coopératif.

## **I.4 La coopération à différents niveaux**

Plusieurs efforts de recherche ont été proposés dans la littérature en termes de communication coopérative. Dans les trois sections suivantes nous présentons quelques propositions de protocoles coopératifs organisés suivant la couche pour laquelle ils ont été conçus.

### **I.4.1 La coopération au niveau physique**

Les techniques de communications coopératives au niveau de la couche physique s'organisent en deux grandes familles : les protocoles de relayage régénératif et les protocoles de relayage transparent. Dans le relayage transparent, le signal est relayé tel qu'il est reçu sans aucune modification. Dans cette famille de techniques, nous pouvons citer : Amplify and Forward (AF) [3] ou Linear-Process and Forward. Les protocoles de relayage régénératif modifient le signal reçu avant de le retransmettre. Dans cette famille, nous pouvons citer les protocoles Estimate and forward, Compress and Forward [4] ou Decode and Forward (DF) [5]. D'une manière générale, les techniques régénératives sont plus performantes que les techniques transparentes et nécessitent beaucoup plus de capacité de calcul. Dans tous les cas, la modélisation du signal transmis et reçu par la source, le relais et la destination se modélisent de la même manière.

Dans ce qui suit nous nous intéressons aux deux techniques de relayage les plus utilisées, à savoir Decode and Forward et Amplify and Forward.

- **Amplify and Forward**

Amplify and Forward (AF) [3] est l'une des techniques de coopération les plus simples et les plus populaires. La source transmet le signal en premier lieu, et le relais l'amplifie et le transmet vers la destination en second lieu. La destination reçoit donc deux copies du même signal, celle transmise par la source et celle par le relais.

- **Decode and Forward**

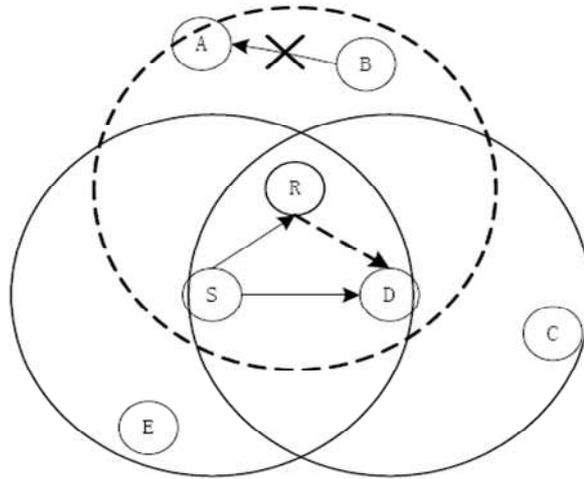
La première partie de la communication pour Decode and Forward (DF) [5] est la même que celle de AF, la source transmet le paquet et la destination et les voisins entendent. Ensuite, les relais qui ont réussi à décoder le signal le reencodent et essaient de le relayer vers la destination. Dans ce cas, contrairement à AF, le bruit n'est pas amplifié et une nouvelle version du signal est transmise.

## **I.4.2 Coopération à la couche MAC**

L'objectif principal d'un protocole MAC coopératif consiste à mapper complètement le gain de la diversité coopérative de la couche physique à des avantages coopératifs dans la couche MAC, par exemple, l'augmentation du débit de transmission, ce qui réduit la puissance de transmission, et / ou d'étendre la portée de transmission. Plus précisément, en tenant compte de l'overhead du protocole, la mobilité des nœuds, et le lien des interférences, un protocole MAC coopératif efficace devrait être capable d'identifier précisément la possibilité de coopération, efficacement sélectionner le meilleur relais, et coordonner la transmission coopérative avec un coût et une complexité raisonnable. Dans cette section, nous allons discuter en détail sur les points fondamentaux dans la coopération MAC.

### **A. Quand Coopérer?**

Intuitivement, il est souhaitable de permettre une coopération bénéfique. Pour atteindre cet objectif, nous devons d'abord comprendre quand la coopération est bénéfique. D'un point de vue de couche physique, la coopération est bénéfique si un ordre de diversité peut être atteint. L'évaluation de la coopération bénéficiaire à la couche MAC, cependant, est beaucoup plus complexe.



*Figure I.2 : L'impact de la coopération sur l'interférence*

Les effets négatifs supportés par la coopération devraient être considérés lors de l'évaluation si vraiment la coopération est bénéfique ou non, que ces effets peuvent réduire ou même supprimer complètement le gain de la coopération. En plus, le caractère aléatoire de la dynamique des canaux et la mobilité des nœuds rend la décision de coopération plus difficile. En outre, le critère de bénéficiaire de la coopération dépend du scénario réseau, ce qui peut être classifié dans les réseaux sans fil soit fully-connected (à petite échelle) soit multi-hop (à grande échelle). Dans un réseau entièrement connecté, 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, qui devrait prendre en compte les interactions entre les différentes paires de transmission.

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.

- **Maximiser le débit de transmission** : un protocole MAC de coopération efficace devrait sélectionner le relais avec le meilleur état de canal pour augmenter le débit de transmission [6].
- **Maximiser le débit global** : le débit est un indicateur de performance important pour un réseau sans fil ad hoc, et pour le maximiser, 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.

- **Maximiser l'efficacité énergétique** : l'efficacité énergétique est une mesure de performance critique qui nécessite beaucoup d'attention, surtout quand les nœuds sont alimentés par des batteries et le remplacement ou la recharge est très difficile. Donc le relais avec le plus d'énergie résiduelle doit être sélectionné.

## B. Qui à Coopérer avec?

Afin de répondre à cette question, nous devons d'abord comprendre l'impact de la stratégie de coopération, puis d'étudier la relation entre le gain de la coopération et le nombre de relais. Impacts de la stratégie de coopération et le nombre de relais sont en général corrélées.

**Impact de la stratégie de coopération**: la communication coopérative se compose de deux phases, notamment la phase de partage d'information et de transmission coopérative. Dans la phase de partage de l'information, l'émetteur diffuse ses informations sur les relais et le récepteur. Ensuite, dans la phase de transmission coopérative, les relais transmettent la même copie de paquets d'information vers le récepteur prévu grâce à des liens indépendants.

**Impact du nombre de relais**: Intuitivement, employant plusieurs relais conduira à un gain de diversité supérieur. Cependant, du point de vue de la couche MAC, plusieurs 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 plusieurs relais de façon ordonnée. A cause de l'overhead du protocole, l'efficacité énergétique des transmissions coopératives peut diminuer avec l'augmentation du nombre de relais. 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. Il est indiqué dans [7] que la zone d'interférence causée par la coopération est agrandie proportionnellement avec le nombre de relais ce qui réduit la fréquence de réutilisation spatiale et à son tour peut dégrader la performance du débit global. Par rapport à un système coopératif multi-relais, un système coopératif à un seul relais ne nécessite ni formation de faisceaux (beamforming) coopérative ni codage spatio-temporel (STC) distribué.

Globalement, la coopération à un seul relais est plus facile à mettre en œuvre et entraîne moins d'overhead du protocole et une plus petite zone d'interférences. Il est prouvé dans [8] que la sélection du meilleur relais peut atteindre le même compromis diversité-multiplexage (DMT), que celui de la coopération multi-relais. Par conséquent, de nombreux ouvrages existants se concentrent sur l'utilisation des méthodes qui sélectionnent le meilleur relais en raison de leur simplicité et de leur efficacité.

**Coopérer avec le meilleur relais:** 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.

### C. Comment coopérer ?

Après avoir déterminé la stratégie de la coopération et le nombre maximum de relais, la sélection du meilleur relais efficace et effectivement de manière distribuée joue un rôle central dans la détermination de la performance globale de la coopération. Un schéma de sélection de relais efficace devrait avoir les caractéristiques suivantes :

- La sélection de relais doit être rapide ;
- La sélection de relais doit garder la probabilité de collision à un niveau faible ou même sans collision;
- Le meilleur relais doit être garanti d'être sélectionné;
- La sélection du relais doit être capable de s'adapter à des conditions de canal variables dans le temps et la mobilité du nœud;
- Le problème de relais caché doit être évité.

Dans ce qui suit, nous discutons de plusieurs mécanismes de sélection de relais. Un mécanisme de sélection de relais fondé sur des tables est proposé dans [9], 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 fondée 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, 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. 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 [6] 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. Cependant, ce système nécessite que l'émetteur envoie les résultats de sélection de relais après chaque time-slot de contention.

La coopération est possible aussi bien dans le cas d'un accès multiple à répartition dans le temps TDMA (Time division multiple access) que dans le cas des accès à compétition en utilisant CSMA (Carrier Sense Multiple Access).

#### **Coopération avec accès TDMA**

Dans le cas des accès TDMA, on affecte à chaque nœud un slot de temps durant lequel il peut envoyer ses données. Les relais aussi disposent de leur propre slot de temps. En effet, suivant la qualité du canal qui le lie avec un relais donné, la destination classe les relais suivant cette qualité et affecte les premiers slots aux meilleurs relais. Après la transmission des données par la source, chaque relais entend le canal. Quand le time slot d'un relais arrive et que personne n'a déjà relayé le paquet, le relais déduit que c'est lui le meilleur et qu'il doit relayer le paquet.

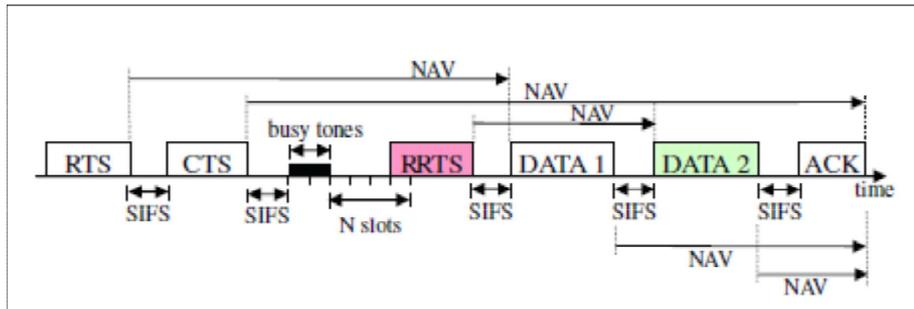
#### **Coopération avec accès CSMA**

Dans le cas d'un accès CSMA, toutes les étapes de la coopération se font par compétition au canal. Les relais estiment les qualités des liens qui les lient à la destination et/ou à la source, ensuite calculent un temporisateur proportionnel à ces qualités et entrent en compétition pour être élu comme relais.

Le relais ayant les meilleurs liens aura le temporisateur le plus court et accède en premier lieu au canal. Suite à cette contention, des collisions peuvent avoir lieu si les temporisateurs sont très rapprochés. Afin de réduire les collisions entre relais, [10] propose un algorithme qui utilise un graphe de contention. Grâce à la connaissance du planning des voisins à deux sauts, ce graphe permet d'organiser les transmissions des nœuds et de réduire les collisions. Finalement, chaque fois qu'un nœud possède des données à envoyer, il informe ces voisins. Ensuite la décision de routage est prise localement suivant la disponibilité des ressources et des graphes de contention.

Une deuxième solution proposée pour diminuer ces collisions est d'utiliser une tonalité d'occupation du canal. La figure I.3 représente cette solution [11]. Après l'échange de RTS/CTS, le relais qui va émettre le paquet de confirmation du choix de

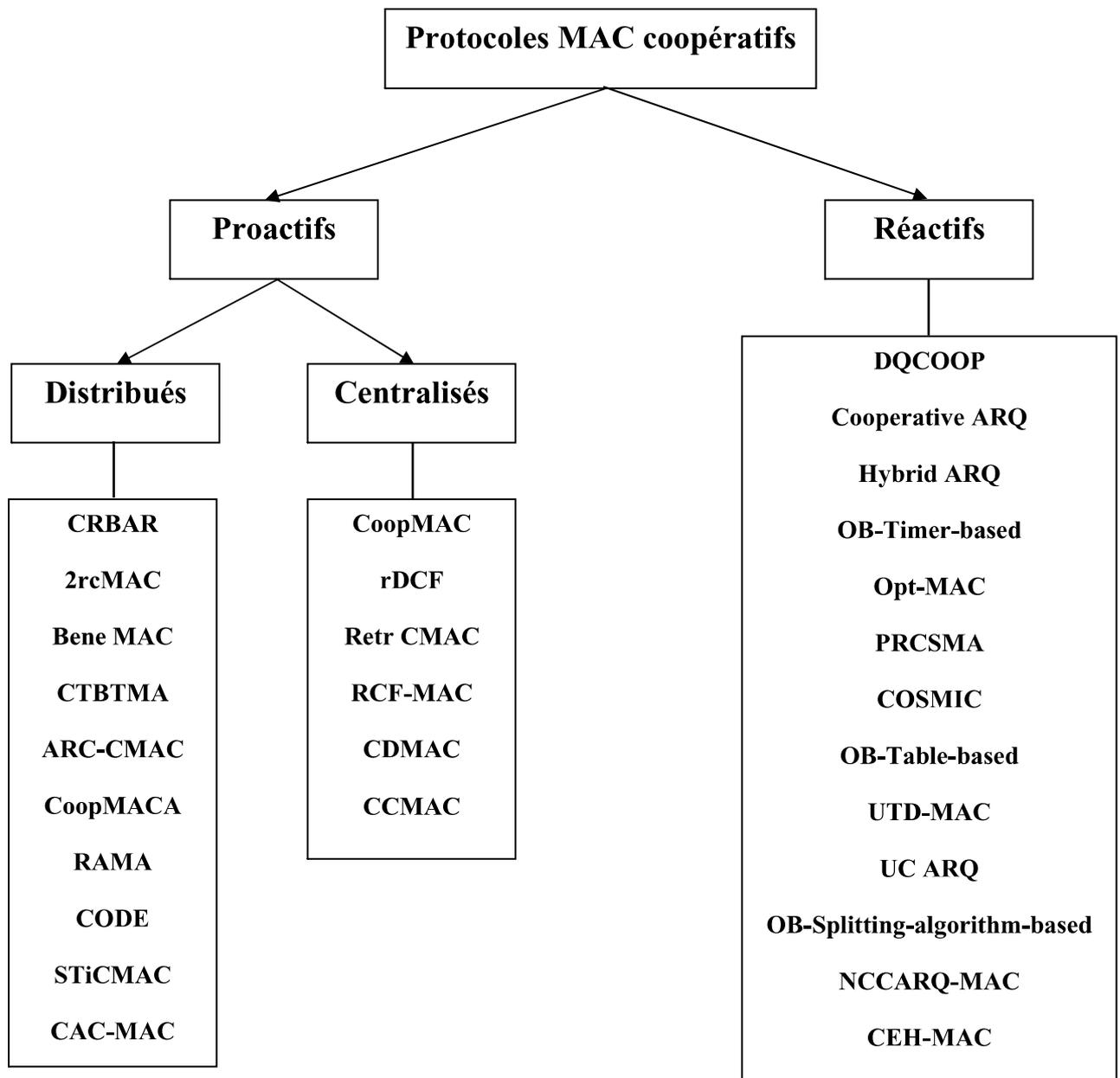
relais envoie une tonalité d'occupation du canal. Quand les autres candidats entendent cette tonalité, ils annulent leurs envois programmés. La source commence par la suite la transmission des paquets de données (DATA1 sur la figure I.3), le relais relaye le paquet (DATA2 sur la figure I.3) et la destination finalise la communication par l'envoi d'un acquittement.



*Figure I.3: Fonctionnement du protocole.*

#### **I.4.2.1 Les protocoles MAC coopératifs proactifs et réactifs**

Les protocoles MAC coopératifs sont divisés en deux types proactifs et réactifs. Les deux types de coopération ont leurs avantages et inconvénients. Dans une coopération proactive, un seul relais écoute le paquet de la source. Si la destination et le relais échouent à recevoir ce paquet, il y aura une retransmission à partir de la source. Dans le cas de la coopération réactive, tous les voisins, appelés aussi relais potentiels, sont concernés par le paquet de la source. Dans ce cas, il y aura plus de chances que les relais potentiels aient des copies de bonne qualité du paquet que dans le cas proactif.



*Figure I.4 : classifications des protocoles MAC coopératifs.*

#### I.4.2.1.1 Protocoles réactifs

Dans les protocoles réactifs le choix du relais se fait après la transmission du paquet des données. Lorsque la destination n'arrive pas à décoder un paquet, elle demande à ses nœuds voisins de lui retransmettre le paquet corrompu. 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. Par la suite, nous citons les protocoles les plus connus dans la littérature.

L'amélioration de débit global et la fiabilité de la liaison peut être obtenue par le protocole Cooperative Automatic Repeat Request (ARQ), lorsque la destination échoue à décoder un paquet, il demande la retransmission du paquet à ses nœuds voisins qui ont écouté la transmission originale, grâce à la nature de diffusion du canal sans fil. Dans le protocole Cooperative ARQ la sélection du meilleur relais se fait à condition de la meilleure qualité de liaison par rapport au récepteur. 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.

Cooperative ARQ est un protocole efficace pour lutter contre le fading profond du canal [12] et la collision des paquets. Le protocole DQCOOP est proposé pour minimiser la probabilité de collision par l'utilisation de la méthode de classification des relais. En revanche, dans le protocole Uncoordinated Cooperative ARQ, proposé dans [13], 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. Dans le protocole Opt-MAC [14], 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.

Le protocole NCCARQ-MAC (Network Coding-based Cooperative ARQ MAC protocol) a été conçu pour coordonner les transmissions parmi un ensemble de relais qui prennent en charge une communication bidirectionnelle entre les paires des nœuds. Dans NCCARQ-MAC, une phase de coopération est initiée une fois par un paquet n'a pas été correctement décodé par le destinataire. Par conséquent, la destination initie la phase de coopération en diffusant un message de demande de coopération après la détection du ralenti de canal pour une période de temps. Pour améliorer le débit global et pour motiver les nœuds voisins à coopérer, le protocole Cooperative ARQ consiste à intégrer une technique de codage réseau. Plus précisément, le relais sélectionné peut transmettre une combinaison linéaire du paquet corrompu et de son propre paquet qui est destiné au même récepteur [15] (Hybride ARQ).

La coopération dans le protocole Cooperative ARQ est activée 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 [16] (PRCSMA).

Le protocole COSMIC [17] propose une solution pour améliorer la consommation d'énergie causée par la transmission des trames de contrôle et les trames de notification de présence de relais. Cette solution consiste à éliminer l'échange des trames de contrôle et les trames de notification de présence de relais.

Dans COSMIC, le meilleur relais sera le voisin ayant le meilleur équilibre entre énergie résiduelle et qualité du canal vers la destination. CEH-MAC (Cooperative EH-Adaptive MAC) est un protocole MAC qui vise à améliorer la performance coopérative de WBAN en tenant compte de l'énergie disponible des nœuds EH-alimentés. L'idée clé du protocole proposé est l'introduction d'un temps de charge qui permet aux nœuds de relais pour récolter suffisamment d'énergie pour l'achèvement de la phase de coopération. En revanche, dans le protocole UTD-MAC [18], 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.

OB (On-demand relaying with selection of the Best relay Protocol) [19] est un protocole coopératif réactif qui utilise le mécanisme de contention fondé sur les temporisateurs (Timer-based) pour sélectionner le meilleur relais. En revanche, dans [20] l'auteur propose d'effectuer la sélection en utilisant un mécanisme reposant sur les splitting-algorithms. Le même protocole a été utilisé dans [21]. 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.

#### **I.4.2.1.2 Protocoles proactifs**

Dans l'approche de coopération proactive, la sélection du relais se fait avant la transmission des données. Le relais choisi est censé recevoir un paquet de la source ayant une bonne qualité du signal et livrer une bonne copie de ce paquet à la destination. Les protocoles proactifs peuvent être classifiés en protocoles distribués et protocoles centralisés. 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.

##### **A. Protocoles proactifs centralisés**

Plusieurs protocoles MAC coopératifs, CoopMAC [22], rDCF [23] et RetrCMAC [24] ont été proposés dans la littérature. Pour améliorer les performances globales du réseau, le protocole rDCF est conçu pour les réseaux multi-saut. 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.

Le protocole Coordinated Cooperative MAC (CCMAC) [25], 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 CDMAC [26] 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 [27] 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.

## **B. Protocoles proactifs distribués**

Le protocole CoopMACA (CoopMACAggregation) [28] est une extension du protocole CoopMAC. 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 [29] 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 [30] 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. Dans le protocole RAMA, La dynamique du canal causée par la mobilité des nœuds conduit à une liaison sans fil non-fiable entre la source et la destination, ce problème induit de fréquentes retransmissions de paquets, pour améliorer les performances globales 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) [31] 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.

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 [32] 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 [33]. 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.

Le protocole CODE de la solution [31] utilise deux relais pour former le réseau d'antennes virtuelles et permet en outre l'utilisation de la technique de codage du réseau de la couche physique pour atteindre le gain souhaité. Pour le trafic bidirectionnel entre la source et la destination, le codage de réseau est appliqué au niveau du nœud relais pour augmenter le débit de système. Pour améliorer le débit du

réseau de bout en bout, le protocole STiCMAC (Space-Time coding for Cooperative MAC protocol) permet de récolter la diversité coopérative à partir de plusieurs nœuds de manière décentralisée. Pour résoudre le problème de sélection de relais et l'algorithme d'adaptation inter-couche, le protocole CAC-MAC (Cross-layer Adaptive Cooperative MAC protocol) est un protocole coopératif pour les réseaux sans fil ad hoc, qui se compose d'un cadre de coopération réaliste d'exploiter à la fois les informations de la couche MAC et la couche physique.

### I.4.3 Coopération à la couche réseaux

Les protocoles coopératifs dans la couche réseau sont appelés protocoles de routage coopératifs puisque principalement ils intègrent la transmission coopérative dans la sélection de route. Dans le but d'assurer la connectivité du réseau, malgré l'absence d'infrastructure fixe et la mobilité des stations, chaque nœud est susceptible d'être mis à contribution pour participer au routage coopératif et pour retransmettre les paquets d'un nœud qui n'est pas en mesure d'atteindre sa destination ; tout nœud joue ainsi le rôle de station et de relais.

Le fait que la taille d'un réseau ad hoc peut être énorme, souligne que la gestion de routage coopératif de l'environnement doit être complètement différente des approches utilisées dans le routage classique. Le problème qui se pose dans le contexte des réseaux ad hoc est l'adaptation de la méthode d'acheminement utilisée avec le grand nombre d'unités existant dans un environnement caractérisé par de modestes capacités de calcul et de sauvegarde. Au niveau de la couche réseau, la communication coopérative a été utilisée pour deux objectifs :

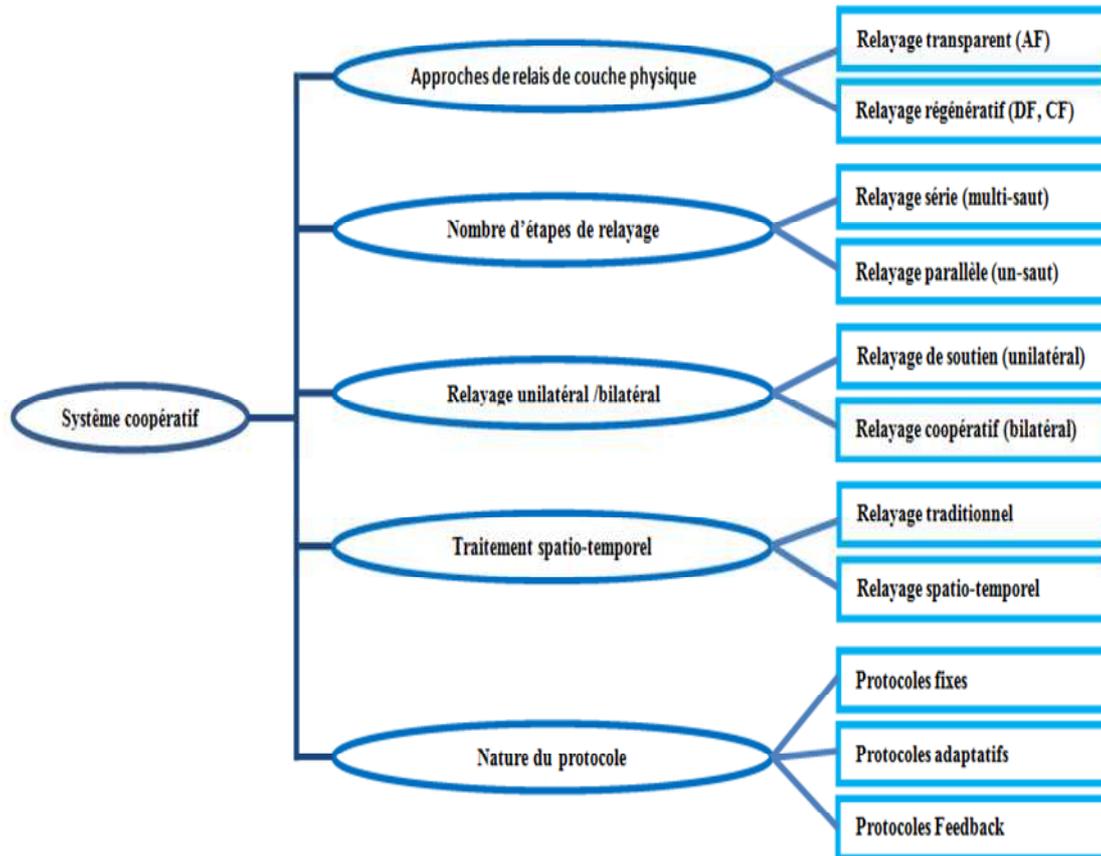
**L'établissement de route plus stable** : les réseaux ad hoc sont souvent peu stables à cause les nœuds peuvent être mobiles, les ressources des nœuds sont souvent limitées, les nœuds peuvent entrer et sortir du réseau à tout moment, soit parce qu'ils s'éteignent, soit parce qu'ils sortent de la portée radio de nœuds du réseau.

**Contrôle de la topologie du réseau** : D'une manière générale, le contrôle de topologie a pour objectif de minimiser la puissance de transmission tout en gardant un réseau connecté. Les nœuds du réseau restent donc connectés tout en évitant d'utiliser leurs puissances maximales ce qui aide à optimiser la consommation d'énergie.

L'objectif de l'inclusion de la communication coopérative est d'obtenir un réseau fortement connecté et qui préserve au mieux l'énergie des nœuds. Les nœuds utilisent les informations concernant la qualité des liens de leurs voisins à deux sauts pour optimiser la consommation d'énergie en faisant de la coopération.

## I.5 Classification des systèmes coopératifs

Si nous voulons classer les systèmes coopératifs, il y a plusieurs facteurs à prendre en compte lors de la prise d'une telle classification, la figure ci-dessous indique ces facteurs :



*Figure I.5 : classification des systèmes coopératifs.*

Premièrement, l'un des choix que vous pouvez faire est dans la couche physique pour les techniques de relayage. Vous avez deux options : relayage transparent et régénératrice. Amplifier and Forward (AF) [3] est un relayage transparent ou non régénératif, ce qui signifie que le relais ne décode pas les données reçues à partir du lien direct. Opposée à celle-ci, Decode and Forward (DF) [5] est une technique de relayage régénératrice dans lequel le nœud code le paquet reçu après qu'il décode les informations et les transmet à la destination. Une autre technique de régénération est Compress and Forward (CF) qui peut être considéré comme un mélange de la méthode de régénération et non-régénérative, tandis que Coded Cooperation est une méthode qui intègre la coopération dans le codage du canal.

Deuxièmement, l'un des choix les plus importants dans un système est celui du nombre d'étapes de relayage. Donc, nous avons deux options : en série ou en parallèle. Les deux méthodes ont leurs avantages, selon le scénario et l'objectif de la

simulation. Par exemple, en augmentant le nombre de nœuds série de relayage réduit l'affaiblissement de propagation de transmission le long de chaque saut, tout en augmentant le nombre de nœuds de relayage parallèles augmente le gain de diversité potentielle.

Un autre choix important est de décider si la coopération doit être unilatérale ou bilatérale. Lorsque le nœud relais est placé entre la source et la destination, vous avez un relais unilatérale ou relais de soutien. Ce type de relais peut être étendu à relayage coopératif ou bilatérale, si au moins deux nœuds de coopération sont en même temps les uns des autres relais améliorant de cette façon la fiabilité de la communication.

Il est également important de déterminer si plusieurs relais sont autorisés à transmettre simultanément avec un traitement spatio-temporel. Dans le relayage traditionnel, plusieurs relais fonctionnent en série ou en parallèle pour fournir des informations à partir d'un nœud source vers sa destination, mais ne peuvent pas transmettre simultanément. Alors que dans le traitement spatio-temporel de relayage, un déploiement distribué de plusieurs nœuds sont employés pour effectuer simultanément un traitement spatio-temporel, formant un système MIMO virtuel.

Dernière mais non le moindre, nous avons une classification en fonction de la nature du protocole. Avec les protocoles fixes, le relais transmet toujours ses données reçues. Les protocoles adaptatifs utilisent une règle de seuil pour décider de façon autonome si transmettre ou non, tandis que les protocoles de Feedback utilisent des relais pour transmettre seulement quand il est explicitement requis.

## I.6 Les avantages et les inconvénients de la communication coopérative

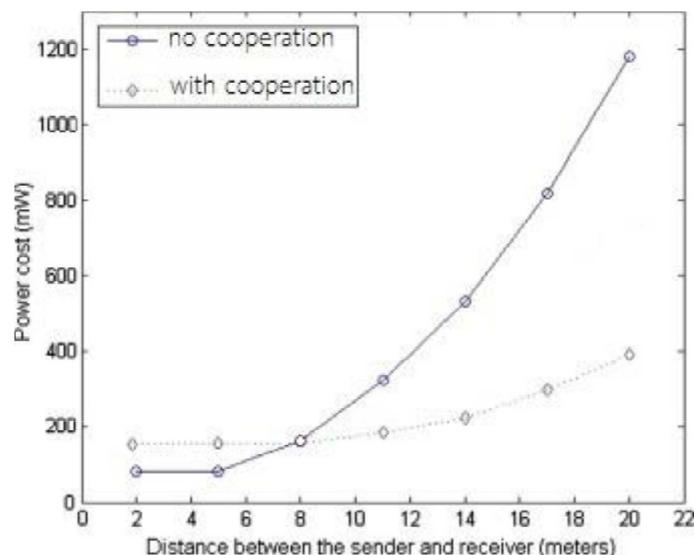
### A. Avantages

Comme toute autre technique, la communication coopérative possède des avantages mais aussi des inconvénients. Parmi ces avantages nous citons :

**Le gain de diversité coopérative** : les avantages de ceci peuvent se traduire par une réduction de la puissance de transmission, un débit plus élevé, une meilleure fiabilité de la transmission ou une couverture de réseau plus vaste. Aussi la probabilité d'avoir une erreur a diminué comme les auteurs dans l'article [34] ont démontré.

**Supérieur efficacité énergétique et durée de vie du réseau prolongé**: il a été prouvé dans des nombreuses occasions que la communication coopérative a réduit la consommation d'énergie conduisant à moindre épuisement de la batterie et enfin à une plus grande efficacité énergétique. La figure I.6 montre que, lorsque la distance

entre l'émetteur et le récepteur est petite, la transmission directe consomme moins que lors de l'utilisation d'un relais. Mais lorsque la distance augmente, la communication coopérative est préférable car elle a une meilleure consommation :



*Figure 1.6 : la consommation d'énergie dans différents protocoles.*

**Réduction des coûts :** par exemple, dans les réseaux cellulaires, il a été démontré que le coût de fourniture d'un certain niveau de qualité de service à tous les utilisateurs dans la cellule est généralement inférieur à l'aide de la communication coopérative.

**Qualité équilibrée de service (QoS) :** tous les utilisateurs à travers le réseau, quelle que soit la position, sont maintenant en mesure d'avoir une qualité de service équilibrée. Dans les modèles traditionnels, les utilisateurs au bord du réseau avaient des problèmes lors de la transmission ou la réception de données en raison de la qualité du canal médiocre.

**Moins d'infrastructure :** dans certaines parties du monde où l'infrastructure est pas présent ou temporairement indisponible, le relayage peut être utilisé pour faciliter la communication.

## B. Inconvénients

En contrepartie, la coopération soulève plusieurs défis. L'implication d'autres nœuds dans la communication nécessite la résolution de plusieurs problèmes dont :

**Le trafic de relais supplémentaire et les interférences :** par exemple, le trafic de relais peut avoir alloué des ressources supplémentaires comme des tranches de temps ou des canaux de fréquence. Pour éviter la détérioration des performances du système, nous devons utiliser les systèmes de répartition de puissance intelligents.

**Schedulers complexes** : dans les systèmes coopératifs, non seulement le trafic provenant de différentes sources doit être prévu, mais aussi le trafic de relais. Par conséquent, le plus complexe de la topologie devient des ordonnanceurs plus complexes.

**Augmentation de la latence de bout en bout** : quand un relais reçoit un signal, il décode et après cela, il retransmet. Dans certains cas, où les services sont sensibles au retard, cette latence causée par le décodage et la transmission peut diminuer de manière significative les performances du réseau.

**Augmentation d'overhead** : selon le protocole utilisé, il peut y avoir plusieurs actions /phases qui peuvent induire l'overhead dans le réseau : la synchronisation, l'ordonnement supplémentaire, le trafic, la sécurité et ainsi de suite.

**Echange de paquets triangulaires** : tandis que les trames de données se déplacent en même temps sur deux voies distinctes :

\* De la source à la destination.

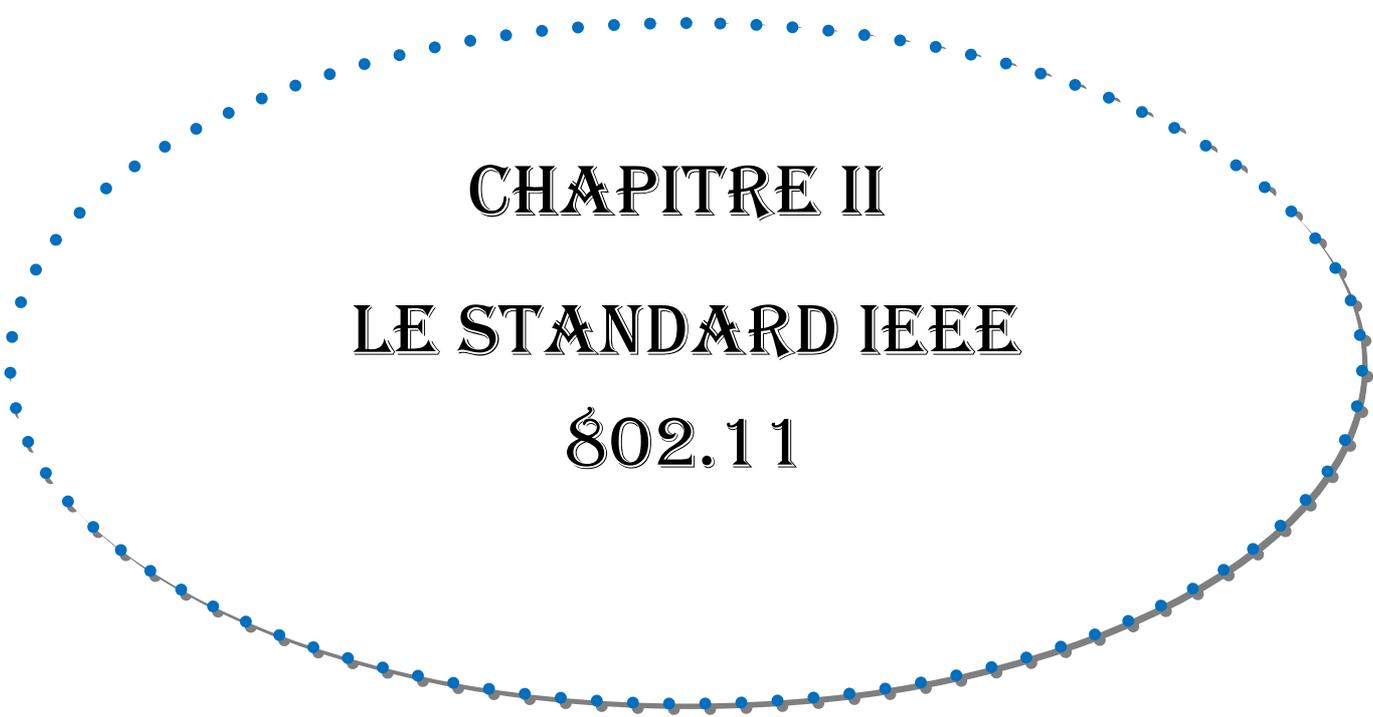
\* À partir de la source vers le relais et enfin vers la destination.

La trame ACK se déplace uniquement sur le chemin direct. Même si elle utilise des systèmes de codage et de modulation robustes, une source ne peut pas recevoir la trame ACK en raison du canal, qui résulte une coopération échouée.

## I.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les réseaux sans fil et leur importance dans la vie quotidienne par les avantages qu'ils apportent aux services de différents domaines. Nous nous sommes alors concentrés sur les problèmes proposés lorsque la qualité du canal est faible. Ensuite, nous avons donné un aperçu concernant les différents travaux concernant la communication coopérative dans les différents niveaux physiques, MAC et réseau et nous avons donné une classification selon plusieurs critères. Finalement, nous nous sommes concentrés sur les protocoles MAC coopératifs et nous avons cité les différents protocoles MAC coopératifs proactif et réactif et leurs avantages et inconvénients.

Le chapitre suivant présente les détails du standard 802.11. Nous nous sommes alors concentrés sur la couche MAC et les protocoles d'accès au médium.



CHAPITRE II  
LE STANDARD IEEE  
802.11

## II.1 Introduction

Les réseaux sans fil WIFI constituent de plus en plus une technologie émergente permettant à ses utilisateurs un accès à l'information et aux services électroniques indépendamment de leurs positions géographiques. Le succès de ce type de réseaux dans ces dernières années est suscité par un grand intérêt de la part des particuliers, des entreprises et du milieu industriel. En effet, ce type de réseaux est perçu comme une nouvelle alternative complémentaire aux réseaux filaires traditionnels, car ils sont autant utilisés dans le cadre des réseaux locaux d'entreprise, pour une utilisation purement professionnelle, que dans le cadre des réseaux locaux personnels à domicile.

L'objectif de ce chapitre est de présenter en détail le standard 802.11. Pour cela, nous commencerons dans une première partie par décrire les topologies suivant lesquels fonctionne le standard 802.11. Ensuite, nous présenterons les différentes versions du standard et les caractéristiques liées à l'architecture logique de la norme (couche physique et couche MAC) et leur Protocoles d'accès au médium.

## II.2 La norme IEEE 802.11

### II.2.1 Généralités

La première version de la norme IEEE 802.11 est définie en 1997. Des transmissions infrarouges étaient envisagées, les versions les plus récentes du standard sur la base desquelles sont construites l'essentiel des cartes d'interface commercialisées, s'adressent principalement à des transmissions radiofréquences. Pour définir cette norme, les concepteurs ont pris en considération les points suivants :

- Robustesse et simplicité de la technologie.
- Utilisation du WLAN mondialement.
- Totale compatibilité avec les anciens produits et les produits actuels qui composent les réseaux LAN.
- Une sécurité acceptable pour le passage de l'information dans l'air (WEP).

### II.2.2 La famille IEEE 802 et les standards 802.11

Les différentes révisions de la norme 802.11 sont citées ici :

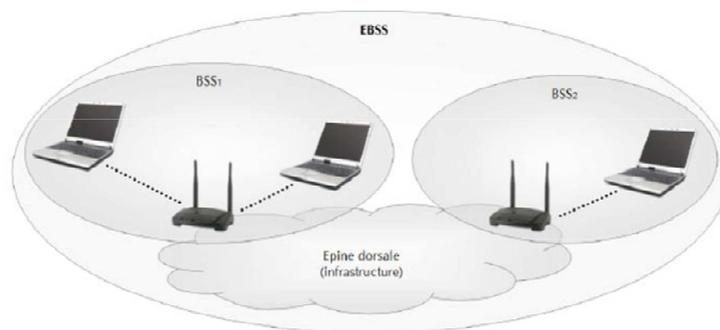
- **802.11 (norme initiale) :** Dans sa version initiale de 1997, 802.11 proposait trois couches physiques : Radio à étalement de spectre par utilisation de séquences directes (DSSS), débit de base 1 Mbps et 2 Mbps, Radio à étalement de spectre par utilisation de sauts de fréquences (FHSS) à 1,6 Mbps, Infrarouge, 1 ou 2 Mbps.

- **802.11 a** : propose 8 canaux dans la bande des 5 GHz. Cette proposition permet d'atteindre un débit bande de base de 54 Mbps sur une portée d'une vingtaine de mètres environ.
- **802.11 b** : propose une amélioration de la norme initiale en introduisant la modulation CCK dans la bande des 2,4 GHz. Deux nouveaux débits sont alors disponibles : 5,5 Mbps et 11 Mbps sur une portée de quelques dizaines de mètres environ. Ratifiée en septembre 1999, 802.11b est l'amendement de 802.11 qui a donné sa popularité au Wifi.
- **802.11 c** : propose une modification de la norme 802.1d existante pour les réseaux filaires afin de la transposer à 802.11. Elle permet une normalisation de l'interconnexion de niveau 2 (pont) entre un réseau filaire et un réseau Wifi.
- **802.11 d** : propose un protocole d'échange d'informations sur les fréquences et les puissances d'émission en vue d'une utilisation dans chaque région du monde, quel que soit le pays d'origine du matériel.
- **802.11 e** : propose des outils de Qualité de Service.
- **802.11 f** : est une recommandation qui propose une extension pour la communication entre points d'accès compatibles 802.11 par le protocole IAPP en introduisant des capacités de changement de cellules et d'équilibrage des charges.
- **802.11 g** : constitue une amélioration directe de 802.11b en proposant un débit bande de base de 54 Mbps sur la bande des 2,4 GHz. Ce gain en débit est réalisé en reprenant le concept de l'étalement de spectre par OFDM utilisé dans 802.11a.
- **802.11 h** : propose des améliorations pour pallier au futur problème de la sur-utilisation des fréquences dédiées à 802.11.
- **802.11 i** : met en place les mécanismes afin de garantir la sécurité. Cette norme définit des techniques de chiffrement telles que l'AES.
- **802.11 n** : son but est d'étendre le standard 802.11 pour atteindre un débit de 540 Mbps tout en assurant une rétrocompatibilité avec les trois précédents amendements (a, b et g). Sa portée est d'une centaine de mètres. Il utilise les deux bandes 2.4 et 5GHz.
- **802.11 x** : sécurisation de divers médias y compris le lien sans fil par le biais de mécanismes d'authentification fort et de serveur RADIUS avec une distribution dynamique des clés.

## II.3 Topologies

### II.3.1 Réseaux WLAN avec Infrastructure

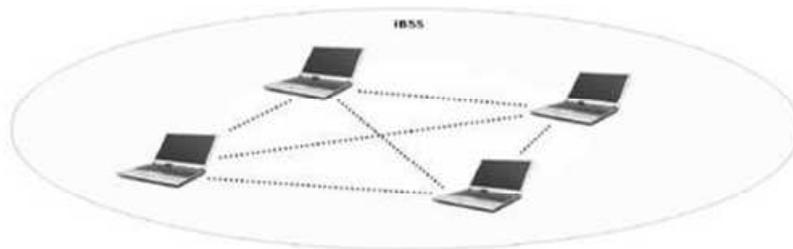
Le réseau à infrastructure comprend des points d'accès ou Access Point qui gèrent l'ensemble des communications dans une même zone géographique sous la forme de cellule. Les stations munies de carte WLAN peuvent se déplacer dans la zone de couverture de l'AP et effectuer un roaming entre les différents AP si la topologie le permet (chevauchement des cellules). Il faut remarquer que chaque AP possède une connexion LAN, ou un autre type de connexion lui assurant la connexion avec le réseau fixe. Le réseau est alors formé de plusieurs BSS qui forment ensemble un unique EBSS.



*Figure II.1: Réseau WLAN avec infrastructure*

### II.3.2 Réseau WLAN Ad Hoc

Un réseau ad Hoc ou encore IBSS (Independent Basic Service Set) est un ensemble de stations possédant une carte WLAN sans la présence d'un AP. Contrairement au réseau à infrastructure, les stations dans un réseau ad Hoc communiquent directement entre elles.



*Figure II.2: Réseau WLAN Ad Hoc*

## II.4 Architecture de la norme IEEE 802.11

La norme IEEE 802.11 définit les deux premières couches (basses) du modèle OSI, à savoir la couche physique et la couche liaison de données.

### II.4.1 La couche physique

La norme IEEE 802.11 définit deux sous-couches physiques :

**PMD (Physical Media Dependant)** : gère l'encodage des données et la modulation.

**PLCP (Physical Layer Convergence Procedure)**: s'occupe de l'écoute du support et est directement reliée à la couche MAC pour lui signifier que le support de transmission est libre.

Le standard 802.11 d'origine a défini trois couches physiques de base, FHSS, DSSS, IR, auxquelles ont été rajoutées trois nouvelles couches physiques Wifi (avec deux variantes au sein de la solution 802.11b) et Wi-Fi5 (802.11a/g).

### II.4.2 La couche liaison de données

La couche Liaison de données de la norme 802.11 est composée de deux sous-couches : la couche de contrôle de la liaison logique (LLC) et la couche de contrôle d'accès au support (MAC). Le contrôle d'accès au support est une fonctionnalité qui nous intéresse ici particulièrement.

## II.5 Protocoles d'accès au médium sans fil pour la norme 802.11

802.11 définit 3 méthodes d'accès différentes au médium

- **Distributed Coordination Function (DCF)** : La méthode d'accès DCF implémente la méthode standard CSMA/CA. Elle consiste à vérifier si le médium est déjà utilisé avant d'émettre soit même. Pour éviter les collisions, les émetteurs utilisent des procédures de temporisation aléatoire avant chaque trame, le nœud qui a alors le temps de temporisation le plus faible dispose du médium.
- **Point Coordination Function (PCF)** : La méthode PCF offre des méthodes d'accès au médium sans-contention. Il permet à des points d'accès appelés points coordinateurs (PC) un accès privilégié. Pour permettre cet accès prioritaire, les stations PC utilisent des délais réduits par rapport à ceux de la méthode DCF.

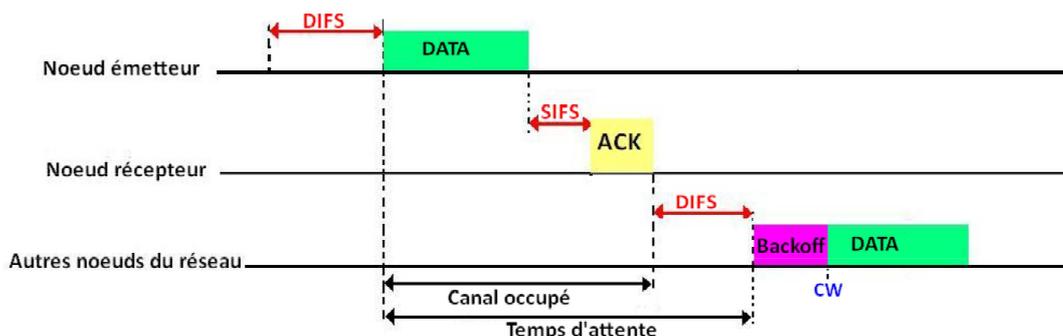
### II.5.1 CSMA/CA (CSMA with Collision Avoidance)

Selon la norme 802.11, on différencie quatre types d'espace entre deux trames IFS ; il y a le SIFS (Short IFS), le PIFS (PCF IFS), le DIFS (DCF IFS) et l'EIFS (Extended IFS), cités en ordre décroissant selon la durée de chacun.

- **SIFS** : est l'espacement le plus court entre les quatre types d'IFS. Il sépare un paquet de données de son acquittement. La valeur de SIFS est fixée par la couche PHY et est calculée de telle façon que le nœud émetteur sera capable de commuter en mode réception pour pouvoir décoder le paquet entrant.

- **PIFS** : est utilisé en mode PCF.  $\text{PIFS} = \text{SIFS} + \text{TS}$ .
- **DIFS** : est le plus couramment utilisé avec le SIFS. Il est utilisé en mode DCF comme temps minimal d'attente avant une transmission.  $\text{DIFS} = \text{SIFS} + 2 \cdot \text{TS}$ .
- **EIFS** : est le plus long des IFS. Il est utilisé lorsqu'il y a détection de collision. C'est un inhibiteur des collisions successives. Les IFS permettent de définir les degrés de priorité des trames.

Lorsqu'un nœud veut émettre ses paquets de données, il écoute le canal pendant un DIFS, si le canal est toujours libre, le nœud commence à envoyer ses données. Cependant, il peut arriver que deux nœuds détectent en même temps que le canal est libre après le DIFS et ils commencent leurs émissions en même temps, ce qui conduit à la collision. Alors, pour réduire la probabilité de telle collision, après le DIFS, le nœud attend pendant un temps aléatoire appelé BT (backoff Time) qui est composé d'un nombre de TS inclus entre 0 et CW (Contention Window). Après le DIFS, le nœud décrémente son backoff par un pas de TS jusqu'à atteindre la valeur zéro. Si pendant le BT, le nœud détecte le canal occupé, alors il revient au début et attend que le canal devienne libre durant le DIFS. Avec cela, si le canal reste toujours libre quand le backoff atteint la valeur zéro, le nœud commence son émission immédiatement. Le nœud en réception attend le CRC (champ d'en-tête du contrôle d'erreur) du paquet reçu et renvoie un accusé de réception ACK. La réception de l'ACK indiquera à l'émetteur qu'aucune collision n'a eu lieu. Si l'émetteur ne reçoit pas l'ACK, alors il retransmet le fragment jusqu'à ce qu'il l'obtienne ou abandonne au bout d'un certain nombre de retransmissions.



*Figure II.3: Les IFS et le backoff dans le mode CSMA/CA.*

Malgré l'intégration de différentes techniques; backoff, IFS et l'ACK le protocole CSMA/CA souffre toujours des collisions. Pour résoudre ce problème le CSMA/CA utilise le mécanisme RTS/CTS.

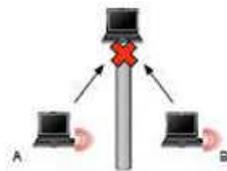
Le mécanisme RTS/ CTS est appelé aussi "écoute virtuelle de porteuse". Un nœud voulant émettre envoie tout d'abord un petit paquet de contrôle RTS pour demander à son récepteur une autorisation pour commencer la transmission des

données. Le RTS est reçu par le nœud destinataire ainsi que par les autres nœuds du réseau. Le nœud destinataire répond à son tour par un paquet de contrôle CTS pour annoncer à l'émetteur que le canal est libre et qu'il peut commencer immédiatement la transmission des données. A cet instant, les autres nœuds du réseau qui ont reçu au moins l'un des deux paquets de contrôle (RTS/CTS), déclenche chacun d'eux son indicateur de l'écoute virtuelle de porteuse NAV (Network Allocation Vector) pour une certaine durée en décalant leurs transmissions jusqu'à l'expiration du temporisateur de NAV. Le NAV indique à chacun des nœuds qui ne sont pas concernés par la transmission, la durée de temps nécessaire pendant la quelle le canal sera occupé.

## II.6 Les problèmes de standard IEEE 802.11

### A. Le problème des nœuds cachés

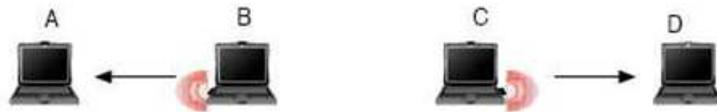
Le problème des nœuds cachés a été introduit dans ce chapitre en même temps que le mécanisme RTS/CTS utilisé pour le corriger. Il faut cependant bien noter que dans le cadre prévu par 802.11, ce problème n'apparaît que dans une configuration comme celle de la figure II.4, où deux mobiles isolés l'un de l'autre, utilisant une même fréquence et attachés à une même station de base veulent émettre vers cette dernière en même temps. Dans ce contexte, le mécanisme de RTS/CTS est effectivement efficace. Pour peu que la charge du réseau soit importante, [35] ont montré par le calcul et des simulations que le surcoût en terme de débit des RTS/CTS est plus que compensé par le gain qu'il procure en évitant des collisions à répétition.



*Figure II.4: Nœuds cachés simples*

### B. Le problème des nœuds exposés

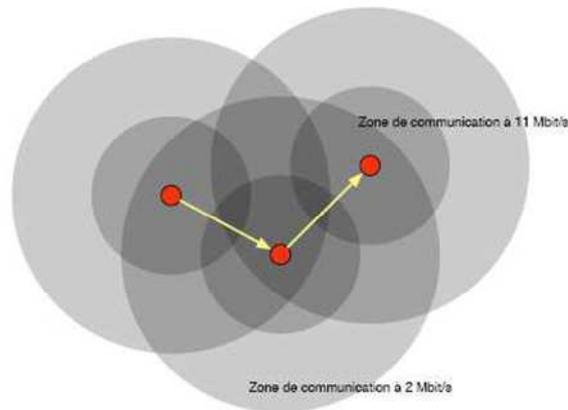
Le problème des nœuds exposés apparaît dans des configurations comme celle présentée sur la figure II.5. Ici, les nœuds B et C voudraient émettre respectivement vers A et D. En suivant le mécanisme de la DCF, celui qui a tiré le plus petit backoff va accéder au canal et envoyer son paquet, alors que l'autre détectera la porteuse du premier, et entrera en période de defering. Pourtant, si B et C émettaient en même temps, le signal de B au niveau de A serait largement supérieur à celui de C et suffisant pour une réception correcte. La situation serait l'inverse au niveau du nœud D, qui recevrait correctement le paquet de C, malgré le léger bruit venant de B. Dans cette situation, la DCF limite donc inutilement la bande passante totale du réseau. On peut noter que certains travaux s'intéressent au problème, notamment [36] qui propose l'utilisation d'un mécanisme de parallel RTS pour le résoudre en partie.



*Figure II.5: Le phénomène des nœuds exposés*

### C. Le problème de la zone grise

Nous avons vu que 802.11b utilise des vitesses de transmissions de 1 ou 2 Mbps pour les paquets qu'il diffuse, mais que les paquets envoyés en unicast peuvent l'être jusqu'à 11 Mbps. La plupart des protocoles de routage utilisent la diffusion pour construire ou maintenir les routes (les paquets Hello ou Route Request sont typiquement diffusés par exemple). Ces paquets sont donc émis à 2 Mbps et permettent de construire un certain nombre de routes dans le réseau. Mais lorsque les données sont ensuite envoyées à 11 Mbps sur ces routes, comme la portée de communication décroît avec l'augmentation de la vitesse, il est possible que des mobiles pourtant à portée des paquets de routage lents soient trop loin pour les paquets de données rapides. Il en découle que les routes construites avec les paquets diffusés ne sont pas forcément exploitables à des débits plus élevés. La zone concernée (la soustraction de la zone "rapide" à la zone "lente" plus large) est appelée "zone grise".



*Figure II.6: Le phénomène de la zone grise*

## II.7 Format générale des trames MAC

Les trames 802.11 sont généralement formées de quatre parties essentielles ; le Préambule, En-tête, Data et le CRC (Cyclique Redundancy Check). Chacune de ces parties est caractérisée par un nombre de bits limité et une fonction bien déterminée pendant la transmission des trames dans un réseau ad hoc. La norme a défini 3 types de trames MAC :

- Les trames de données : pour véhiculer les données à transmettre.

- Les trames de contrôle : utiles dans la procédure d'accès au canal (RTS, CTS, ACK).
- Les trames de gestion : transmises de la même façon que les trames de données pour l'échange d'informations de gestion, mais qui ne sont pas transmises aux couches supérieures.

Chacun de ces trois types est subdivisé en différents sous-types, selon leurs fonctions spécifiques. La figure suivante montre le format général de la trame MAC, certains champs sont seulement présents dans une partie des trames.

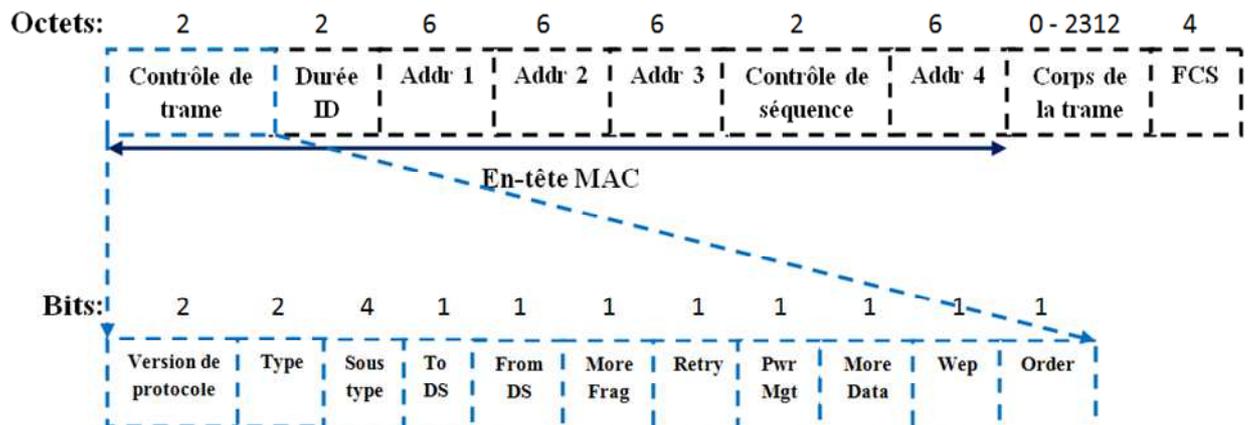


Figure II.7: Trame 802.11

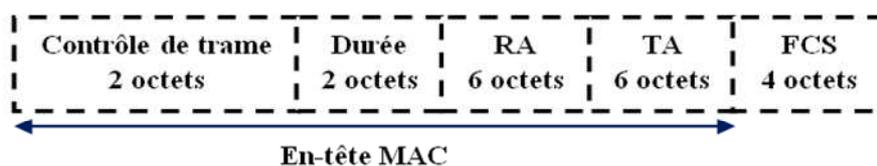
➤ **Champ *Frame Control-FC* (Contrôle de trame)** : ce champ de deux octets est constitué des informations suivantes :

- **Protocol version (Version de protocole)** : ce champ de 2 bits permettra de prendre en compte les évolutions de version du standard 802.11.
- **Type, Subtype (Type et Sous-type)** : ces champs, respectivement de 2 et 4 bits, définissent le type et le sous-type des trames.
- **To DS** : ce bit vaut 1 lorsque la trame est destinée au système de distribution (*DS*) ou lorsqu'une trame est envoyée par une station à destination d'un point d'accès, il vaut zéro dans les autres cas.
- **From DS** : ce bit vaut 1 lorsque la trame provient du système de distribution (*DS*), il vaut zéro dans les autres cas.
- **More Fragments** (fragments supplémentaires) : ce bit permet d'indiquer (lorsqu'il vaut 1) qu'il reste des fragments d'une trame de donnée ou de gestion à transmettre, il vaut zéro dans les autres cas.
- **Retry** : ce bit spécifie (lorsqu'il vaut 0) que la trame est transférée pour la première fois, sinon c'est une retransmission.
- **Power Management** (gestion d'énergie) : ce bit sert à une station pour annoncer son état de gestion d'énergie : 0 indique que la station est en mode actif et 1 indique que station entrera en mode de gestion d'énergie.

- **More Data** (Données supplémentaires) : ce bit, utilisé pour le mode de gestion d'énergie, est utilisé par le point d'accès pour spécifier à une station qu'il y'a au moins une trame stockée en tampon en attente.
  - **WEP** : ce bit indique que l'algorithme de chiffrement WEP a été utilisé pour chiffrer le corps de la trame.
  - **Order** (ordre) : ce bit indique que cette trame est envoyée en utilisant la classe de service strictement ordonné (Strictly-Ordered service class).
- **Durée / ID** (16 bits) : ce champ contient alternativement la valeur de durée utilisée pour le calcul du NAV ou une courte identification (*Association Identity - AID*) d'une station mobile utilisée pour obtenir ses trames protégées en AP.
  - **Adresse 1**: est toujours l'adresse du récepteur.
  - **Adresse 2**: est toujours l'adresse de l'émetteur.
  - **Adresse 3**: est l'adresse de l'émetteur original quand le champ FromDS est à 1. Sinon, et si ToDS est à 1, Adresse 3 est l'adresse destination.
  - **Contrôle de séquence** : Le champ de contrôle de séquence est utilisé pour représenter l'ordre des différents fragments appartenant à la même trame, et pour reconnaître les paquets dupliqués.
  - **Adresse 4** : est utilisé dans un cas spécial, quand le système de distribution sans fil (Wireless Distribution System) est utilisé et qu'une trame est transmise d'un Point d'Accès à un autre.
  - **Frame Body** : contient les données.
  - **FCS** : détecte et contrôle les erreurs au moyen d'un CRC de 32 bits. CRC est une somme de contrôle servant à vérifier l'intégrité de la trame.

### II.7.1 Format des trames les plus courantes

🚧 **Format des trames RTS (*Request to Send*):** (20 octets)

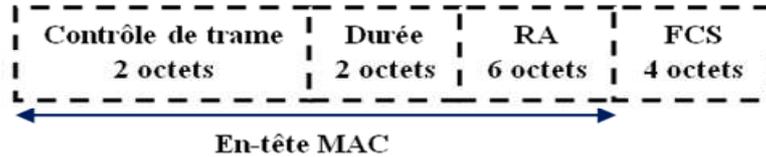


*Figure II.8: Trame RTS*

**RA** est l'adresse du récepteur de la prochaine trame de données ou de gestion. **TA** est l'adresse de la station qui transmet la trame RTS. La valeur de la durée est le temps,

en microsecondes, nécessaire à la transmission de la trame de gestion ou de données suivante, plus une trame CTS, plus une trame ACK, plus 2 intervalles SIFS.

 **Format de la trame CTS (*Clear to Send*):** (14 octets)



*Figure II.9: Trame CTS*

**RA** est l'adresse du récepteur de la trame CTS, directement copiée du champ **TA** de la trame RTS. La valeur de la durée est la valeur obtenue dans la trame RTS, moins le temps de transmission (en microsecondes) de la trame CTS et d'un intervalle SIFS.

 **Format de la trame ACK (*Acknowledge*):** (14 octets)



*Figure II.10: Trame ACK*

**RA** est le champ directement copié du champ Adresse 2 de la trame précédente de cette trame ACK. Si le bit More Fragment était à 0 dans le champ de contrôle de trame de la trame précédente, la valeur de la durée est mise à 0. Sinon, c'est la valeur du champ durée précédent, moins le temps (en microsecondes) demandé pour transmettre la trame ACK et l'intervalle SIFS.

## II.8 Diagramme de fonctionnement

La figure II.11 résume le fonctionnement de la procédure CSMA/CA et de l'algorithme de Backoff.

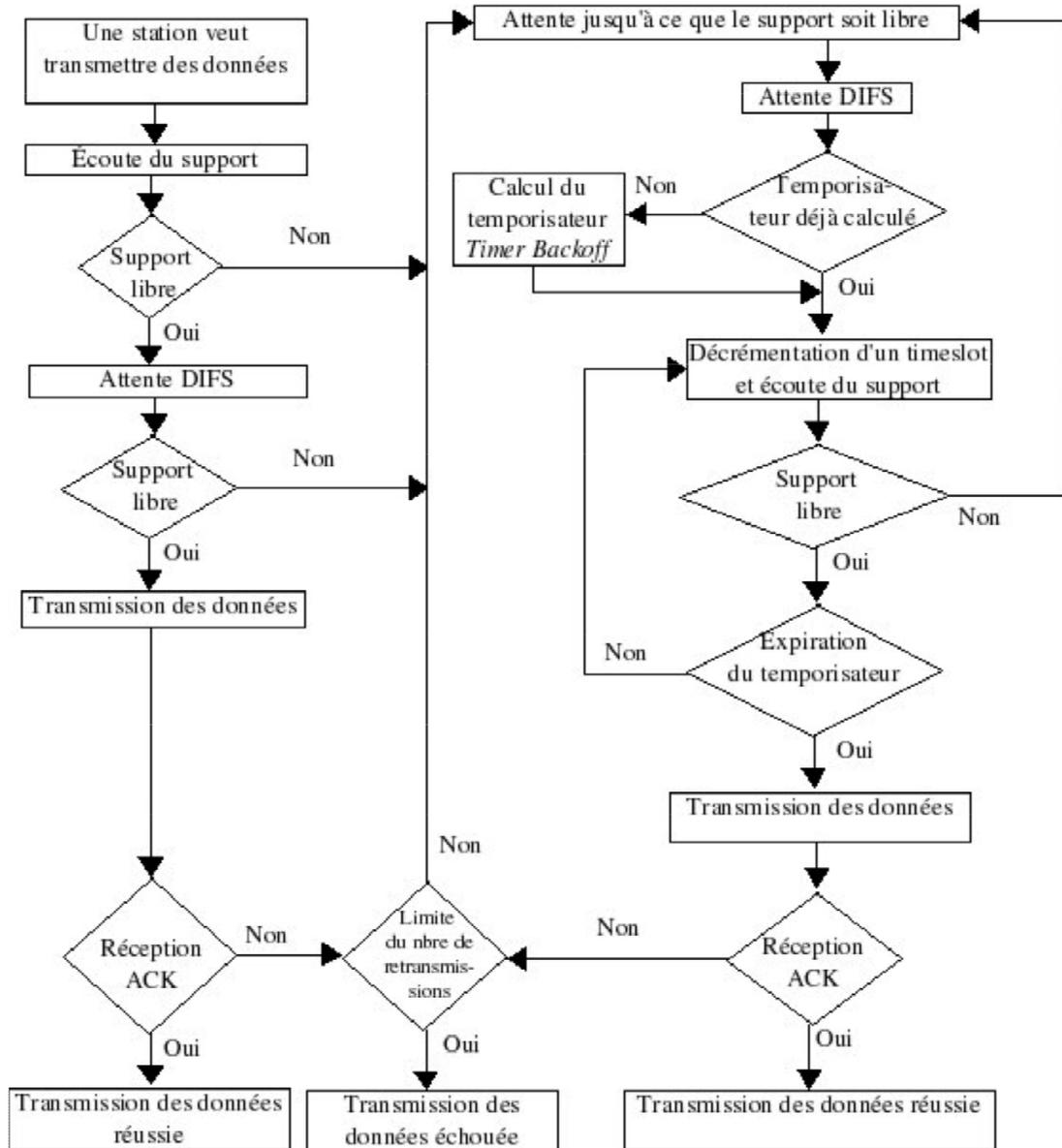


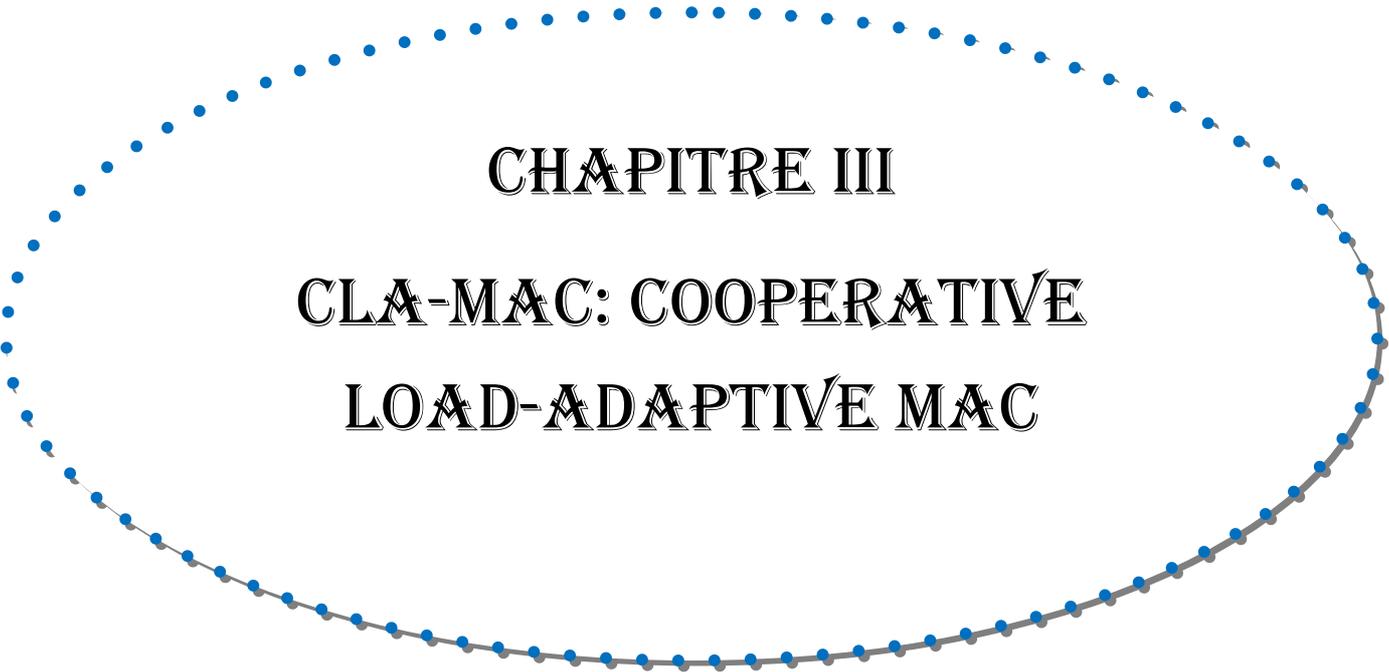
Figure II.11: Procédure CSMA/CA

## II.9 Conclusion

Les réseaux locaux basés sur la technologie IEEE 802.11 ont pris une ampleur telle qu'ils sont déployés un peu partout dans notre entourage quotidien. Ce déploiement est favorisé par la maturité atteinte par le standard grâce aux travaux de recherche qui ont rendu le standard plus compétitif (QoS, sécurité, haut débit).

Dans le présent chapitre, nous avons passé en revue les composants de base du standard IEEE 802.11. Ensuite, nous avons montré qu'un certain nombre de problèmes ont été mis en évidence avec l'utilisation de 802.11 dans les réseaux ad hoc. Nous nous sommes alors concentrés sur les méthodes d'accès au médium.

Le chapitre prochain présente le protocole de la communication coopérative CLA-MAC.



CHAPITRE III

CLA-MAC: COOPERATIVE  
LOAD-ADAPTIVE MAC

### III.1 Introduction

La communication coopérative est le concept d'engager plusieurs stations /nœuds dans un réseau sans fil pour partager leurs ressources et de réaliser un gain de diversité spatiale. Ce gain est obtenu grâce à des transmissions distribués mais coopératives, améliorant ainsi la performance globale du système dans des conditions de canal sans fil dynamiques. De nombreux algorithmes de coopération ont été introduites dans la littérature pour la couche physique, la couche MAC, ou à travers des couches multiples.

Dans les chapitres précédents, nous avons discuté le sujet des communications coopérative et les protocoles de coopération en général (définitions, la classification, les avantages / inconvénients ...etc.). Dans ce chapitre, nous allons parler du protocole MAC de coopération "CLA-MAC". et présenter ses mécanismes de fonctionnement, les avantages et autres spécifications qui rendent ce protocole efficace.

Le protocole LA-MAC (Load Adaptive MAC) est le fondement du protocole CLA-MAC [37]. Il est le point de départ à partir duquel la forme coopérative de LA-MAC soulevée. Entre les deux, il y a beaucoup des similitudes, mais aussi quelques différences. Les deux protocoles n'utilisent pas le mécanisme RTS / CTS utilisé par la norme IEEE 802.11 pour réduire les collisions dans une communication.

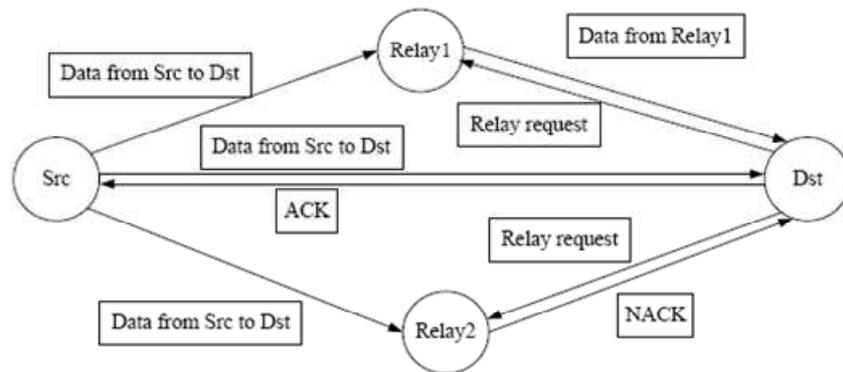
Plus de détails sur le protocole CLA-MAC et la manière de fonctionnement se trouvent dans les sections dans laquelle nous expliquons la phase d'initialisation.

### III.2 Processus de communication

Pour mieux comprendre la façon dont ce protocole fonctionne et comment les trames sont échangées entre les nœuds, nous allons présenter un scénario simple avec quatre nœuds qui sont tous dans la portée de l'autre. Nous aurons une source, une destination et deux nœuds qui vont servir de relais dans notre communication.

La source va envoyer des paquets vers une destination. Lors de la transmission, tous les nœuds qui se trouvent dans la portée de la source va écouter et stocker les paquets qui ont été envoyés par celui-ci même si les paquets sont destinés à un autre nœud. Lorsque la transmission se termine, la destination va vérifier ses paquets pour voir s'ils sont bien reçus. Sinon, elle va chercher dans ses tables le nœud qui a la meilleure qualité du canal et envoyer une trame qui lui demande d'être le relais. Si un nœud reçoit une trame de demande de relais et il n'a pas reçu les données de la source, il va envoyer une trame NACK indiquant la destination qu'il n'a pas la forme correcte des données. Ensuite, la destination va envoyer au deuxième meilleur nœud dans sa liste une demande d'être un relais. Si celui-ci a bien reçu les données, il transmettra à la destination les informations demandées. Après avoir reçu les paquets en provenance du relais, la destination va envoyer une trame ACK indiquant la source qu'elle a reçu les paquets et la communication peut se terminer.

Dans la figure III.1, nous pouvons être observés les quatre nœuds. Alors que la source (Src) envoie des données, les deux relais (Relay1 et Relay2) et la destination (Dst) sont à l'écoute et à la réception des paquets. Relais2 est le meilleur nœud dans la table de la destination et le relais 1 est le deuxième meilleur nœud, en fonction de la qualité de la liaison entre ces derniers et la destination. Ceci est la raison pour laquelle la destination va d'abord envoyer une demande de relais à Relay2 et après avoir reçu la trame NACK de lui, elle va envoyer une demande de relais à Relay1 dont il recevra les données actuelles.



*Figure III.1: scénario simple de protocole CLA-MAC.*

Ce scénario montre la façon d'échanger les données entre les nœuds. La phase d'initialisation a été omise (nous avons supposé que tous les nœuds ont créés leur tables de voisin à 1-saut et 2-sauts). Si la destination a été décodé correctement les données donc la communication va terminer ensuite les relais vont abandonner les paquets stockés parce qu'aucune demande de relais n'aurait été envoyée dans une période de temps prédéfini.

### III.3 Format des trames dans le protocole CLA-MAC

Comme chaque protocole, CLA-MAC construit des trames qui sont échangés entre les nœuds pour obtenir certaines fonctionnalités. Comme indiqué précédemment, il n'utilise pas les trames RTS et CTS comme dans la norme 802.11. Au lieu d'utiliser des trames classiques, CLA-MAC apporte de nouveaux types pour atteindre ses objectifs souhaités. Le protocole utilise cinq trames de contrôle et deux trames de données. Dans le tableau III.1, nous allons donner le nom et le type de chaque trame:

Type	Nom
Contrôle	Trame d'acquittement (ACK)
Contrôle	Trame d'acquittement négative (NACK)
Contrôle	Trame de demande de relais (RReq)
Contrôle	Trame de demande (REQ)
Contrôle	Trame de répondre (REP)
Donnée	Trame de donnée de la source à la destination
Donnée	Trame de donnée de relais à la destination

**Tableau III.1: les trames de protocole CLA-MAC**

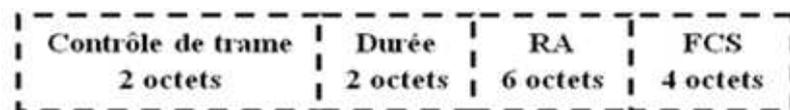
Ensuite, nous allons prendre chaque trame et donner une brève description et présenter le format de celui-ci, en expliquant le rôle de ses champs:

### III.3.1 Trame d'acquittement ACK

Elle est une trame de contrôle et la seule qui est conservé à la norme d'origine. Elle est utilisée par une destination pour signaler la source qu'elle a reçu les paquets et les décoder avec succès. Elle est transmise en utilisant des schémas de codage et de modulation robuste pour que la trame puisse atteindre la destination d'une manière fiable.

Comme indiqué dans le chapitre II, la trame ACK est formée sur quatre domaines principaux: le premier est le champ de contrôle de trame, présenté dans la section «Format générale des trames MAC». Le suivant est le champ de durée qui peut être égal à zéro si le champ More fragments dans la trame de données précédente est mis à zéro. Dans le cas contraire, il contient une valeur en microsecondes égale à la valeur de durée dans la trame de données précédente moins le temps d'accusé de réception et un intervalle SIFS. Un autre domaine présent dans cette trame est RA qui est le champ directement copié du champ Adresse 2 de la trame précédente. Enfin, le champ FCS est une somme de contrôle servant à vérifier l'intégrité de la trame.

La longueur de cette trame est de 14 octets et elle est composé comme suit: le champ de contrôle de trame a 2 octets, la durée 2 octets, RA 6 octets et enfin la séquence de contrôle de trame a les 4 octets restants. La figure III.2 montre les quatre champs présentés dans cette section:



**Figure III.2: Les quatre champs de la trame ACK**

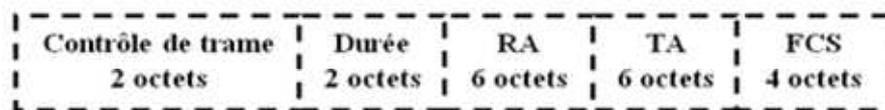
### III.3.2 Trame d'acquittement négative NACK

Elle est une trame de contrôle et introduite par CLA-MAC pour aider un relais à informer la destination qu'il n'a pas décodé correctement les informations envoyées

par la source et il n'est pas un relais fiable pour la communication en cours. Seul le relais qui reçoit une trame RReq à partir de la destination peut envoyer un NACK.

La trame NACK est formée par cinq champs principaux: le premier est le contrôle de trame, présenté dans le chapitre II. Le deuxième est le champ de durée qui met à zéro car il n'a pas besoin d'attendre avant la transmission. Le troisième est RA dans laquelle on met le contenu du champ TA de la trame de RReq. Le quatrième est TA dans laquelle on insère l'adresse du nœud qui transmet la trame. Enfin, le champ FCS est utilisé à la destination pour la vérification de l'intégrité.

La longueur de cette trame est de 20 octets et composé comme suit: le champ de contrôle de trame a 2 octets, la durée 2 octets, RA 6 octets, TA 6 octets et, enfin, la séquence de contrôle de trame a les 4 octets restants. La figure III.3 montre les cinq champs présentés dans cette section:



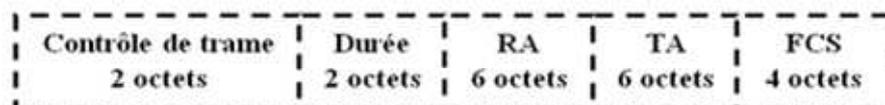
*Figure III.3 : Les cinq champs de la trame NACK*

### III.3.3 Trame de demande de relais RReq

Comme indiqué dans le tableau III.1, RReq est une trame de contrôle qui a été introduite par CLA-MAC pour les situations où la destination n'est pas capable de décoder les paquets qui ont été envoyés par la source. Le rôle de cette trame est de demander le meilleur relais dans sa table pour envoyer les données. La destination envoie une trame RReq demandant le relais s'il a les données décodées correctes. Une trame RReq peut être envoyée à plusieurs relais si la destination reçoit la trame NACK de relais précédent.

La trame RReq, comme la trame NACK, est également formé sur cinq domaines principaux: le contrôle de trame, la durée, RA, TA et FCS.

RA est l'adresse du nœud avec la meilleure qualité du lien. Si deux nœuds ont la même qualité, l'un avec le timestamp le plus récent est choisi. Si le premier choix pour un relais répond avec un NACK, la deuxième meilleure adresse de nœud est choisie et ainsi de suite. TA l'adresse du nœud qui transmet la trame.



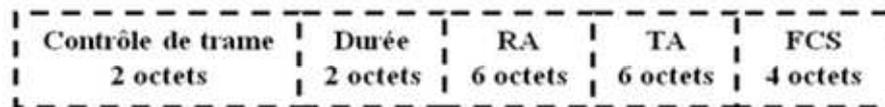
*Figure III.4: la trame RReq*

### III.3.4 Trame de demande REQ

Une autre trame de contrôle présentée dans le protocole CLA-MAC est la trame de demande ou simplement REQ. Elle est utilisée dans la phase d'initialisation, où chaque nœud envoie une telle trame pour permettre à d'autres nœuds dans sa portée de connaître sa présence. Chaque nœud envoie la trame REQ pour que les périphériques voisins puissent mettre à jour leurs tables. Cette trame est envoyée périodiquement parce que la mobilité est présente et les nœuds se déplacent dans et hors de la portée de l'autre.

La trame REQ est formée de cinq champs principaux (comme les deux trames de commande précédente): le contrôle de trame, la durée, RA, TA et FCS.

RA est l'adresse MAC de diffusion parce que nous voulons connaître la présence de chaque nœud dans la portée du dispositif d'émission afin qu'ils puissent ajouter le nœud à leurs tables.



*Figure III.5: La trame REQ*

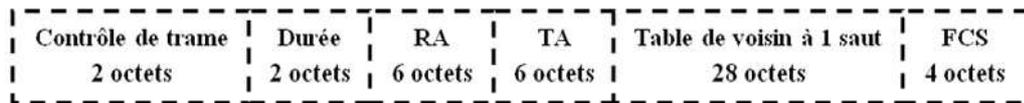
### III.3.5 Trame de répondre REP

La dernière trame de contrôle que le CLA-MAC introduit est la trame de réponse REP. Cette trame est également utilisée dans la phase d'initialisation. Après tous les nœuds envoient leurs trame de demande et de construire leur table des voisins, ils vont envoyer une trame de réponse. Cette trame contient la table des voisins à 1-saut afin que chaque dispositif de réception puisse construire la table des voisins à 2-sauts. Cette trame est également envoyée périodiquement parce que les tables à deux sauts doivent être mises à jour pour les changements de topologie.

La trame REP est formée sur six domaines principaux: le contrôle de trame, la durée, RA, TA, table de voisins à 1-saut et FCS.

RA est l'adresse MAC de diffusion parce que nous voulons que chaque nœud dans la portée du dispositif d'émission d'ajouter son table du voisins à 1-saut à leur table des voisins à 2-sauts. TA est l'adresse du nœud qui transmet la trame. Le domaine le plus important dans cette trame est la table des voisins à un seul saut. Le format de cette table et la façon dont il est créé sera décrite dans la section de la phase d'initialisation.

La longueur de cette trame est variable (dépend du nombre d'entrées dans la table du voisin) et elle est composée comme suit: le champ de contrôle de trame a 2 octets, la durée de 2 octets, RA 6 octets, TA 6 octets, la table du voisins d'un saut a 28 octets multiplié par le nombre d'entrées et enfin la séquence de contrôle de trame a 4 octets. La figure III.6 montre les six domaines présentés dans cette section:



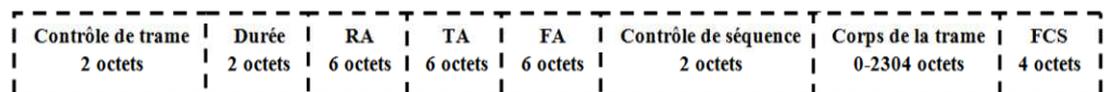
*Figure III.6: La trame REP*

### III.3.6 Trame de données

Comme les autres protocoles, CLA-MAC utilise également des trames de données pour transmettre des informations d'un nœud à un autre. L'information peut être envoyée seulement après la terminaison de la partie de découverte et l'actualisation des tables des voisins. Il y a deux options pour envoyer des données: directement, de la source à la destination, ou d'une manière coopérative, à l'aide d'un relais. Le relais reçoit également les données lorsque la source les envoie, donc si la destination envoie une demande de relais. Le relais peut transmettre les paquets reçus s'il a les décodés correctement.

La trame de données est faite de huit domaines principaux: le premier est le contrôle de trame, présenté dans le chapitre II. Le deuxième est le champ de durée qui contient une valeur en microsecondes qui représente le temps nécessaire pour envoyer une trame ACK plus un intervalle SIFS. Le troisième est RA. Après l'adresse du récepteur, nous avons l'adresse de l'émetteur TA. Le cinquième est le champ d'adresse qui est utilisée à la fin de filtrage par le récepteur. Après, le champ de contrôle de séquence qui est utilisée pour éliminer les répétitions et ordonner les trames correctement au niveau du récepteur. Le septième est le champ du corps de trame qui contient les données réelles encapsulées au niveau des couches supérieures. Enfin, le champ FCS est utilisé à la destination pour la vérification de l'intégrité.

La longueur de cette trame est variable (dépend de la taille du corps de trame et peut avoir une longueur minimale de 28 octets et une longueur maximale de 2332 octets) et composé comme suit: le champ de contrôle de trame a 2 octets, la durée 2 octets, RA 6 octets, TA 6 octets, FA 6 octets, la commande de séquence 2 octets, le champ du corps de trame qui varie en taille entre 0 et 2304 octets et enfin la séquence de contrôle de trame avec 4 octets. La figure III.7 montre les huit domaines présentés dans cette section:



*Figure III.7: La trame de données*

### III.4 Mécanisme de commande

Jusqu'à présent nous avons présenté les trames communes utilisées dans le protocole CLA-MAC et un scénario de base d'un réseau dans lequel nous avons expliqué à peu près la façon de fonctionnement du protocole, dans cette section, nous allons présenter les détails.

Le protocole est réalisé en quatre parties principales: la phase d'initialisation, la transmission directe, la phase de sélection du relais et la transmission coopérative. Ensuite, nous allons présenter chacune de ces parties en détail, en expliquant comment ils fonctionnent à l'aide d'exemples pratiques pour mieux comprendre le mécanisme de chacun.

#### III.4.1 Phase d'initialisation

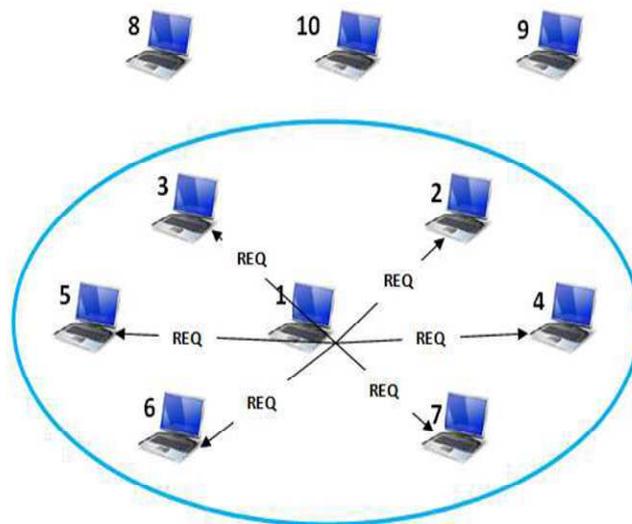
La phase d'initialisation du CLA-MAC a été construite à partir de la phase de découverte de LA-MAC car le protocole LA-MAC a été le premier à mettre en œuvre ce mécanisme de découverte de voisin en utilisant ses propres trames pour annoncer les nœuds du réseau et de construire ses tableaux spécifiques avec des informations spécifiques qui seront utiles dans les phases ultérieures.

Le principal objectif de cette phase est :

- La construction des tables des voisins depuis le début quand un nœud veut envoyer des données, il aura les tables déjà créées. Si les tables sont régulièrement actualisées, la chance d'avoir des collisions ou des paquets perdus diminue significativement.
- L'utilisation des petites trames de sorte que le temps de transmission pour eux serait également faible.
- La phase d'initialisation doit être faite périodiquement en raison de la mobilité.
- L'utilisation des adresses physiques à la couche MAC.

##### III.4.1.1 Description du Mécanisme

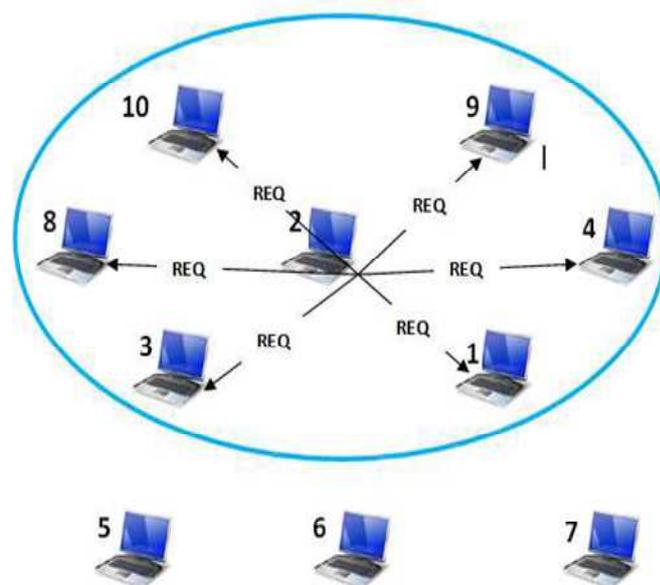
La trame de demande REQ sera transmise par une station pour permettre à d'autres appareils dans sa portée connaissent sa présence. Elle est diffusée à tous les appareils qui sont dans la portée de l'émetteur de telle manière que tous ces appareils reçoivent la trame, et le processus pour voir le type de la trame et leur origine. Dans la figure III.8 nous pouvons observer un scénario avec dix stations qui sont dans la phase de découverte:



*Figure III.8 : diffusion de REQ par le nœud 1*

Le nœud 1 initiera le processus de découverte par la diffusion d'une trame REQ (REQuest). Chaque nœud recevant le paquet vérifie s'il possède le nœud 1 dans leur table de voisin à un seul saut. Si ce n'est pas le cas, il rajoutera le nœud 1 à sa propre table. D'après la figure III.8, on peut observer aussi que les nœuds 8, 9 et 10 ne sont pas dans la portée de nœud 1 (le cercle bleu), de sorte qu'ils ne reçoivent pas la trame.

Après le nœud 1 est envoyé sa trame de REQ et tous les appareils traités le paquet. Le nœud 2 vérifie d'abord qu'il n'est pas occupé par le traitement ou l'envoi d'un paquet, sinon il diffusera la trame REQ. La figure III.9 montre ce processus:

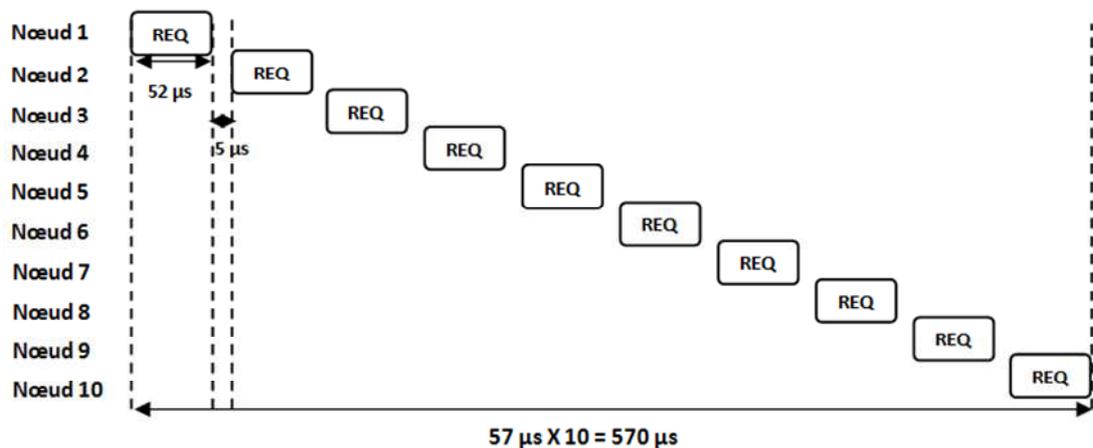


*Figure III.9 : Diffusion de REQ par le nœud 2*

Le nœud 2 est envoyé la trame de REQ et tous les appareils dans sa portée (les nœuds 1, 3, 4, 8, 9 et 10) lui reçu. Les nœuds 5, 6 et 7 sont hors de la portée, donc ils restent au repos. Alors, les nœuds 1, 8, 9 et 10 ont dans la table de nœud 2. Les nœuds 5, 6 et 7 ont seulement dans la table de nœud 1. Pendant ce temps, les nœuds 3 et 4 sont les seuls nœuds qui ont reçu la trame REQ à partir les deux appareils d'émission 1 et 2.

Ce processus se répète jusqu'à tous les nœuds envoient leur trame REQ et toutes les tables sont remplies avec les adresses des appareils d'émission.

Si aucun mécanisme de contention ne serait utilisé, tous les nœuds transmettraient dans le même temps la trame REQ. Le résultat de ce scénario peut être traduit en un grand nombre de collisions qui se produiront. En outre, aucune entrée ne serait ajoutée à la table des voisines à un saut. La solution pour éviter ce genre de problème est de rendre chaque nœud envoyé dans un intervalle de temps donné. De cette façon, chaque nœud à sa fenêtre de transmission ; et le temps restant, il sera en mode d'écoute. Nous savons que la trame de REQ a une longueur de 20 octets. La durée de transmission maximale d'une trame avec cette longueur est de  $52 \mu\text{s}$ . Pour cela, nous ajoutons  $5 \mu\text{s}$  représentant le temps de propagation maximum et nous obtenons une période de  $57 \mu\text{s}$  pour chaque appareil. La ligne de temps dans la figure III.10 correspond au scénario que nous avons présenté précédemment:



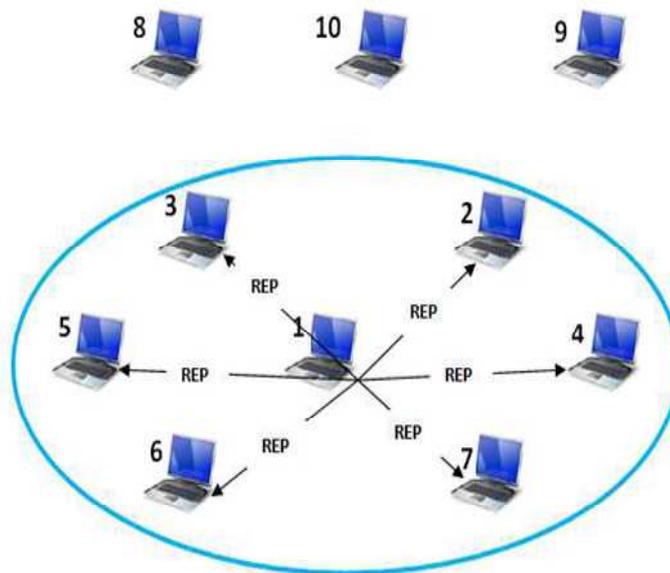
**Figure III.10 : Le temps de transmission de trame REQ**

Comme le montre la figure III.10,  $570 \mu\text{s}$  est le temps nécessaire pour que tous les nœuds envoient et reçoivent la trame de REQ et aussi pour ajouter les entrées à la table des voisines d'un saut. Après cette période, tous les nœuds ont terminé leurs tables avec les adresses de tous les voisins.

Une fois que tous les nœuds ont complété cette partie, ils peuvent passer à la création des tables des voisines à deux sauts. Cette deuxième partie est réalisée en utilisant la trame de réponse REP.

Lorsqu'un nœud génère une telle trame, il doit mettre sa table des voisins d'un saut dans la trame REP. Après cela, il diffuse cette trame à tous ses voisins d'un saut. Chaque nœud qui reçoit la trame REP traitera les informations qu'elle contient et stocker la table reçue dans leur table des voisines à deux sauts. A côté de l'information contenue dans la trame, le nœud récepteur stocke l'adresse du nœud d'émission pour savoir tous les voisins et aussi le nombre d'entrées dans la table reçue. Le format des deux tables et plus de détails peut être trouvée dans la section «tables de voisins».

La topologie que nous allons utiliser pour présenter cette partie est la même avec la précédente, la seule différence est le type de trame utilisé:



*Figure III.11 : Diffusion de REP par le nœud 1*

Le nœud 1 diffuse la trame REP, et tous ses voisins d'un saut (nœud 2, 3, 4, 5, 6 et 7) devraient recevoir et traiter cette trame. La première chose le nœud vérifie s'il possède l'émetteur de la trame dans sa liste des voisins d'un saut. Si ce n'est pas le cas, il rajoutera à la fin de la table. Mais si l'entrée existe déjà, nous déplacerons sur elle. Chaque nœud vérifie les entrées dans la trame et compare chaque adresse avec l'adresse du destinataire. S'il y a un accord, cette entrée sera supprimée parce que ce nœud ne peut pas être en même temps un voisin à deux sauts. Après cela, toutes les entrées de la trame REP sont copiées dans la table des voisines à deux sauts et pour chacune de ces entrées est spécifiée la source qui a fourni cette adresse.

En outre, nous ajoutons le nombre d'entrée présente dans la trame. Donc, nous savons chaque nœud a combien de voisins.

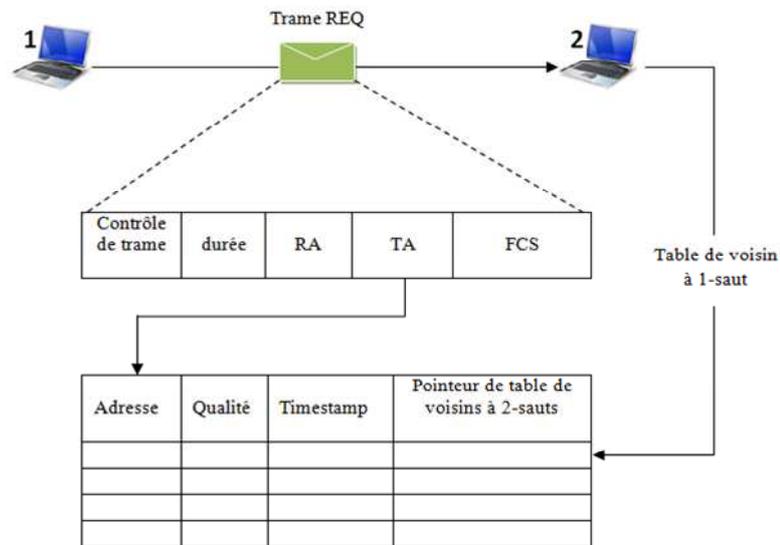
Ce processus se répète jusqu'à tous les nœuds présents dans le réseau reçoit une trame REP de tous ses voisins d'un saut et leurs tables à deux sauts sont construites.

Lorsque cette partie se termine, nous pouvons dire que la partie de la découverte est terminée et les données peuvent être transmises d'une station à une autre. La dernière chose que nous devons prendre en considération est que cette phase se fait périodiquement et les tableaux sont toujours actualisés avec les nouvelles informations, car les stations sont mobiles et se déplacent librement dans le réseau. Elles peuvent sortir d'une portée de nœud et entrer dans une autre à tout moment.

### III.4.1.2 Les tables de voisins

Jusqu'à présent, nous avons présenté une description générale du mécanisme et comment il fonctionne. Dans cette section, nous allons montrer le format des deux tables qui sont créés par chaque nœud et la façon dont ils sont remplis.

Dans la première partie du mécanisme, chaque nœud diffuse la trame REQ dans leur intervalle du temps et quand un voisin reçoit la trame, il traite le paquet. Dans la figure III.12, nous pouvons voir comment le nœud 1 envoie une trame vers le nœud 2 et comment ce nœud gère les informations reçues:



**Figure III.12 : Création de table de voisin à 1-saut**

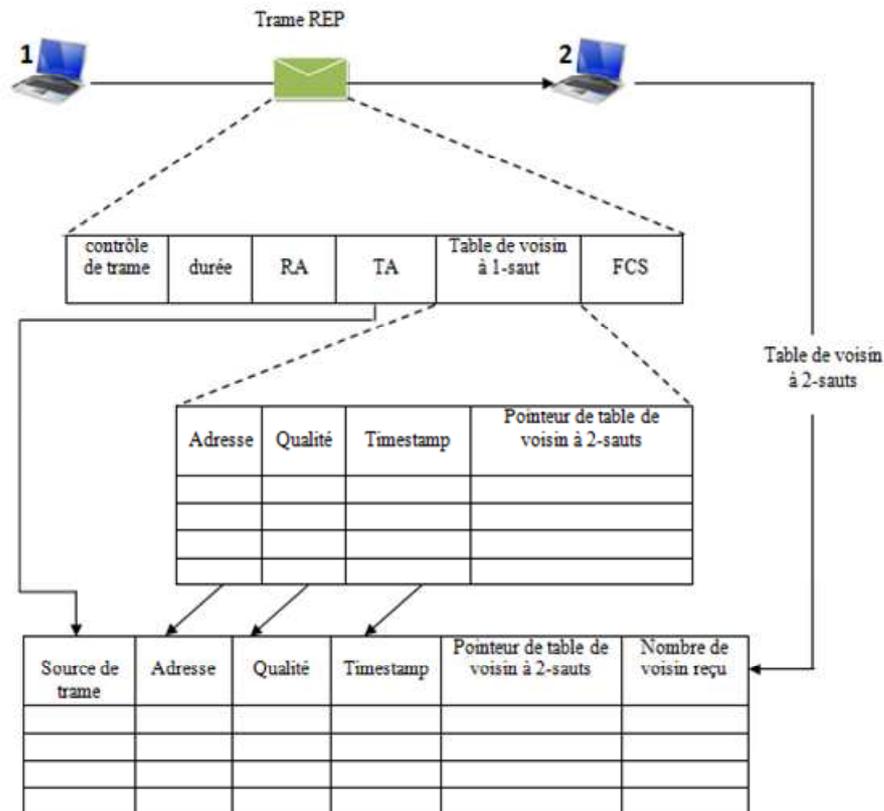
Lorsque le nœud 2 reçoit un paquet, il vérifie leur type. Si elle est une trame REQ, il va d'abord prendre la valeur dans le champ d'adresse de l'émetteur et de comparer avec toutes les adresses dans sa table de voisins à un saut. Si aucune correspondance n'est trouvée, il va ajouter l'adresse de l'émetteur dans la colonne appropriée de la table d'un saut. Après cela, le nœud va mettre une valeur dans le domaine de la qualité qui correspond à le SINR (Signal Noise Ratio). Ceci est calculé par l'équation mathématique suivante:

$$SINR = \frac{P}{N_{floor} - P}$$

Où P «Power» représente la puissance effective à laquelle la destination reçoit la trame. Si SINR a une valeur négative, il sera mis à zéro dans le tableau.  $N_{\text{floor}}$  « Noise floor » est l'un des paramètres qui est défini lorsque nous créons un scénario et a la même valeur pour tous les nœuds.

Dans le champ de timestamp, le nœud de réception mettra le moment exact où la trame a été reçue de sorte que lorsque plusieurs entrées sont comparées, la plus récente sera choisie. Le pointeur sur le champ de table de voisins à deux sauts reste inchangé.

Dans la deuxième partie de cette phase, chaque nœud diffuse dans leur intervalle de temps une trame de REP et quand un voisin reçoit la trame, il traite le paquet. Dans la figure III.13, nous montrons comment le nœud 1 envoie une trame de REP au nœud 2 et comment le nœud de réception gère la réception d'information:



**Figure III.13 : Création de la table de voisins à 2-sauts**

Lorsque le nœud 2 reçoit une trame, la première chose il va vérifier celui-ci pour voir quelle est leur type. Si elle est une trame de REP, la prochaine chose il va vérifier si l'adresse d'émetteur de la trame est dans sa table de voisinage d'un saut. Ce n'est pas représenté dans la figure III.13 parce que cette procédure a été présentée dans la première partie et dans celui-ci est fait comme une sauvegarde, dans le cas où la première partie échouée. Ensuite, il permet de copier toutes les entrées de la table de trame REP à la table de voisins à deux sauts comme le montre la figure III.13. Le

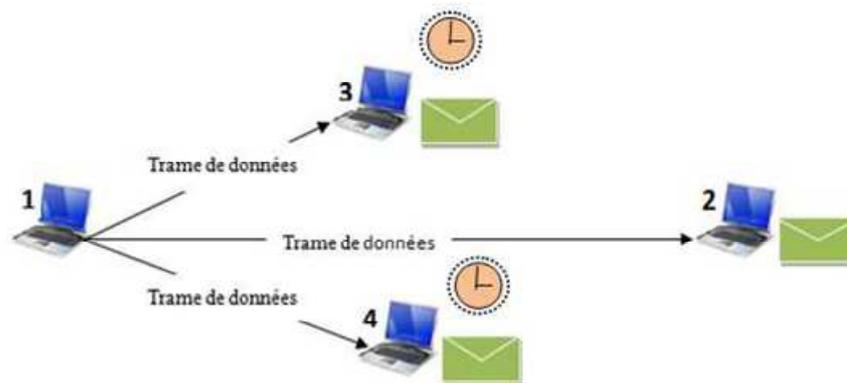
champ de l'adresse d'émetteur de la trame REP copié dans le champ de source de trame de la table des voisins à deux sauts.

Après la table à deux sauts est terminée, un pointeur sera fait entre celui-ci et la table d'un saut. Ce pointeur sera placé dans le champ avec le même nom dans la table d'un saut. En outre, dans le champ du nombre de voisins reçu est insérée la valeur qui représente le nombre d'inscriptions reçues.

### III.4.2 Transmission directe

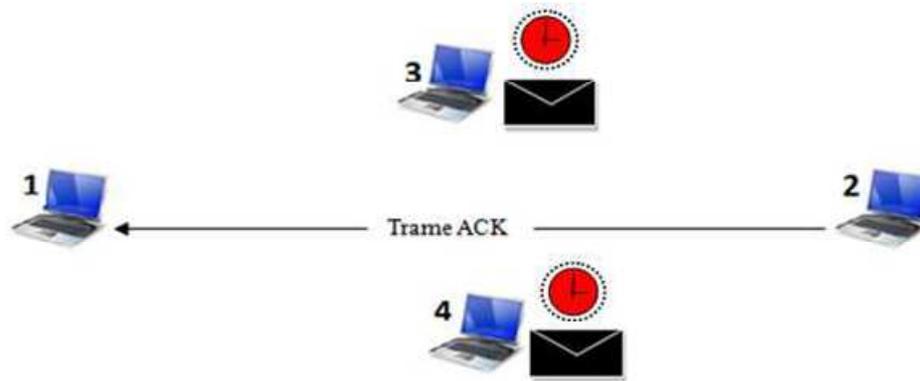
Cela devrait être la partie la plus simple dans le protocole, car elle implique simplement la source et la destination. Les tables de voisins ne sont pas utilisées dans cette phase et aucun autre relais sont nécessaires pour aider la communication. Juste deux nœuds sont utilisés, un dispositif émetteur et un autre récepteur et bien sûr la trame de données qui est envoyé.

Pour mieux comprendre le processus d'envoi de données, nous allons utiliser un scénario simple. Nous aurons un réseau avec quatre nœuds (une source, une destination et deux nœuds indépendants).



*Figure III.14 : Transmission directe – nœud 1 transmettre les données*

Le nœud 1 envoie des données destinées à nœud 2, mais ces paquets sont également reçus par les nœuds 3 et 4, qui les stockent pour une période de temps définie. Le nœud 2 reçoit les informations envoyées par le dispositif 1, il décode correctement les informations donc il ne sera pas envoyer une demande d'un relais.



*Figure III.15 : Transmission directe – nœud 2 transmettre ACK*

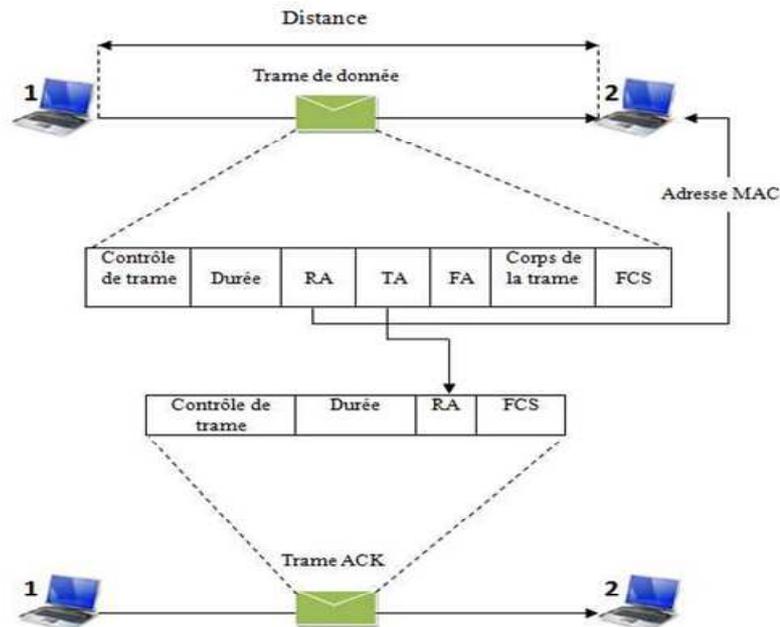
Comme on peut le voir d'après la figure III.15, le nœud 2 envoie une trame d'accusé de réception destiné pour le nœud 1 parce qu'il décode correctement les informations. Les nœuds 3 et 4 chuteront leurs paquets parce que la minuterie de temps d'attente a expiré et aucune trame de RReq a été reçue dans cet intervalle et aussi le nœud 2 a envoyé une trame ACK.

Ceci est un exemple simple d'un scénario, dans lequel la transmission directe était efficace et aucun relais étaient nécessaires.

#### **III.4.2.1 Processus de communication Source-Destination**

Dans la section précédente, nous avons présenté comment une trame de données est envoyé entre une source et une destination et que se passe avec d'autres appareils dans la portée des deux. Maintenant, nous allons nous concentrer uniquement sur le paquet échangé entre les deux et expliquer plus en détail la façon dont les champs sont traités et remplis.

Nous considérons un scénario avec seulement deux nœuds, la source et la destination et nous supposons que la phase d'initialisation est terminée:

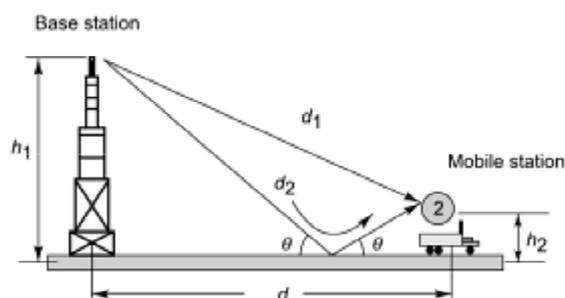


**Figure III.16 : Transmission directe – processus de communication**

Le choix d'une transmission directe ou coopérative dépend de la distance entre la source et la destination.

La distance mesurée dépend de quel modèle est utilisé. Dans nos simulations, nous travaillons uniquement avec le modèle two-ray ground reflection [38] qui considère à la fois le chemin direct et une réflexion sur le sol. Ce modèle donne des résultats plus justes quand la distance est assez grande.

Dans la figure III.17, nous montrons les deux rayons et la distance pour chacun ( $d_1$  et  $d_2$ ), ainsi que la hauteur ( $h_1$  et  $h_2$ ) des deux dispositifs de communication:



**Figure III.17 : Le modèle two-ray ground reflection.**

La distance entre deux nœuds est calculée par l'équation suivante:

$$d = \sqrt{\sqrt{\frac{P_t * G_t * G_r * (h_t^2 * h_r^2)}{P_r * L}}}$$

$d$  : la distance entre deux nœud

$P_t$  : puissance de transmission

$P_r$  : puissance de réception

$G_t$  : gain d'antenne de transmission

$G_r$  : gain d'antenne de réception

$h_t$  : hauteur d'appareil de transmission

$h_r$  : hauteur d'appareil de réception

$L$  : le facteur de perte du système

Si cette distance est supérieure à 600 mètres et la valeur de SINR ou la qualité de liaison au niveau du nœud de réception est inférieure à 6, ce qui implique l'utilisation d'un relais pour la communication. Sinon la source peut émettre des trames directement à la destination.

Dans le scénario de la transmission directe, la distance est inférieure à cette valeur. La destination reçoit un paquet, s'il est destinée pour cela, elle le traite et envoie une trame ACK retour à la source. Dans la trame ACK l'adresse de récepteur est une copie d'adresse d'émetteur de la trame de données.

### III.4.3 Transmission coopérative

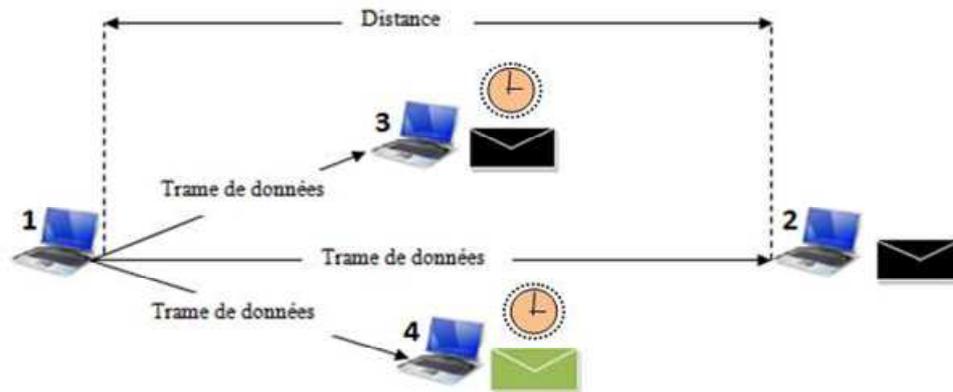
Ceci est la partie la plus importante d'un protocole coopératif. Il est utilisé lorsque la transmission directe est inefficace ou échoue.

Dans la section précédente, nous avons présenté comment les données sont transmises à partir d'une source à une destination d'une manière directe. Quand la qualité est inférieure à la valeur définie et les paquets ne peuvent pas être décodés par le récepteur. Ceci est la raison pour laquelle les protocoles coopératifs étaient mis en œuvre en premier lieu.

Le protocole CLA-MAC livre une solution qui utilise des tables des voisins pour aider la recherche de destination sur l'adresse avec la meilleure qualité de lien

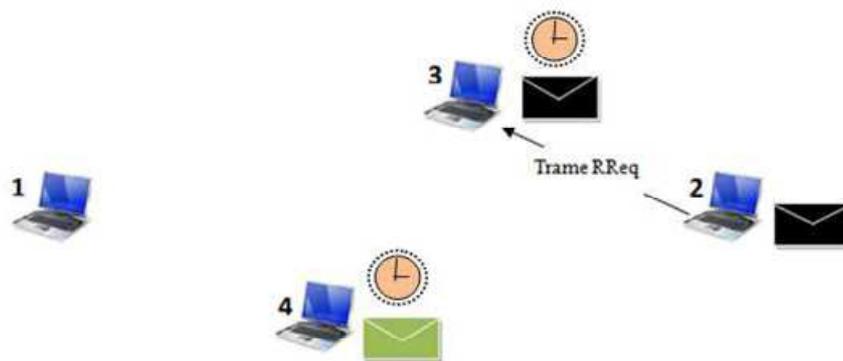
vers elle. L'utilisation d'un relais intermédiaire de la communication entre la source et la destination est vitale lorsque la destination est trop loin de la source et ne peut pas communiquer directement.

Nous allons présenter cette partie en utilisant le même scénario des sections précédentes:



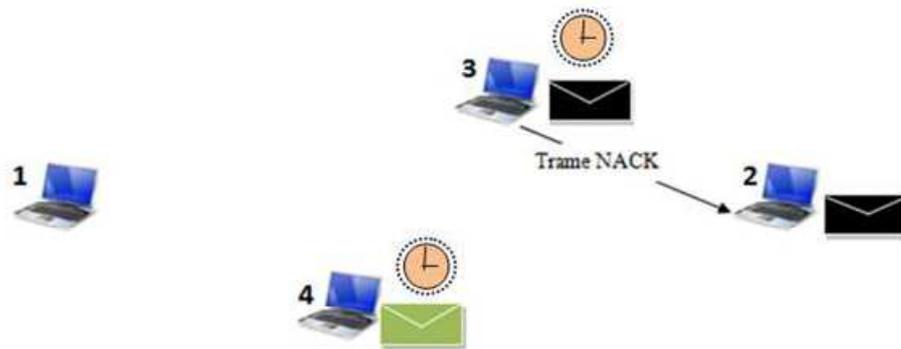
**Figure III.18 : Transmission coopérative – nœud 1 transmettre les données**

Le nœud 1 envoie une trame de données qui est destinée au nœud 2 et les nœuds 3 et 4 également recevoir. La seule chose qui diffère dans ce scénario est la distance entre l'émetteur et le récepteur. Elle a augmenté de manière significative provoquant la destination d'échouer la réception et le décodage correctement des informations. La distance entre les deux est supérieure à 600 mètres résultant en une qualité de la liaison inférieure à 6 qui est la valeur minimale qui permet à une transmission directe. Dans ces conditions, un relais est nécessaire pour terminer la communication de manière réussie.



**Figure III.19 : transmission coopérative – le nœud 2 transmette RReq au 3.**

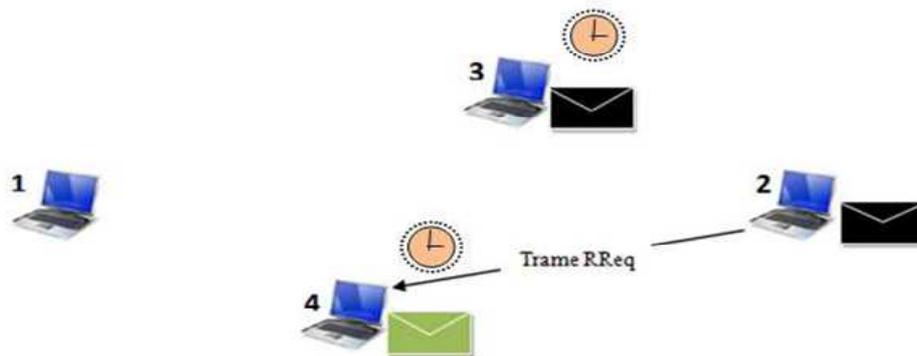
Lorsque le nœud 2 est observé que la qualité du lien est faible, il choisit son voisin avec la meilleure qualité dans ses tables de voisins. Dans ce scénario, il envoie une trame RReq au nœud 3, demandant s'il a reçu la trame.



**Figure III.20 : Transmission coopérative – le nœud 3 transmettre NACK**

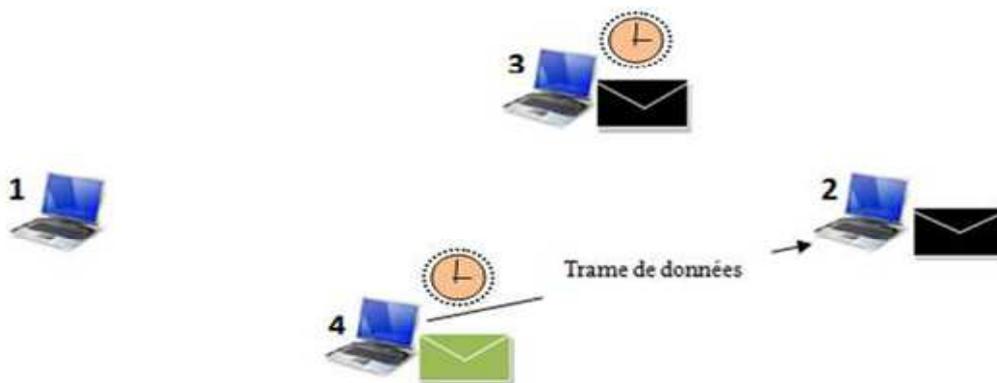
Le nœud 3 n'a pas reçu aucune trame du dispositif 1 et répondra avec une trame NACK pour informer son voisin qu'il n'a pas les données demandées.

Ensuite, le nœud 2 choisit le deuxième meilleur voisin qui peut être un relais et l'envoyer une trame RReq au nœud 4, pour lui demander s'il a les données demandées.



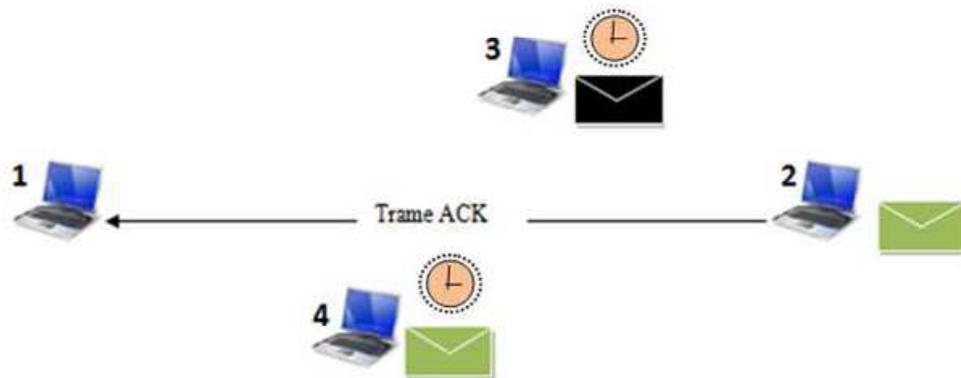
**Figure III.21 : transmission coopérative – le nœud 2 transmettre RReq au 4.**

Le nœud 4 reçoit la trame RReq, il a les informations demandées ; il envoie une trame de données à la destination (nœud 2) avec les données demandées.



**Figure III.22 : Transmission coopérative – le nœud 4 transmettre les données**

Enfin, le nœud 2 reçoit la trame de données et la décode correctement. La dernière chose qu'il va faire avant que la communication peut se terminer est d'envoyer une trame ACK au nœud 1 et l'informant que les données ont été reçues correctement et aucune retransmission est nécessaire.



*Figure III.23 : Transmission coopérative – le nœud 2 transmette ACK*

Lorsque le nœud 1 reçoit la trame ACK du nœud 2, le processus de communication se termine avec succès.

#### III.4.3.1 Diagramme d'activité

Les diagrammes d'activité sont idéals pour la présentation des protocoles. Ils sont très simples à expliquer toutes les activités effectuées dans une phase. Dans notre diagramme, nous présentons les activités qui sont effectuées par un nœud qui est dans la phase de transmission coopérative.

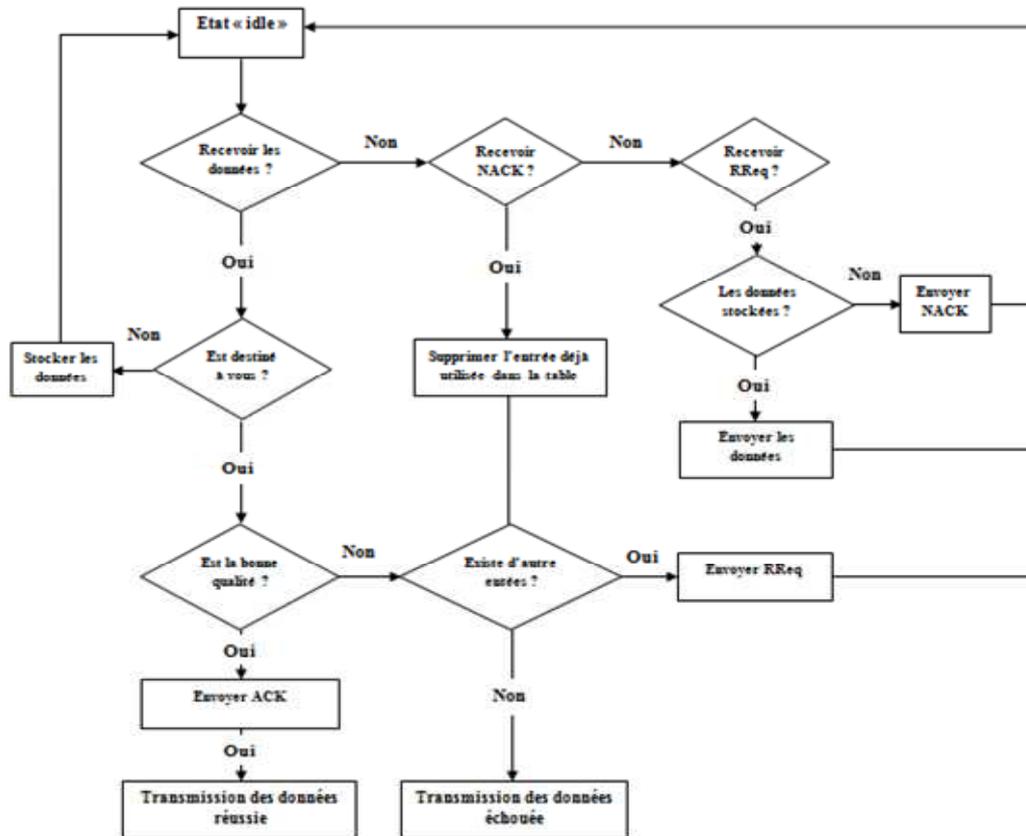


Figure III.24 : Diagramme d'activité

#### III.4.4 Sélection de relais

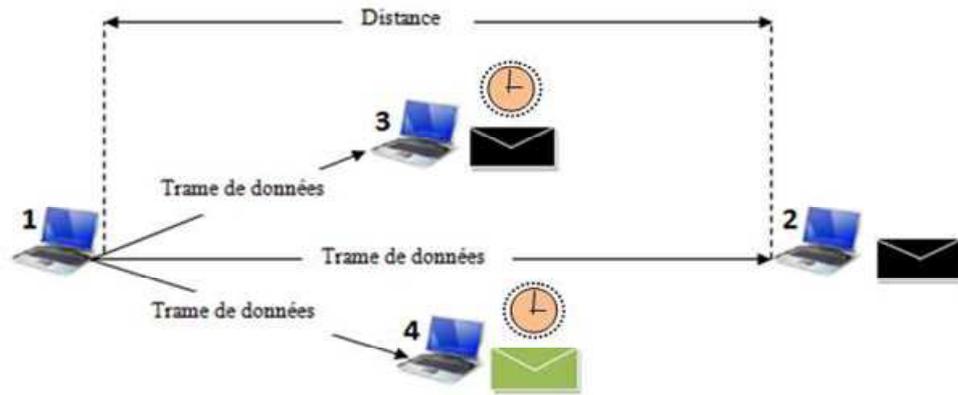
Cette section est profondément liée à la partie de transmission coopérative. La transmission coopérative ne peut pas fonctionner sans la partie de sélection de relais. Cette partie peut être considérée comme l'une des plus importantes parce que si les relais ne sont pas bien choisis, les résultats et l'ensemble du réseau peuvent être affectés. Seule la destination, après avoir qu'elle ne peut pas décoder les données, elle peut commencer la phase de sélection de relais.

Lorsque la destination réalise que la qualité entre celle-ci et la source est trop faible et la transmission directe a échoué, il commence la transmission de coopération. Pour cela, un relais est nécessaire pour aider la destination à recevoir ses informations destinées.

Pour sélectionner un relais, il faut d'abord vérifier le contenu des tables de voisins. Chaque entrée est faite d'un champ d'adresse, un champ de qualité, un timestamp et un pointeur vers une autre table. Donc, le voisin avec la meilleure qualité est choisi. Si deux nœuds ont la même qualité, l'une avec le timestamp la plus récente est choisie. Si le timestamp est également le même, il n'a aucune importance que nous choisissons. Il est important de mentionner que la qualité du relais doit être supérieure à la qualité de la liaison entre la source et la destination. Comme nous

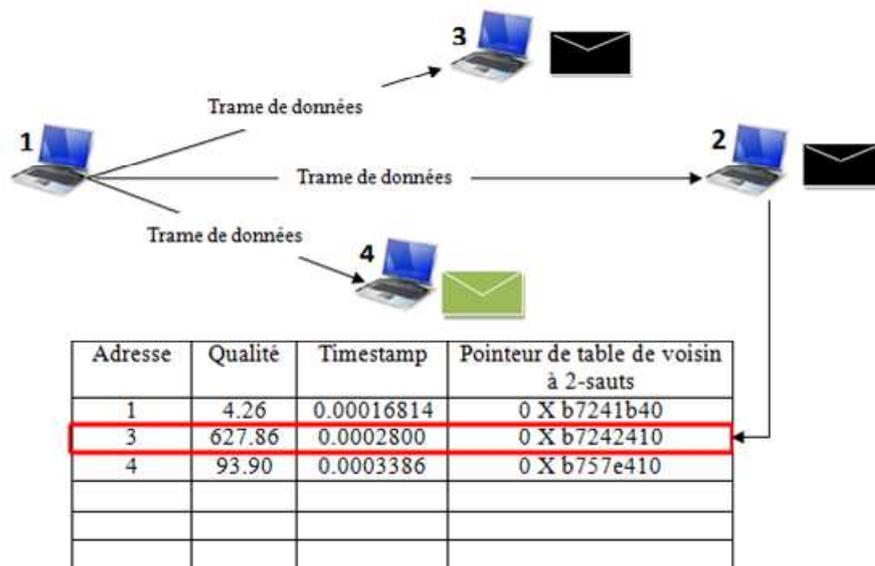
l'avons fait dans la section précédente, nous allons utiliser le même scénario pour nous aider à mieux expliquer comment ce processus fonctionne.

La première partie est similaire: le nœud 1 envoie des données destinées à nœud 2. Ce paquet est également entendu par les deux relais qui les stockent. La distance entre les deux nœuds qui communiquent est très grande, donc un relais est nécessaire pour que la communication termine avec succès.



**Figure III.25 : Transmission coopérative – nœud 1 transmette les données**

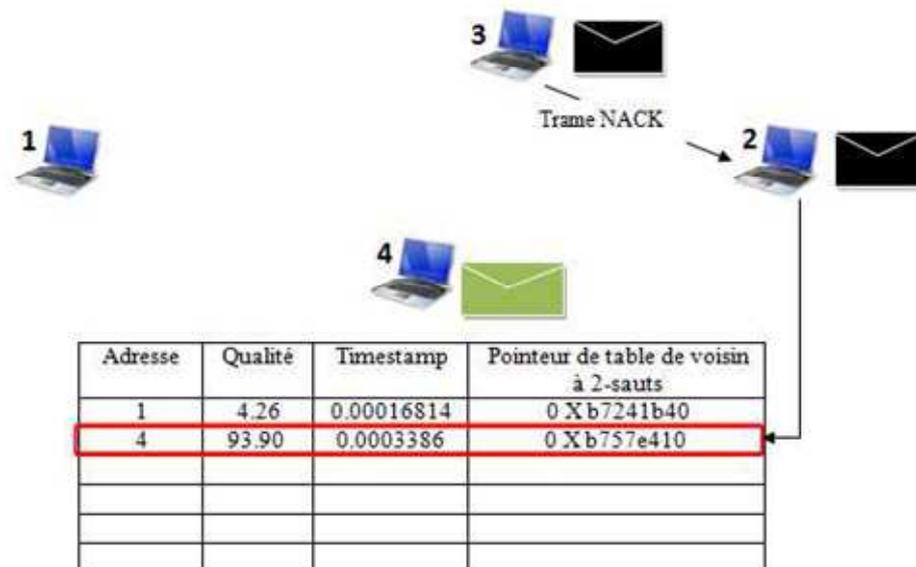
Pour le sélectionner, il recherche dans sa table de voisin pour trouver l'adresse de l'appareil qui a la meilleure qualité de lien. Ce processus peut être observé à partir de la figure III.26 :



**Figure III.26 : La phase de sélection de relais**

Il sélectionne le nœud 3 parce qu'il a la plus haute qualité dans le tableau. Pour ce nœud, la destination va envoyer une trame RReq pour voir s'il a l'information. Si ce nœud n'a pas les informations demandées, il répondra par une trame NACK.

Lorsque la destination reçoit cette trame, il supprime l'entrée utilisée précédente de sa table et choisit une autre adresse avec une bonne qualité:



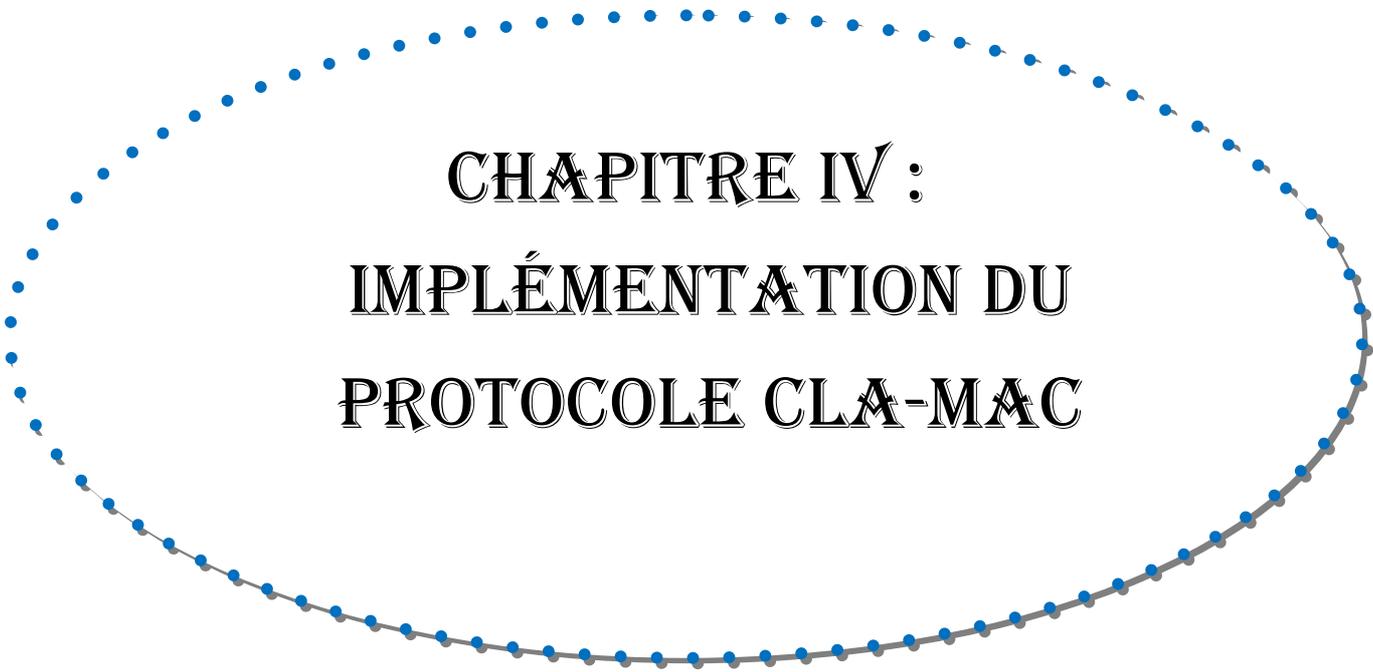
*Figure III.27 : Sélection de deuxième meilleur relais*

Il trouvera l'adresse du nœud 4 comme le prochain meilleur voisin et envoyer à lui une trame RReq demandant les informations. Ce nœud a les données demandées, donc transmet les informations au nœud 2. Lorsque la destination reçoit la trame de données à partir du nœud 4, elle enverra un ACK et la communication sera terminée.

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un protocole de coopération qui convertit une transmission directe à faible débit en une transmission coopérative avec des niveaux de débits élevés. En effet, le protocole CLA-MAC permet aux nœuds distants de transmettre leurs informations à un débit de données élevé, en utilisant des nœuds intermédiaires comme relais.

Le chapitre suivant présente l'implémentation du protocole coopératif CLA-MAC et les résultats de simulation.



**CHAPITRE IV :**  
**IMPLÉMENTATION DU**  
**PROTOCOLE CLA-MAC**

## IV.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons montré comment le protocole CLA-MAC fonctionne, comment les tables de voisin sont créées et comment les entrées sont remplies. Maintenant, nous allons passer à un niveau supérieur et présenter l'implémentation des différentes fonctionnalités du protocole.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous allons analyser les résultats de la simulation dans le but de comparer et d'évaluer les performances du protocole CLA-MAC avec le standard IEEE 802.11. Ainsi, Dans cette section d'analyse, nous allons valider les performances de CLA-MAC. Nous évaluons le débit global, la consommation d'énergie et l'efficacité énergétique. A noter que l'implémentation du protocole sera faite sur la version étendue du simulateur NS2 noté "NS2 IEEE 802.11 Extended version". Cette version est plus stable et s'approche le plus du standard IEEE 802.11.

## IV.2 Environnement de simulation

NS2 est un outil logiciel de simulation libre à code source ouvert et à évènements discrets permettant l'étude, la conception et la gestion des protocoles pour les réseaux informatiques. Ce simulateur est développé en C++ et OTCL, est utilise le langage TCL comme langage de création des scénarios de simulation. Il supporte les réseaux sans fil et filaires, avec plusieurs protocoles des différentes couches (Physique, MAC, réseaux, transport ... etc.) [39]. NS2 est le simulateur le plus utilisé dans le domaine de recherche pour les tests des nouveaux protocoles proposés.

La conception d'implémentation des réseaux sur NS 2 par défaut est composée de plusieurs modules en couches qui sont reliés entre eux par des interfaces simples pour transmettre des paquets vers le haut et le bas le long des couches. Le plus grand inconvénient de cette implémentation est la nature structurale. La plupart des fonctionnalités de la couche physique sont mélangés dans la couche MAC. Par conséquent, il est très difficile, sinon impossible, pour modéliser tout correctement aux niveaux physiques et logiques. Le module MAC trop complexe est également un grand défi pour les utilisateurs de comprendre et d'étendre dans leurs recherches.

L'architecture de modèle étendu 802.11 Ext, est complètement différente à l'implémentation par défaut. Au lieu de mettre tout à l'intérieur de la MAC, toutes les fonctionnalités ne sont pas clairement et bien séparées entre le MAC et PHY. Le module MAC maintenant ne fonctionne que sur le niveau logique. Cela dépend de la PHY pour gérer les actuelles transmissions, réceptions et la détection de canal physique. Le but de la conception MAC est de modéliser correctement et nettement toutes les complexités de mécanisme CSMA / CA. Un objectif clé de cette nouvelle conception est de rendre facile pour les utilisateurs à comprendre et à étendre le MAC pour leurs recherches.

### IV.3 Implémentation du protocole CLA-MAC

Pour commencer, nous allons présenter une vue générale sur la structure de l'implémentation: il est formé de plusieurs classes, mais les plus importantes sont: Mac802\_11Ext, TXC et RXC. Ces trois sont les classes que nous allons utiliser tout au long de la présentation. Chacun d'eux a ses propres variables publiques /privées / protégées et leurs méthodes. On ne va pas entrer en détail et de mentionner tous ceux-ci, mais tandis que nous présentons l'implémentation nous mentionnerons les plus importants.

#### IV.3.1 Implémentation de la phase d'initialisation

La première chose nous allons montrer la manière dont une trame est déclarée dans notre implémentation. Le type de trame que nous avons choisi de présenter est REP. La raison de cette décision est liée à l'importance et la complexité de celui-ci.

D'après les lignes suivantes, nous pouvons observer les six champs de la trame que nous avons présentée dans le chapitre III:

```
1. struct rep_frame {
2.     struct frame_control repf_fc;
3.     u_int16_t repf_duration;
4.     u_char repf_ra[ETHER_ADDR_LEN];
5.     u_char repf_ta[ETHER_ADDR_LEN];
6.     struct tableN *repf_tb;
7.     u_char repf_fcs[ETHER_FCS_LEN];
8. };
```

Les trames restantes ont des formats similaires et nous avons décidé que si nous présentons la structure d'une seule est suffisant pour comprendre la façon dont elles ont été déclarées dans notre implémentation.

Comme indiqué précédemment, la phase de découverte est déclenchée périodiquement, quand un temporisateur de temps de maintien expire. Donc, voici ce que nous allons discuter ensuite. Chaque fois que ce temporisateur expire, la méthode *handleREQInitialtimeout ()* est appelée et ses fonctionnalités sont présentées ci-dessous:

```
1. void Mac802_11Ext::handleREQInitialtimeout()
2. {
3.     macREQInitialTimer_.resched(10);
4.     emptyTables();
5.     txc.genfloodREQ();
6. }
```

Lorsque la fonction qui génère la trame REQ appelée, la première chose qu'elle fait est de vérifier si le nœud envoie déjà une trame. Sinon, elle vérifie s'il n'est pas occupé à envoyer ou recevoir des données avec un autre nœud. Si ce n'est pas le cas, le nœud est libre de générer la trame et de planifier un moment où il sera capable d'envoyer:

```

1. void TXC::genfloodREQ()
2. {
3.     if(mac_>alreadysent1==0)
4.     {
5.         if (mac_>bkmgr.getBackoffMgrState()==noBackoff)
6.         {
7.             if (mac_>csmgr.getChannelState()==noCSnoNAV)
8.             {
9.                 generateREQFrame();
10.                mac_>alreadysent1=1;
11.                timewaitREQ_ = (0.000057)*(mac_>index_+1);
12.                txcREQTimer.sched(timewaitREQ_);
13.            }
14.            else
15.            {
16.                setTXCState(TXC_REQ_pending);
17.                mac_>bkmgr.handleBKStart(mac_>cw_);
18.            }
19.        }
20.        else
21.        {
22.            setTXCState(TXC_REQ_pending);
23.            mac_>bkmgr.handleBKStart(mac_>cw_);
24.        }
25.    }
26. }

```

Si le nœud est occupé, il va commencer un mécanisme de back-off pour vérifier l'état après une période de temps aléatoire, en évitant les collisions qu'elles peuvent se produire. L'actuel de générer une fonction ne sera pas présenté parce qu'en elle, nous insérons les informations correspondantes dans tous les champs et les sous-champs et cette partie est très similaire à tous les trames qui sont utilisées dans un protocole de communication.

Cette partie est similaire pour la trame REP, avec petits changements, donc, pour éviter la redondance dans notre présentation, nous n'avons pas présenté les mêmes informations deux fois.

Jusqu'à présent, nous avons présenté dans quelles conditions un nœud est autorisé à envoyer une trame de commande et comment cette action faite. Ensuite, nous allons concentrer sur la partie réceptrice. Cela fait dans la classe RXC, et quand un nœud reçoit une trame, la fonction *handleMsgFromBelow* (*Packet \* p*, *double quality\_*) est appelée, pour vérifier le type de la trame reçue. Ce cas est effectué pour chaque type différent, donc en fonction de la trame, ses informations sont traitées d'une manière différente.

Si une station reçoit une trame REQ, elle compare chaque adresse dans son adresse actuelle de voisin d'un saut avec l'émetteur et si une correspondance est trouvée, elle fera chuter le paquet et arrêter toute action ultérieure. Sinon, elle va ajouter une nouvelle entrée dans sa table. La fonction qui faite cet ajout est importante, donc nous avons décidé aussi de l'inclure dans notre présentation:

```

1. tableN** RXC::resize(tableN **tb,int count_)
2. {
3.     tableN **tb1=new tableN*[count_+1];
4.     for (int i=0;i<=count_;i++)
5.         tb1[i]=tb[i];
6.     free(tb);
7.     return tb1;
8. }
9.
10. void RXC::addN(u_int32_t source1,double quality_)
11. {
12.     count_++;
13.     tb=resize(tb,count_);
14.     tb[count_]=new tableN;
15.     tb[count_]->addrN=source1;
16.     tb[count_]->qualityN=quality_;
17.     tb[count_]->timestampN=Scheduler::instance().clock();
18.     tb[count_]->tbN=NULL;
19. }

```

La table de voisin d'un saut est créée dynamiquement, donc nous avons besoin de créer une fonction de redimensionnement qui serait appelée chaque fois qu'une entrée est ajoutée à la table. La qualité est calculée à la couche physique comme dans l'équation que nous avons présentée dans le chapitre III. Le timestamp contiendra le temps exact à lequel le dispositif a reçu la trame.

Si un nœud reçoit une trame de REP, il va d'abord faire toutes les étapes que nous avons présentées dans la partie précédente, car dans cette partie une sauvegarde est faite dans le cas où la trame REQ ne termine pas la table de voisin avec tous les voisins. Ensuite, il prendra toutes les entrées dans la trame et les copier sur la table de voisins à deux sauts. Après la table à deux sauts est terminée avec toutes les entrées de la trame, un pointeur sera fait entre la table d'un saut et la table de deux sauts, d'établir un lien entre les informations qu'elles contiennent. Dans les lignes suivantes, nous montrons l'implémentation de ces actions:

```

1. all_2hop_neighbours++;
2. neighbours[all_2hop_neighbours].sourceofframe_=source_sent;
3. for(i=1;i<=count_received;i++)
4.     {
5.         neighbours[all_2hop_neighbours].t2[i].addrN=repf->repf_tb[i].addrN;
6.         neighbours[all_2hop_neighbours].t2[i].qualityN=repf->repf_tb[i].qualityN;
7.         neighbours[all_2hop_neighbours].t2[i].timestampN=repf->repf_tb[i].timestampN;
8.     }
9. neighbours[all_2hop_neighbours].numberofentries_=count_received;
10.
11.
12. for (i=1;i<=count_;i++)
13. {
14.     if(tb[i]->addrN==source_sent)
15.     {
16.         tb[i]->tbN=&(neighbours[all_2hop_neighbours].t2[0]);
17.         break;
18.     }
19. }

```

### IV.3.2 Implémentation de la transmission directe

Tout d'abord, nous allons montrer comment les données est préparé, généré et envoyé par un nœud. Quand un nœud a des paquets qu'il veut transmettre, la première chose qu'il fait est de vérifier si le nœud n'est pas occupé. Dans ce cas, le dispositif sera mis un mécanisme de back-off pour une période de temps aléatoire, après lequel il peut envoyer ses données. Si la station est au repos, il peut préparer le MPDU et de le transmettre.

```

1. void TXC::handleMsgFromUp(Packet *p) {
2.     if (mac_>MAC_DBG)
3.         mac_>log("TXC", "msgFromUp");
4.     pDATA=p;
5.     prepareMPDU(pDATA);
6.
7.     if (mac_>bkmgr.getBackoffMgrState()==noBackoff)
8.     {
9.         if (mac_>csmgr.getChannelState()==noCSnoNAV)
10.        {
11.            if (mac_>MAC_DBG)
12.                mac_>log("TXC", "msgFromUp, noBackoff, noCSnoNAV");
13.            mac_>transmit(pDATA, Callback_TXC);
14.            setTXCState(TXC_wait_PDUsent);
15.        }
16.    }
17.    else
18.    {
19.        if (mac_>MAC_DBG)
20.            mac_>log("TXC", "msgFromUp, Backoff started");
21.        setTXCState(TXC_DATA_pending);
22.        mac_>bkmgr.handleBKStart(mac_>cw_);
23.    }
24.    else
25.    {
26.        if (mac_>MAC_DBG)
27.            mac_>log("TXC", "msgFromUp, Backoff pending");
28.        setTXCState(TXC_DATA_pending);
29.    }
30. }

```

Chaque fois qu'un nœud a des données à envoyer, la fonction *handleMsgFromUp(Packet \*p)* est appelé. Cette fonction fait la vérification que nous venons de mentionner, génère le MPDU et appelle la fonction de le transmettre.

Après le nœud envoyé la trame, il planifie une minuterie ACK. Si ce délai expire, il va commencer un mécanisme de back-off après laquelle renvoyer ses données et augmenter le compteur. Si ce compteur atteint une certaine valeur, ce qui signifie qu'il y avait des retransmissions consécutivement échoué, l'appareil jeté la trame. Cela se fait dans la fonction suivante:

```

1. void TXC::handleTACKtimeout() {
2.     if (txc_state==TXC_wait_ACK) {
3.         mac_>log("TXC", "ACK timeout");
4.         hdr_mac802_11* mh = HDR_MAC802_11(pDATA);
5.         struct hdr_cmn *ch = HDR_CMN(pDATA);
6.
7.         unsigned int limit = mac_>macmib_.getLongRetryLimit();
8.         unsigned int * counter = &longretrycounter;
9.
10.        (*counter)++;
11.        mac_>inc_cw();
12.
13.        if (*counter >= limit)
14.        {
15.            if (mac_>MAC_DBG)
16.                mac_>log("TXC", "ACK timeout, limit reached");
17.
18.            struct hdr_cmn *ch = HDR_CMN(pDATA);
19.            if (ch->xmit_failure_)
20.            {
21.                ch->xmit_reason_ = XMIT_REASON_RTS;
22.                ch->xmit_failure_(pDATA->copy(), ch->xmit_failure_data_);
23.            }
24.            mac_>discard(pDATA, DROP_MAC_RETRY_COUNT_EXCEEDED);
25.            pDATA = 0;
26.
27.            longretrycounter = 0;
28.            mac_>cw_ = mac_>macmib_.getCWMin();
29.            mac_>bkmgr.handleBKStart(mac_>cw_);
30.            checkQueue();
31.        }
32.        else
33.        {
34.            if (mac_>MAC_DBG)
35.                mac_>log("TXC", "ACK timeout, retry");
36.            setTXCState(TXC_DATA_pending);
37.            mac_>bkmgr.handleBKStart(mac_>cw_);
38.        }
39.    }
40. }

```

Quand un nœud reçoit une trame de données, la fonction *handleMsgFromBelow(Packet \* p, double quality\_)* est appelée, dans lequel il vérifie le type de paquet reçu. Si elle est une trame de données, il vérifie la qualité à la réception. Si elle est inférieure à 6 et la distance entre les deux nœuds est supérieure à 600 m, un relais est nécessaire. Si la valeur est supérieure, il appelle *recvDATA(Packet \* p)* pour traiter les informations reçues. Dans cette fonction, le nœud vérifie si le paquet est un double d'un précédent et si elle est un double le nœud chute la trame. Sinon, le paquet est bien reçu et une trame ACK est générée et envoyée pour annoncer la source que l'information a été bien décodée.

```

1. void Mac802_11Ext::recvDATA(Packet *p) {
2.     struct hdr_mac802_11 *dh = HDR_MAC802_11(p);
3.     u_int32_t dst, src, size;
4.
5.     struct hdr_cmh *ch = HDR_CMH(p);
6.     dst = ETHER_ADDR(dh->dh_ra);
7.     src = ETHER_ADDR(dh->dh_ta);
8.     size = ch->size();
9.     ch->size() -= phymib_.getHdrLen11();
10.    ch->num_forwards() += 1;
11.
12.    if (dst != MAC_BROADCAST)
13.    {
14.        if (src < (u_int32_t) cache_node_count_)
15.        {
16.            Host *h = &cache_[src];
17.
18.            if (h->seqno && h->seqno == dh->dh_scontrol)
19.            {
20.                if (MAC_DBG)
21.                    log("DUPLICATE", "");
22.                discard(p, DROP_MAC_DUPLICATE);
23.                return;
24.            }
25.            h->seqno = dh->dh_scontrol;
26.        }
27.    }
28.    if (MAC_DBG)
29.        log("SEND_UP", "");
30.    uptarget_->recv(p, (Handler*) 0);
31. }

```

### IV.3.3 Implémentation de la transmission coopérative

La première partie lorsque les contrôles de source pour voir si elle est occupée, prépare le MPDU et l'envoi à la destination. Cette partie est la même pour les deux types de transmissions (directe et coopérative).

La différence dans cette transmission par rapport à la transmission directe est l'élément déclencheur: la qualité de la liaison entre l'émetteur et le récepteur est trop faible pour une transmission directe. Quand un nœud reçoit une trame, la fonction *handleMsgFromBelow* (*Packet \* p, double quality\_*) est appelée et le type de trame reçue est cochée. Si elle est une trame de données et provient de la source, et non pas à partir du relais, nous vérifions la qualité du paquet reçu:

```

1. if(quality_<6)
2.     mac_->data_bad_reception_ = 1;
3. else
4.     mac_->data_bad_reception_ = 0;

```

Une fois le type de transmission est réglé, nous allons présenter ce qui se passe dans les deux cas pour voir un parallèle entre les deux. Lorsque les données ne sont pas bien reçus en raison de la mauvaise qualité de la liaison, nous appelons une fonction *getRelayAddr* () pour nous donner l'adresse du meilleur voisin. Cette fonction sera expliquée plus loin, dans la partie de «sélection de relais». Nous générons une trame RReq destiné à l'adresse que nous avons choisi dans la fonction précédente et l'envoyer. Enfin, nous écartons le paquet courant, car il ne pouvait pas être décodé correctement. Comme indiqué dans les sections précédentes, la fonction générer ne

sera pas présenté, car il ne contient pas des informations qui sont vital pour être présenté. Si la qualité est bonne, l'appareil envoie une trame ACK et elle est traitée les informations reçues.

```

1. if (mac_>data_bad_reception_== 1 && ch->ptype_ != 34)
2. {
3.   u_int32_t relai_addr_ = getRelayAddr();
4.   generateRReqFrame(relai_addr_);
5.   rxcSIFSTimer_.sched(mac_>macmib_.getSIFS());
6.   setRXCState(RXC_wait_SIFS);
7.   mac_>discard(p, "BAD RECEPTION OF DATA");
8. }
9. else
10. {
11.   if (mac_>MAC_DBG)
12.     mac_>log("RXC", "Data Rcvd From SRC");
13.   generateACKFrame(p);
14.   rxcSIFSTimer_.sched(mac_>macmib_.getSIFS());
15.   mac_>recvDATA(p);
16.   setRXCState(RXC_wait_SIFS);
17. }

```

Lorsqu'un nœud transmet une trame RReq, il sera reçu par le voisin avec la meilleure qualité de la liaison. Lorsque ce périphérique reçoit le paquet, il doit vérifier s'il a des informations que les demandes de destination. S'il les (la variable *dataListened\_* est définie sur 1 sens que les données ont été stockées précédemment), la méthode *handleRReqIndication((u\_int32\_t) ETHER\_ADDR (mh->dh\_ta))* est appelée. Sinon, il va générer une trame NACK et l'envoyer après un intervalle SIFS pour informer son voisin qu'il n'a pas les informations demandées.

Lorsque la méthode déclarée précédemment est appelée, les données mémorisées sont vérifiées et préparée pour l'envoi. Nous avons un champ *ch->dataFrom\_* pour informer la destination que c'est ça les informations demandées et non nouveaux. Lorsque les données sont prêtes, une minuterie est réglée pour un intervalle SIFS et quand cela arrive à l'expiration, l'information est envoyée:

```

1. void TXC::handleRReqIndication(u_int32_t dst_addr_)
2. {
3.   if (mac_>MAC_DBG)
4.     mac_>log("TXC", "handleRReqIndication");
5.
6.   assert(pDATAListened);
7.
8.   struct hdr_cmn *ch = HDR_CMN(pDATAListened);
9.   ch->direction() = hdr_cmn::DOWN;
10.  ch->error() = 0;
11.  ch->dataFrom_ = RELAY ;
12.
13.  relaying_ = true;
14.  txcSIFSTimer.sched(mac_>macmib_.getSIFS());
15.  setTXCState(TXC_wait_SIFS);
16. }

```

Lorsque le destinataire reçoit les données, il envoie une trame ACK à la source l'informant qu'aucune retransmission n'est nécessaire. Cette trame est également entendu par les relais, les faisant d'abandonner toutes leurs informations stockées. La fonction qui est appelée dans cette situation est *handleCoopDATATXConfirm()* et son contenu est présenté ci-dessous :

```

1. void TXC::handleCoopDATATXConfirm()
2. {
3.     if (mac_>MAC_DBG)
4.         mac_>log("TXC", "handleCoopDATATXConfirm");
5.         setTXCState(TXC_Idle);
6.         mac_>dataListened_ = 0;
7.         mac_>src_data_ = 0;
8.         mac_>dst_data_ = 0;
9.         Packet::free(pDATAListened);
10.        pDATAListened = 0;
11. }

```

Si l'appareil qui a reçu la trame RReq n'a pas les informations demandées, il doit répondre avec une trame NACK. Lorsque le destinataire reçoit cette trame, la méthode *handleNACKIndication(u\_int32\_t dst\_addr\_)* est appelée. Dans cette fonction, le nœud supprime l'entrée que le premier sélectionné pour être un relais et cherche une nouvelle adresse dans ses tables des voisins.

#### IV.3.4 Implémentation de la phase de sélection de relais

Quand une trame de données est reçue à la destination et la qualité est inférieure à la limite imposée, la transmission coopérative prend le relais. Dans la fonction *handleMsgFromBelow(Packet \* p, double quality\_)*, dans le cas de trame de données, nous avons une fonction qui est appelée *getRelayAddr ()*. Comme le nom fait remarquer, cette méthode est utilisée pour obtenir la meilleure adresse de relais à partir des tables de voisins. Pour être le meilleur voisin dans le tableau, le champ de la qualité doit contenir la plus grande valeur et aussi il doit être supérieur à la qualité originale du lien direct. Si deux ou plusieurs adresses avec la même qualité, l'une avec le timestamp la plus récente est choisie. Toutes ces étapes peuvent aussi être vues à partir les lignes suivantes:

```

1. u_int32_t RXC::getRelayAddr()
2. {
3.     u_int32_t RelayAddr = -1;
4.     double max_quality = 0;
5.     double max_timestamp = 0;
6.
7.     for(i=1;i<=count_;i++)
8.     {
9.         if(max_quality<tb[i]->qualityN && initial_received_quality<tb[i]->qualityN)
10.        {
11.            max_quality=tb[i]->qualityN;
12.            max_timestamp=tb[i]->timestampN;
13.            RelayAddr=tb[i]->addrN;
14.        }
15.        else if(max_quality==tb[i]->qualityN && max_timestamp<tb[i]->timestampN)
16.        {
17.            max_quality=tb[i]->qualityN;
18.            max_timestamp=tb[i]->timestampN;
19.            RelayAddr=tb[i]->addrN;
20.        }
21.    }
22.
23.    return (RelayAddr);
24. }

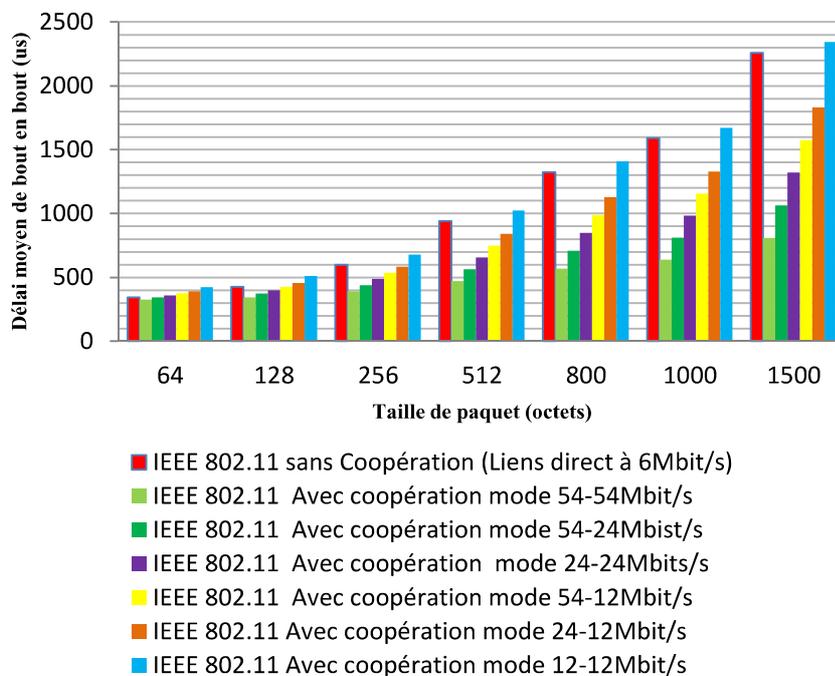
```

La phase de sélection du relais est aussi utilisée dans le *handleNACKIndication (uint32\_t dst\_addr\_)* lorsque le destinataire reçoit une trame NACK du relais utilisé précédemment. Il doit supprimer l'entrée correspondant au dispositif qui a envoyé le NACK et faire une autre recherche. Ceci est réalisé en utilisant à nouveau la phase de sélection du relais.

Nous avons atteint le point où nous avons terminé la présentation de l'implémentation de protocole CLA-MAC et nous pouvons passer aux résultats de simulation.

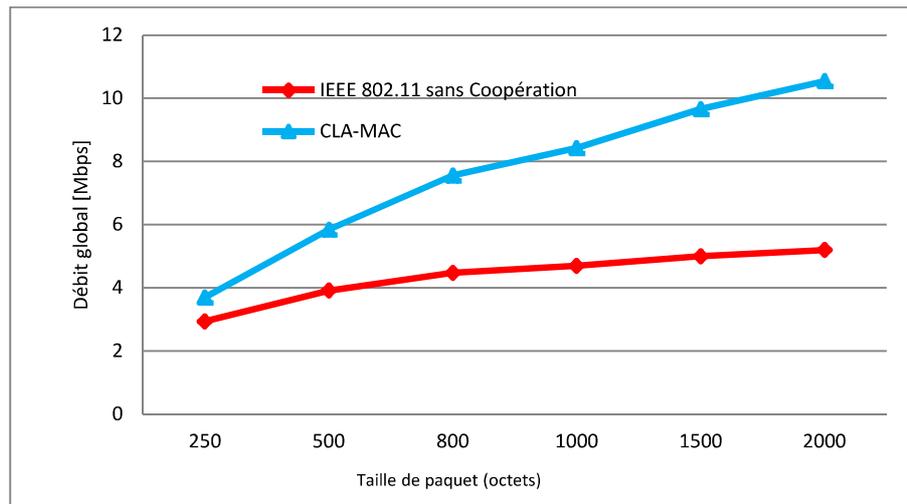
#### IV.4 Résultat de simulation

Nous avons implémenté le protocole CLA-MAC dans le simulateur NS2 sur le modèle étendu MAC 802.11Ext. Nous évaluons le débit, le délai de bout en bout et la consommation totale d'énergie de transmission coopérative, avec plusieurs modes coopératifs, par rapport au mode de transmission direct.



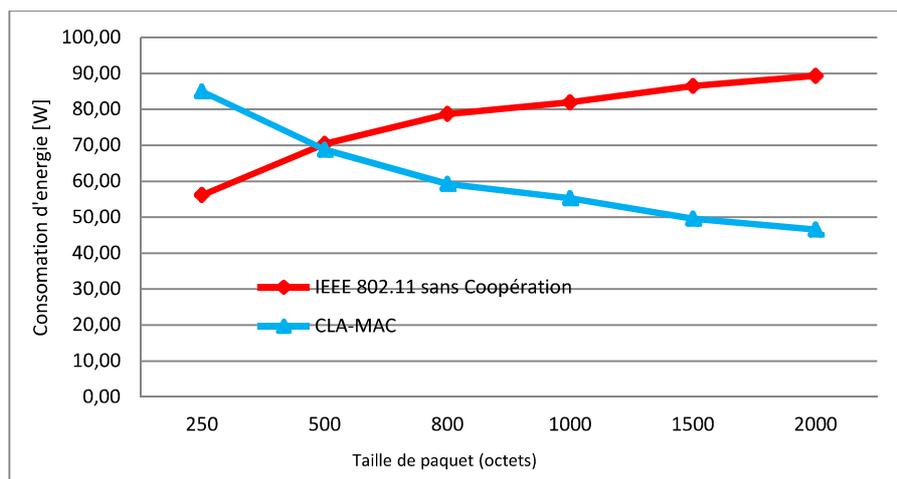
**Figure IV.1 : Le délai moyen de bout en bout en fonction de la taille de paquet**

La figure IV.1 montre la relation entre le délai moyen de bout en bout des transmissions coopératives pour plusieurs modes et la transmission directe et les différentes tailles de paquet. Le délai de bout en bout est la durée moyenne nécessaire à transmettre un paquet de données de la source à la destination. Nous observons que plus la taille de paquet augmente, plus le délai moyen pour tous les modes augmente. Cela est dû au fait qu'un paquet de grande taille nécessite plus de temps pour être transmis avec une transmission directe à 6Mbit/s qu'avec des transmissions coopératives avec des débits élevés. On remarque que seul le délai du mode 12-12Mbit/s est plus grand que celui du mode direct, car le mode 12-12Mbit/s a un gain négatif.



**Figure IV.2 : Le débit global en fonction de la taille de paquet**

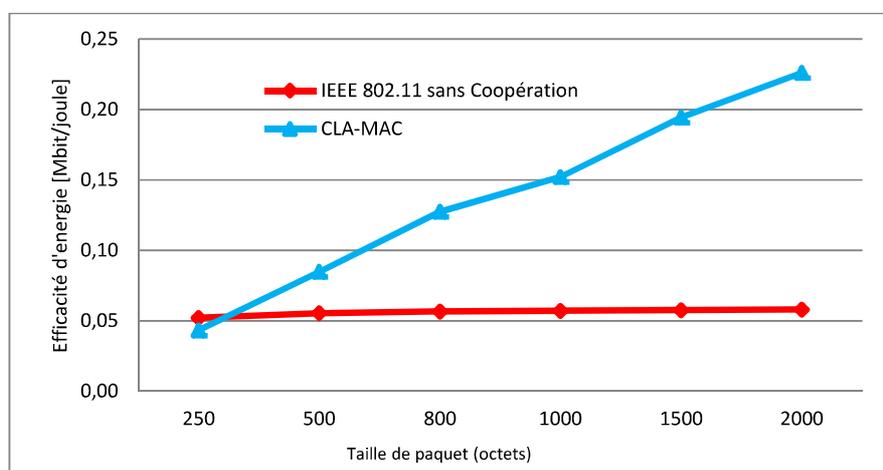
Dans la figure IV.2, nous présentons le débit global en fonction de la taille des paquets. Nous pouvons remarquer que pour les paquets de grandes tailles le protocole CLA-MAC offre un débit plus élevé que le protocole standard IEEE 802.11. Mais pour les petites tailles de paquets, le protocole CLA-MAC se comporte exactement comme le standard. Lorsque la taille de paquet dépasse un certain seuil, les avantages de la transmission avec coopération annulent l'overhead, et nous pouvons voir une amélioration dans le débit global. Cette amélioration est plus élevée lorsqu'on augmente la taille des paquets.



**Figure IV.3 : La consommation d'énergie en fonction de la taille de paquet**

La figure IV.3 montre la consommation d'énergie totale par rapport à la taille des paquets. Nous pouvons remarquer que pour de petites tailles de paquet l'overhead

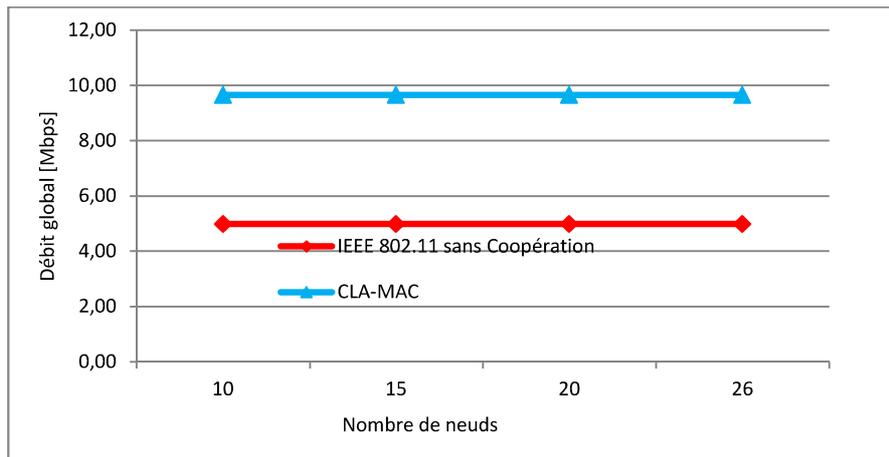
introduit par les transmissions de protocole CLA-MAC affecte la consommation d'énergie, mais pour des grandes tailles de paquets cet overhead n'est pas significatif par rapport à la taille du paquet. La consommation d'énergie est calculée pour transmettre et recevoir la même quantité de données. Cette figure montre qu'après une certaine taille de paquet, CLA-MAC consomme moins d'énergie que le mécanisme standard et la consommation diminue de manière significative lorsque la taille des paquets augmente. De plus, le protocole CLA-MAC fonctionne uniquement lorsque la transmission des données en mode direct a été échouée. Le temps d'émission et de réception des paquets de données dans le mode direct est plus grand que dans le mode coopératif, 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 le protocole CLA-MAC consomme moins d'énergie que le standard IEEE 802.11 pour transmettre la même quantité de données.



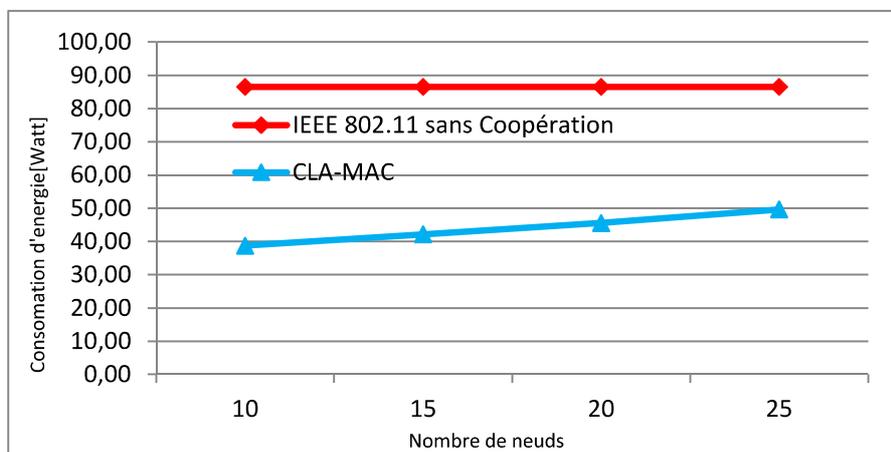
**Figure IV.4 : L'efficacité d'énergie en fonction de la taille de paquet**

La figure IV.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 CLA-MAC et la taille des paquets ; lorsque la taille des paquets augmente l'efficacité énergétique aussi. Pour l'IEEE 802.11, l'efficacité énergétique est presque constante pour les différentes tailles des paquets. L'efficacité énergétique est définie comme le rapport entre le débit global et la consommation totale d'énergie. Donc, lorsque la taille des paquets augmente, le protocole CLA-MAC améliore le débit et la consommation d'énergie. En revanche, pour de grandes tailles de paquet, l'IEEE 802.11 consomme plus d'énergie que CLA-MAC.

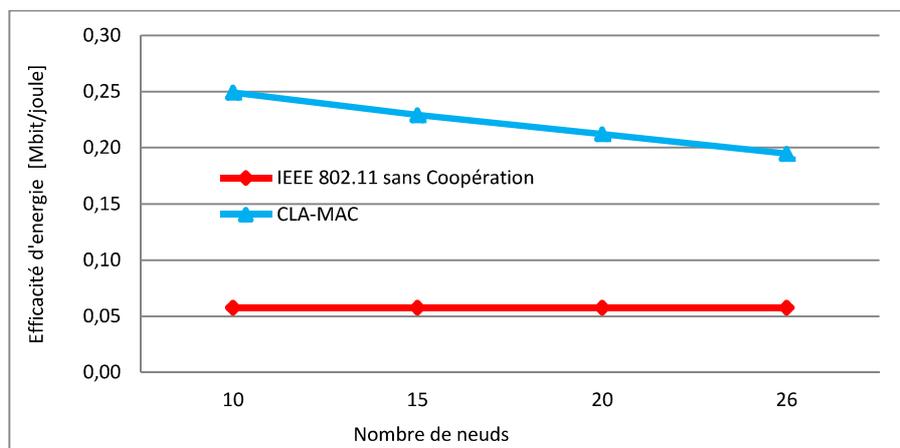
Dans cette partie nous allons étudier l'influence du nombre de nœuds sur les performances du système est représentée sur les figures IV.5, IV.6 et IV.7.



*Figure IV.5 : Le débit global en fonction de nombre de nœuds*



*Figure IV.6 : La consommation d'énergie en fonction de nombre de nœuds*



*Figure IV.7 : L'efficacité d'énergie en fonction de nombre de nœuds*

Les trois figures IV.5, IV.6 et IV.7 présentent le débit global, la consommation d'énergie et l'efficacité énergétique en fonction de nombre de nœud pour les deux protocoles CLA-MAC et IEEE 802.11. Nous remarquons que le nombre de nœuds n'a aucun impact les trois paramètres du système standard. Cela est dû au fait qu'il n'y 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 l'énergie consommée pour décoder la partie d'entête de la trame est négligé pour simplifier les calculs. En revanche, pour CLA-MAC, le débit global reste constant à mesure que le nombre de nœuds augmente mais reste supérieure au débit global de l'IEEE 802.11. Concernant l'efficacité énergétique pour CLA-MAC diminue avec l'augmentation de nombre de nœuds néanmoins elle demeure meilleure que pour la norme IEEE 802.11. Ensuite, la consommation d'énergie augmente dans CLA-MAC 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 des trames de contrôle.

#### **IV.5 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté les détails de l'implémentation de protocole CLA-MAC sous NS2.

Lorsque la coopération est effectuée, un lien direct à faible débit est remplacé par un lien haut débit à deux sauts. Nous avons montré par la simulation que le protocole CLA-MAC peut significativement améliorer la qualité du système en termes de débit, délai et efficacité énergétique dans les différentes conditions de canal.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

---

Les réseaux ad hoc sont une variété de réseaux sans fil équipés d'une topologie de transmission sans fil et dotés de protocoles permettant la mise en réseaux de ceux-ci.

Dans le but d'améliorer le débit des transmissions, de réduire le délai de transmission et la consommation d'énergie lors de la transmission de données. Le protocole coopératif de niveau MAC, CLA-MAC, utilise le meilleur voisin afin d'aider un couple de nœuds à transmettre/recevoir leurs paquets. Ce voisin est appelé relais et il est choisi en se fondant sur la qualité du canal qui le lie avec la destination. A chaque fois que la destination échoue à décoder un paquet, une procédure de sélection de relais est lancée et un relaiage est effectué. Ce protocole peut réduire les problèmes des stations à faible débit causés indirectement par les perturbations du canal radio liés à la mobilité, l'asymétrie des liens, etc. Ces problèmes provoquent souvent, la perte de paquets.

Ainsi, nous pouvons conclure que les communications coopérative, plus particulièrement le protocole CLA-MAC, peuvent apporter une solution efficace et à moindre coût aux problèmes des stations à faible débit. En effet, après avoir implémenté le protocole CLA-MAC, nous avons effectué des simulations sous ns2 afin de faire une comparaison de ce protocole de coopération avec le protocole standard IEEE 802.11. Ces simulations nous ont confirmé que la coopération permet de réduire l'énergie consommée, d'augmenter le débit global et de rendre la transmission plus fiable.

La communication coopérative toujours en cours, constitue une très bonne base pour des futurs travaux de recherche.

# ACRONYMES

---

<b>2rcMAC</b>	two-relay-based cooperative MAC
<b>ACK</b>	Acknowledgement
<b>AES</b>	Advanced Encryption Standard
<b>AF</b>	Amplifier and Forward
<b>AP</b>	Access Point
<b>ARQ</b>	Automatic Repeat Request
<b>CAC-MAC</b>	Cross-layer Adaptative Cooperative MAC
<b>CCMAC</b>	Coordinated Cooperative MAC
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access
<b>CEH-MAC</b>	Cooperative EH-Adaptive MAC
<b>CF</b>	Compress and Forward
<b>CLA-MAC</b>	Cooperative Load-Adaptive MAC
<b>CoopMACA</b>	CoopMACAggregation
<b>CRC</b>	Cyclique Redundancy Check
<b>CSI</b>	Channel State information
<b>CSMA/CA</b>	Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance
<b>CTBTMA</b>	Cooperative Tripe Busy-Tone Multiple Access
<b>CTS</b>	Clear to Send
<b>DCF</b>	Distributed Coordination Function
<b>DF</b>	Decode and Forward
<b>DSSS</b>	Direct Sequence Spread Spectrum
<b>EBSS</b>	Extended Basic Service Set
<b>FCS</b>	Frame Check Sequence
<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiple Access

<b>FHSS</b>	Frequency Hopping Spread Spectrum
<b>IAPP</b>	Inter-Access Point Protocol
<b>IBSS</b>	Independent Basic Service Set
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IFS</b>	Inter Frame Space
<b>LA-MAC</b>	Load-Adaptive MAC
<b>LLC</b>	Logical Link Control
<b>MAC</b>	Medium Access Control
<b>MIMO</b>	Multiple Input Multiple Output
<b>NACK</b>	Negative acknowledgement
<b>NAV</b>	Network Allocation Vector
<b>NS2</b>	Network Simulator 2
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>OSI</b>	Open System Interconnection.
<b>OTCL</b>	Object-oriented Tool Command Language.
<b>PCF</b>	Point Coordination Function
<b>PDA</b>	Personal Digital Assistant
<b>PLCP</b>	Physical Layer Convergence Procedure
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>RAMA</b>	Relay-Aided Medium Access
<b>RCF-MAC</b>	Relay-Contention-Free cooperative MAC
<b>rDCF</b>	relay-enabled Distributed Coordination Function
<b>REQ</b>	Request
<b>REP</b>	Reply
<b>RReq</b>	Relay request
<b>RTS</b>	Request to Send
<b>SINR</b>	Signal Noise Ratio

<b>STC</b>	Space Time Coding
<b>STiCMAC</b>	Space-Time coding for Cooperative MAC
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>TS</b>	Time Slot
<b>UCARQ</b>	Uncoordinated Cooperative AR
<b>WEP</b>	Wired Equivalent Privacy.
<b>Wifi</b>	Wireless Fidelity
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network

# BIBLIOGRAPHIES

---

- [1] 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
- [2] A. Narula, M. Trott, and G. Wornell, “Performance limits of coded diversity methods for transmitter antenna arrays,” *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 45, no. 7, pp. 2418 –2433, nov 1999.
- [3] J. Laneman, D. Tse, and G. Wornell, “Cooperative diversity in wireless networks : Efficient protocols and outage behavior,” *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 50, no. 12, pp. 3062 – 3080, dec. 2004.
- [4] G. Kramer, M. Gastpar, and P. Gupta, “Cooperative strategies and capacity theorems for relay networks,” *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 51, no. 9, pp. 3037 – 3063, sept. 2005.
- [5] M. Yu and J. Li, “Is amplify-and-forward practically better than decode-and-forward or vice versa ?” in *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2005. Proceedings. (ICASSP '05). IEEE International Conference on*, vol. 3, march 2005, pp. iii/365 – iii/368 Vol. 3.
- [6] H. Shan, H. T. Cheng, and W. Zhuang, “Cross-layer cooperative MAC protocol in distributed wireless networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 8, pp. 2603–2615, Aug. 2011.
- [7] H. Shan, W. Zhuang, and Z. Wang, “Distributed cooperative MAC for multihop wireless networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 2, pp. 126–133, Feb. 2009.
- [8] A. Bletsas, A. Khisti, D. Reed, and A. Lippman, “A simple cooperative diversity method based on network path selection,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 659–672, Mar. 2006.
- [9] P. Liu, Z. Tao, S. Narayanan, T. Korakis, and S. S. Panwar, “CoopMAC: a cooperative MAC for wireless LANs,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 25, no. 2, pp. 340–354, Feb. 2007.
- [10] J. Zhang and Q. Zhang, “Cooperative routing in multi-source multidestination multi-hop wireless networks,” in *INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE*, April 2008, pp. 2369–2377.
- [11] C.-T. Chou, J. Yang, and D. Wang, “Cooperative mac protocol with automatic relay selection in distributed wireless networks,” in *Pervasive Computing and Communications Workshops, 2007. PerCom Workshops '07. Fifth Annual IEEE International Conference on*, March 2007, pp. 526–531.

- [12] 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
- [13] 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
- [14] HE, X ; LI, F: An optimal energy efficient cooperative retransmission MAC scheme in wireless networks. In: *Wireless VITAE'11*, 2011
- [15] 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
- [16] 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
- [17] 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
- [18] 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
- [19] 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
- [20] 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
- [21] 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
- [22] 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
- [23] 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
- [24] CAO, B ; FENG, G ; LI, Y: Relay selection for cooperative MAC considering retransmission overhead. In: *IEEE GLOBECOM'11*, 2011

- [25] HU, Z ; THAM, C: CCMAC: coordinated cooperative MAC for wireless LANs. In: *Computer Networks* vol. 54 (2010), Nr. 4, pp. 618–630
- [26] 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
- [27] LIU, Y ; LIU, K ; ZENG, F: A relay-contention-free cooperative MAC protocol for wireless networks. In: *IEEE Globecom '08, 2008*
- [28] 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
- [29] 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
- [30] 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
- [31] 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
- [32] 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
- [33] SHAN, H. ; WANG, P. ; ZHUANG, W. ; Z. WANG: Cross-layer cooperative triple busy tone multiple access for wireless networks. In: *IEEE Globecom '08, 2008*
- [34] Cooperative versus Non-cooperative Communications -Gordhan Das Menghwar and Christoph F. Mecklenbrauker
- [35] Jean Tourrilhes. The wireless tools for linux. [http://www.hpl.hp.com/personal/Jean\\_Tourrilhes/Linux/Tools.html](http://www.hpl.hp.com/personal/Jean_Tourrilhes/Linux/Tools.html).
- [36] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless Sensor Networks : A Survey. *Computer Networks*, 38(4) :393–422, March 2002.
- [37] LA-MAC: A load adaptive MAC protocol for MANETs -Weihong Hu
- [38] Wireless communication and Networks -3G and beyond -ITI SAHA MISRA -detailii two ray ground
- [39] P. Anelli & E. Horlait, » NS-2: Principes de conception et d'utilisation », Version1.3