

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 LES RÉSEAUX MAILLÉS SANS FIL	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Les domaines d'application	7
1.3 Les avantages des réseaux sans fil maillés	8
1.3.1 Facilité et faible coût d'installation et de maintenance.....	8
1.3.2 Fiabilité	9
1.3.3 Passage à l'échelle	9
1.3.4 Auto-configuration et auto-organisation.....	9
1.4 Les inconvénients des réseaux sans fil maillés	10
1.4.1 Collision.....	10
1.4.2 Station cachée	11
1.4.3 Station exposée	12
1.4.4 Communication multi-sauts.....	13
1.5 Conclusion	13
CHAPITRE 2 LES RÉSEAUX RADIO COGNITIVE.....	15
2.1 Introduction.....	15
2.2 Les méthodes de détection	15
2.3 Les protocoles de collecte d'information sur les utilisateurs primaires.....	17
2.3.1 Architecture centralisée	17
2.3.2 Architecture distribuée.....	18
2.4 Le premier standard pour les réseaux radio cognitive 802.22	20
2.4.1 L'architecture des réseaux sans fil 802.22	20
2.4.2 La couche physique.....	22
2.5 Conclusion	24
CHAPITRE 3 LA COUCHE MAC DES RÉSEAUX RADIO COGNITIVE	27
3.1 Introduction.....	27
3.2 Protocole MAC basé sur l'évitement des collisions	31
3.2.1 Statistical Channel Allocation MAC	31
3.2.2 Hardware Constrained Multi-Channel Cognitive MAC	33
3.3 Protocole MAC basé sur la division des canaux en intervalles de temps.....	35
3.4 Protocole MAC hybride.....	37
3.5 Exemple de qualité de service au niveau de la couche MAC	38
3.6 Conclusion	41
CHAPITRE 4 ORDONNANCEMENT DÉCENTRALISÉ	43
4.1 Problématique	43
4.2 Modèle mathématique du problème d'ordonnancement.....	44

4.3	Ordonnancement décentralisée basée sur la coloration des sommets à deux sauts	46
4.3.1	Phase 1 – Phase d’ordonnancement des liens	48
4.3.2	Phase 2 – Établissement de la taille de la sous-trame de données	49
4.4	Exemple d’exécution de la solution d’ordonnancement	51
4.4.1	Première phase de l’ordonnancement	53
4.4.2	Deuxième phase de l’ordonnancement	55
4.5	Conclusion	56
CHAPITRE 5 SIMULATION ET ANALYSE DES RESULTATS		57
5.1	Introduction	57
5.2	Variation de la dimension du réseau	57
5.2.1	Durée d’exécution de l’ordonnancement	58
5.2.2	Efficacité dans l’ordonnancement des paquets	61
5.2.3	Coloration des nœuds du réseau	64
5.2.4	Débit utile	67
5.3	Variation du nombre de nœuds dans le réseau	69
5.3.1	Durée d’exécution de l’ordonnancement	69
5.3.2	Efficacité dans l’ordonnancement des paquets	72
5.3.3	Coloration des nœuds du réseau	74
5.3.4	Débit utile	76
5.4	Variation du nombre de canaux dans le réseau	78
5.4.1	Durée d’exécution de l’ordonnancement	78
5.4.2	Efficacité dans l’ordonnancement des paquets	79
5.4.3	Coloration des nœuds du réseau	81
5.4.4	Débit utile	81
5.5	Conclusion	84
CONCLUSION		87
ANNEXE I ARTICLE PUBLIÉ		89
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		99

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Réseau maillé sans fil.....	6
Figure 1.2	Collision dans un réseau sans fil.....	10
Figure 1.3	Station cachée dans un réseau sans fil	11
Figure 1.4	Stations exposées dans un réseau sans fil	12
Figure 1.5	Communication multi-sauts	13
Figure 2.1	Phase du protocole de collecte d'informations centralisé.....	18
Figure 2.2	Architecture du réseau pour le protocole de collecte d'informations distribué.....	19
Figure 2.3	Phases du protocole de collecte d'informations distribué.....	19
Figure 2.4	Architecture d'un réseau 802.22	21
Figure 2.5	Agrégation de canal dans un réseau 802.22.....	22
Figure 2.6	Les périodes de détection dans un réseau 802.22	23
Figure 3.1	Cycle cognitif.....	28
Figure 3.2	Exemple d'exécution de SCA-MAC	32
Figure 3.3	Les différentes phases du protocole HC-MAC	34
Figure 3.4	Structure générale d'une super trame 802.22	35
Figure 3.5	Structure d'une trame MAC 802.22.....	36
Figure 3.6	Procédure Invited Reservation Procedure.....	40
Figure 4.1	Structure d'une trame pour l'ordonnancement décentralisé	47
Figure 4.2	Couleurs des intervalles de temps dans la première phase de l'ordonnancement	48
Figure 4.3	Couleurs des intervalles de temps dans la deuxième phase de l'ordonnancement	49

Figure 4.4	Réseau sans fil maillé pour l'exemple	52
Figure 4.5	Première phase de l'ordonnancement pour l'exemple.....	53
Figure 4.6	Sous-trame de données pour l'exemple	54
Figure 4.7	Deuxième phase de l'ordonnancement pour l'exemple.....	55
Figure 5.1	La durée nécessaire pour ordonnancer les liens et établir la taille de la sous-trame de données pour les deux approches dans un réseau en grille	59
Figure 5.2	La durée nécessaire pour ordonnancer les liens et établir la taille de la sous-trame de données pour les deux approches dans un réseau maillé.....	60
Figure 5.3	La taille de la sous-trame de données pour les deux approches dans un réseau en grille	62
Figure 5.4	La taille de la sous-trame de données pour les deux approches dans un réseau maillé	63
Figure 5.5	Le nombre de couleurs nécessaires pour l'approche de coloration dans un réseau en grille.....	65
Figure 5.6	Le nombre de couleurs nécessaires pour l'approche de coloration dans un réseau maillé.....	66
Figure 5.7	Le débit utile moyen pour les deux approches dans un réseau en grille	67
Figure 5.8	Le débit utile moyen pour les deux approches dans un réseau maillé	68
Figure 5.9	La durée nécessaire pour ordonnancer les liens et établir la taille de la sous-trame de données pour les deux approches dans un réseau en grille	70
Figure 5.10	La durée nécessaire pour ordonnancer les liens et établir la taille de la sous-trame de données pour les deux approches dans un réseau maillé.....	71
Figure 5.11	La taille de la sous-trame de données pour les deux approches dans un réseau en grille	72
Figure 5.12	La taille de la sous-trame de données pour les deux approches dans un réseau maillé	73

Figure 5.13	Le nombre de couleurs nécessaires pour l'approche de coloration dans un réseau en grille.....	74
Figure 5.14	Le nombre de couleurs nécessaires pour l'approche de coloration dans un réseau maillé.....	75
Figure 5.15	Le débit utile moyen pour les deux approches dans un réseau en grille.....	76
Figure 5.16	Le débit utile moyen pour les deux approches dans un réseau maillé.....	77
Figure 5.17	La taille de la sous-trame de données pour les deux approches dans un réseau en grille.....	79
Figure 5.18	La taille de la sous-trame de données pour les deux approches dans un réseau maillé.....	80
Figure 5.19	Le débit utile moyen pour les deux approches dans un réseau en grille.....	82
Figure 5.20	Le débit utile moyen pour les deux approches dans un réseau maillé.....	83

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACK	Acknowledgement
API	Application Programming Interface
BS	Base Station
CBR	Constant Bit Rates
CDMA	Code Division Multiple Access
CR	Radio cognitive (Cognitive Radio)
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CTS	Clear To Send
CWMN	Réseau maillé sans fil radio cognitive
DSA	Dynamic Spectrum Access
FCC	Federal Communications Commission
ILP	Integer-Linear Programming
IP	Internet Protocol
MAC	Couche de contrôle d'accès au support (Medium Access Control)
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiple
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OSA	Opportunistic Spectrum Access
PHY	Couche physique
QoS	Qualité de service
RTS	Request to Send

XVIII

RTT	Round-Trip Time
UDP	User Datagram Protocol
WiFi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Network
WMN	Réseaux maillés sans fil (Wireless Mesh Network)
WRAN	Wireless Regional Area Network
WWAN	Wireless Wide Area Network
xG	neXt Generation networks

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

bps bit par seconde

dB décibel

Hz hertz

INTRODUCTION

De nos jours, les réseaux maillés sans fil (WMN) ont une popularité croissante en raison de leur architecture simple, leur facilité d'installation et leurs faibles coûts de maintenance (Akyildiz, Wang et al. 2005). En effet, les réseaux maillés sans fil permettent de couvrir une grande région géographique avec un faible coût d'installation. Ils sont utilisés dans les régions urbaines et rurales permettant de donner accès à internet à des habitants isolés pour lesquels l'accès à un réseau filaire serait extrêmement coûteux. Ils sont aussi utilisés dans le cas d'un désastre car ils peuvent être mis en place assez rapidement sans infrastructure existante et résistent aux pannes. Cependant l'utilisation des ondes radio par les WMNs les rend sensibles aux interférences de fréquences radio qui limite la capacité du réseau. En fait, l'interférence de fréquence radio limite le nombre de transmissions simultanées dans un seul canal provoquant la diminution de la capacité du réseau (Gupta et Kumar 2000).

Une approche pour améliorer la capacité du réseau est d'utiliser plusieurs canaux pour transmettre les données. La technologie radio cognitive (CR) (Mitola et Maguire 1999) est une des technologies qui permet de disposer de plusieurs canaux. CR est une technologie novatrice qui permet la communication sur les canaux sans acquérir une licence. Cette technologie a été conçue par les chercheurs afin de palier au manque de fréquences disponibles. En effet, actuellement, la majorité des fréquences ont été attribuée à des détenteurs de licence ou des services pour de grandes régions géographiques et pour une longue durée. On peut observer que certaines de ces fréquences sont sous exploitées dans le temps suivant la région géographique (de 15% à 85% avec une grande variation dans le temps (FCC 2003)). Le nombre limité de fréquences disponibles a obligé les chercheurs à concevoir une nouvelle méthode de communication qui réutilise occasionnellement le spectre de fréquences. Cette nouvelle approche s'appelle les réseaux radio cognitive (aussi nommé Dynamic Spectrum Access (DSA) ou neXt Generation networks (xG) ou encore Opportunistic Spectrum Access (OSA)). Elle consiste à exploiter le spectre de fréquences sous-utilisé sans interférer avec les utilisateurs détenteurs de licence. Elle va permettre

d'attribuer une large bande passante et d'assurer différentes qualités de services aux utilisateurs.

Le nouveau type de réseau qui utilise la technologie radio cognitive appelé réseau maillé sans fil radio cognitive (CWMN) nécessite une couche Medium Access Control (MAC) adapté à ce nouvel environnement. En effet, le Medium Access Control (MAC) a pour objectif d'ordonner la transmission des trames de données dans un environnement dynamique dans lequel les canaux disponibles varient dans l'espace et le temps. L'ordonnement dans un CWMN est plus difficile que dans un réseau multicanaux IEEE 802.11 car dans un CWMN, chaque nœud peut avoir un ensemble de canaux disponibles différents de leurs voisins tandis que dans un réseau multicanaux IEEE 802.11, tous les nœuds partagent le même ensemble de canaux disponibles. Certaines avancées ont été effectuées dans l'élaboration de la couche MAC pour les réseaux maillés radio cognitive. Cependant, la conception de cette couche MAC demeure incomplète pour permettre le bon fonctionnement des réseaux maillés radio cognitive. Dans le cadre de cette maîtrise, on améliore l'ordonnement au niveau de la couche MAC des réseaux maillés radio cognitive. On propose un algorithme d'ordonnement de paquets efficace dans une architecture distribuée dans CWMN. La solution utilise l'algorithme de coloration des sommets à deux distances, au niveau des nœuds qui augmente la vitesse de traitement de l'algorithme d'ordonnement et réduit la quantité de données de contrôle échangées. Les résultats des simulations montrent que l'algorithme proposé améliore le passage à l'échelle, augmente la vitesse d'ordonnement des liens, et réduit la quantité de données de contrôle échangées par rapport à un algorithme existant. Finalement, la solution proposée a fait l'objet d'un article de conférence qui a été publié à la septième conférence Advanced International Conference on Telecommunications (AICT) qui a eu lieu à Saint-Martin, Antilles néerlandaise du 20 au 25 mars 2011 (Msakni, Dung et al. 2011). L'article publié est dans l'ANNEXE I.

Ce mémoire est composé de cinq chapitres. Le premier chapitre présente les réseaux maillés sans fil. Il expose les domaines d'utilisation, les avantages et inconvénients des réseaux maillés sans fil. Le deuxième chapitre présente les réseaux radio cognitive. Il décrit le

fonctionnement des réseaux radio cognitive, les méthodes de détection de la présence des utilisateurs avec licence dans le spectre de fréquences et le premier standard pour les réseaux radio cognitive 802.22. Le troisième chapitre expose et analyse différentes approches de conception de la couche MAC des réseaux radio cognitive. Le quatrième chapitre présente le problème d'ordonnancement dans les réseaux radio cognitive et décrit la solution proposée d'ordonnancement décentralisé basée sur l'algorithme de coloration des sommets à deux distances. Le cinquième chapitre présente les résultats des simulations. Enfin, on conclut le mémoire en résumant les avantages de la solution proposée et en présentant des propositions d'amélioration.

CHAPITRE 1

LES RÉSEAUX MAILLÉS SANS FIL

1.1 Introduction

Présentement, les réseaux maillés sans fil (WMN) sont de plus en plus utilisés dans de nombreux domaines à cause des avantages qu'ils apportent. En effet, ils présentent une architecture simple, une facilité d'installation et des faibles coûts de maintenance (Akyildiz, Wang et al. 2005). Ils permettent aussi de couvrir une grande région géographique sans nécessité d'infrastructure existante. Dans ce chapitre, on introduit les réseaux maillés sans fil et leurs domaines d'utilisation. Ensuite, on présente les avantages et les contraintes des réseaux maillés sans fil.

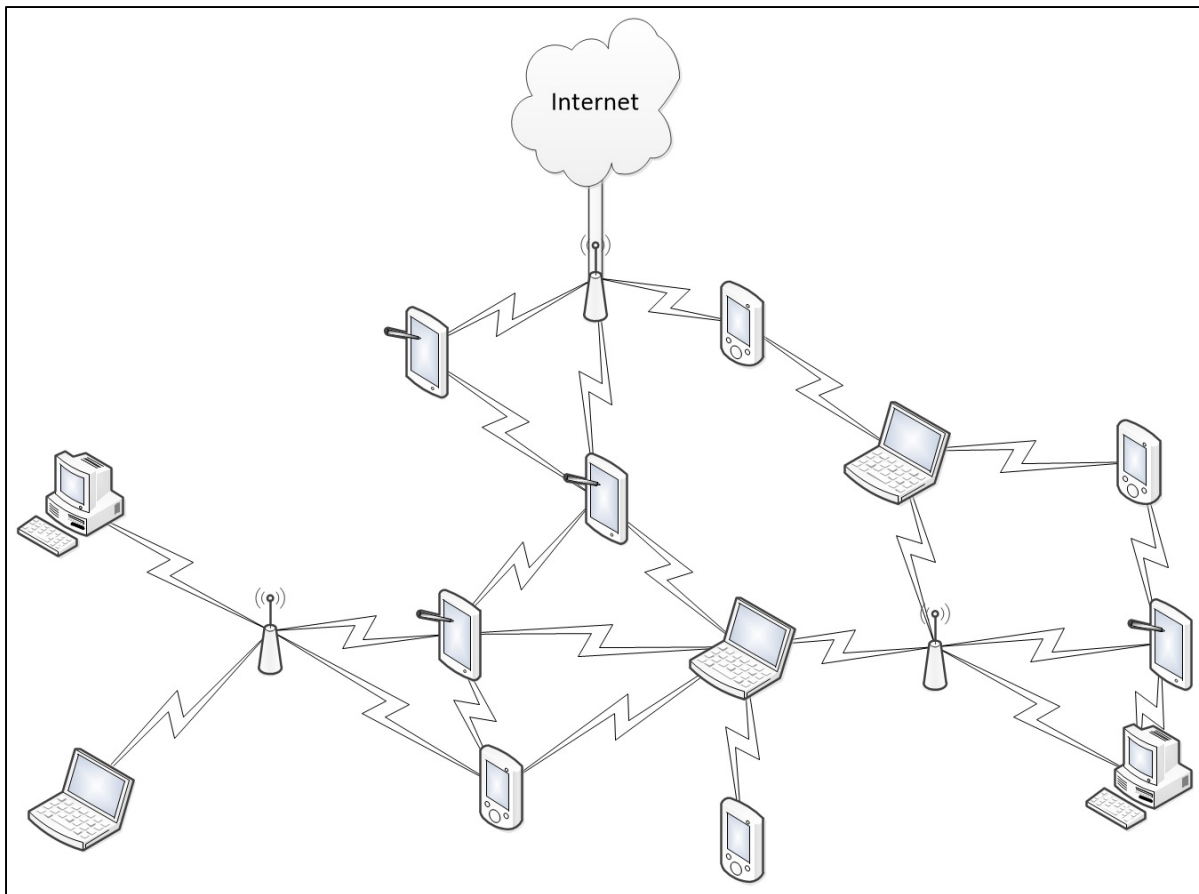


Figure 1.1 Réseau maillé sans fil

Un réseau maillé sans fil est constitué de clients sans fil maillés et de routeurs sans fil maillés comme illustré dans la Figure 1.1. Il repose sur le principe que tous les nœuds (clients et routeurs) du réseau doivent relayer les paquets de données de leurs voisins. Ainsi un paquet de données envoyé par un nœud va être relayé par plusieurs nœuds afin d'atteindre sa destination. Les clients sans fil maillés sont des équipements informatiques employés par les utilisateurs du réseau tel que les ordinateurs, les ordinateurs portables, les tablettes, les téléphones intelligents etc.... Ils peuvent être mobiles et ont la capacité d'assurer certaines fonctions de routage. Ils utilisent l'accès au réseau sans fil maillé pour permettre à différentes applications de communiquer tel que les applications de courriel, les applications de voix sur IP et de vidéoconférences, les jeux, etc.... Ils sont les principaux émetteurs ou destinataires de tous les paquets de données dans le réseau. Les routeurs sans fil maillés assument dans le réseau les fonctions de routage de trafic. Ils sont généralement fixes et peuvent supporter de

communiquer sur plusieurs canaux et avoir plusieurs interfaces sans fil. Dans les réseaux sans fil maillés, il existe aussi des passerelles qui permettent de connecter le réseau sans fil maillé au réseau filaire. Ils jouent aussi le rôle de routeur sans fil maillé dans le réseau.

1.2 Les domaines d'application

Historiquement, les réseaux sans fil maillés ont été conçus pour satisfaire des besoins dans le domaine militaire. Ils permettent de connecter et de coordonner différents équipements et systèmes militaires sur le champ de bataille grâce un réseau fiable et étendu. Ils sont aussi utilisés pour connecter des équipements pour surveiller des zones géographiques. Au vu des avantages que présentent les réseaux sans fil maillés, leur utilisation a été étendue à d'autres domaines d'application.

Les réseaux sans fil maillés ont prouvé leur utilité dans les opérations de sauvetage lors de sinistre. En effet, lors d'un sinistre comme un séisme, une éruption volcanique ou un tsunami, toutes les infrastructures de communication existantes peuvent être totalement détruites. La rapidité d'établissement d'un moyen de communication est un enjeu capital dans les opérations de sauvetage car il permet d'augmenter le nombre de personnes secourues. Un réseau sans fil maillé permet d'établir rapidement un moyen de communication fiable entre les secouristes et de coordonner les opérations de sauvetage.

L'utilisation des réseaux sans fil maillés devient de plus en plus populaire dans les maisons. Ils permettent d'interconnecter et de coordonner différents équipements pour fournir des services aux habitants de la maison. Les équipements permettent d'ajuster l'éclairage, de contrôler l'ouverture des fenêtres et des rideaux, de surveiller l'état de santé des personnes âgées et de contrôler à distance la maison grâce à un cellulaire ou un ordinateur connecté à internet. Ils peuvent assurer la sécurité de la maison en contrôlant le système de détection d'incendie et le système de détection d'intrusion. Les réseaux sans fil maillés permettent d'interconnecter simplement ces équipements sans installation de câblage.

Les réseaux sans fil maillés apportent une solution pour fournir des services de télécommunication aux habitants des régions rurales. Les zones rurales sont faiblement desservies par les services de télécommunication car elles sont non rentables en raison de la nature de ces régions souvent inaccessibles, dépourvues d'infrastructures, avec une faible densité de population et des ménages à faible revenu. Les réseaux sans fil maillés permettent aux opérateurs de télécommunication de fournir des services fiables et rentables pour des grandes zones géographiques.

1.3 Les avantages des réseaux sans fil maillés

Les réseaux sans fil maillés présentent des avantages par rapport à d'autres types de réseaux. Ils offrent une meilleure fiabilité, un meilleur passage à l'échelle, la capacité de s'auto-configurer et s'auto-organiser, et plus particulièrement une facilité et un faible coût d'installation et de maintenance.

1.3.1 Facilité et faible coût d'installation et de maintenance

La capacité des réseaux sans fil à fournir des services dans un environnement sans fil multi-sauts étendu, permet de réduire les coûts d'installation et de maintenance. En effet, les routeurs sans fil maillés, contrairement aux routeurs sans fil réguliers, ne nécessitent pas de connexions filaires qui sont coûteuses en installation et en maintenance pour desservir les clients. De plus, les nœuds du réseau ont la capacité de relayer les données envoyées par leurs voisins. Cette capacité permet d'étendre largement la zone couverte par le réseau sans fil maillé sans la nécessité d'installer de nouveaux routeurs ou connexions filaires. Ces caractéristiques du réseau sans fil maillé permettent de rendre plus facile son installation et réduire les coûts d'installation et de maintenance.

1.3.2 Fiabilité

Dans un réseau sans fil maillé, tous les nœuds du réseau relayent les données de leurs voisins. Cette caractéristique permet d'avoir plusieurs chemins reliant deux nœuds du réseau. Ainsi lors d'une panne d'un nœud du réseau, un autre chemin peut être trouvé pour acheminer les données entre deux nœuds du réseau. En outre, l'existence de plusieurs chemins entre deux nœuds du réseau permet de répartir le trafic de données sur les différents chemins et ainsi réduire les goulots d'étranglement dans le réseau.

1.3.3 Passage à l'échelle

L'existence de plusieurs chemins entre deux nœuds du réseau permet de mieux supporter le passage à l'échelle dans un réseau sans fil maillé par rapport un réseau sans fil régulier. En effet, l'augmentation du nombre de nœuds dans le réseau va créer de nouveaux chemins qui vont permettre de répartir le trafic et de trouver un chemin alternatif en cas de goulot d'étranglement. Dans un réseau sans fil régulier, l'augmentation du nombre de nœuds va créer un goulot d'étranglement au niveau du routeur qui ne pourra pas répondre aux besoins de tous les nœuds.

1.3.4 Auto-configuration et auto-organisation

Dans les réseaux sans fil maillés, les nœuds et les routeurs établissent et maintiennent automatiquement la connectivité sans intervention humaine. Un nœud en se joignant au réseau va automatiquement faire les opérations nécessaires pour détecter les voisins et découvrir le chemin optimal vers l'internet. Cette adhésion au réseau s'effectue sans perturber le fonctionnement du réseau. Les routeurs, en prenant connaissance de l'ajout d'un nouveau nœud dans le réseau, mettent à jour les tables de routages et les chemins. Ainsi un réseau sans fil maillé s'auto-configure et s'auto-organise pour rendre son expansion facile.

1.4 Les inconvénients des réseaux sans fil maillés

Dans les réseaux sans fil maillés, la transmission sans fil a permis d'acquérir plusieurs avantages mais elle présente certains inconvénients qu'on va décrire dans la section suivante.

1.4.1 Collision

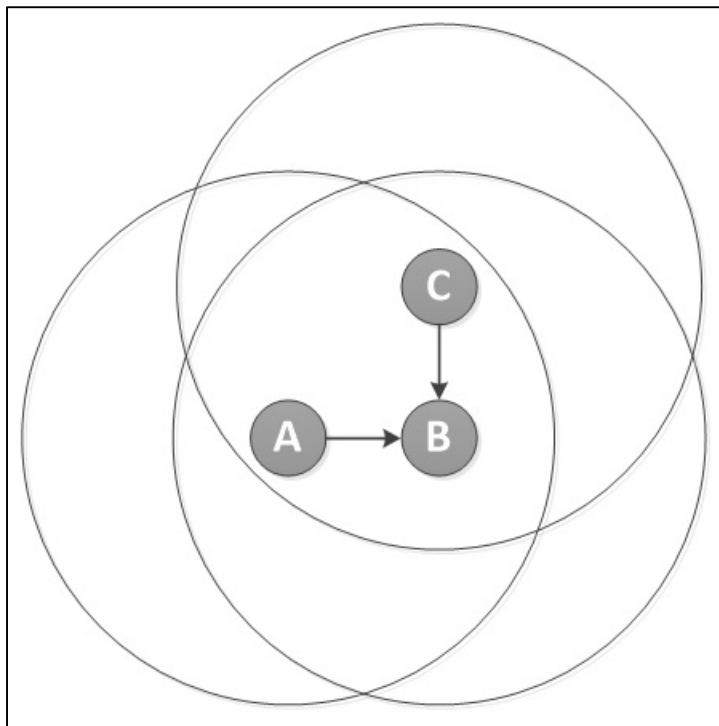


Figure 1.2 Collision dans un réseau sans fil

Dans un réseau sans fil, les transmissions simultanées peuvent causer des collisions. La Figure 1.2 illustre trois nœuds A, B et C qui sont à portée de communication. Les nœuds A et C transmettent simultanément un paquet de données au nœud B et causent une collision. Plusieurs approches comme CSMA/CD et CSMA/CA ont été élaborées pour réduire les collisions dans le réseau sans fil. Elles se basent sur l'analyse du canal de transmission par les nœuds avant la transmission. Une autre approche qui est désignée comme TDMA consiste à diviser le temps en intervalles pour partager le canal de transmission. Ainsi chaque

intervalle de temps est assigné à un seul nœud de manière à éviter des collisions avec les autres transmissions déjà planifiées dans le voisinage.

1.4.2 Station cachée

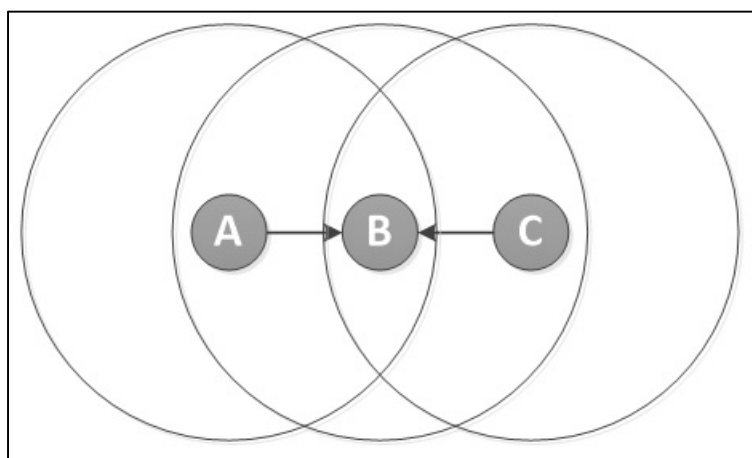


Figure 1.3 Station cachée dans un réseau sans fil

Le problème de la station cachée est un problème récurrent dans les réseaux sans fil. La Figure 1.3 illustre trois nœuds A, B et C. Le nœud A et le nœud B sont à portée de communication et le nœud B et le nœud C sont à portée de communication. Les nœuds A et C ont analysé le support de transmission et n'ont détecté aucun signal. Ils transmettent simultanément un paquet de données et provoquent une collision. Il est impossible pour le nœud A de détecter le signal transmis par le nœud C car il est hors de portée de communication du nœud C (réciproquement pour le nœud C). Une solution désignée comme RTS/CTS a été conçue pour résoudre ce problème. Elle consiste pour le nœud A à envoyer un paquet RTS (Ready To Send) pour informer le nœud B de son intention d'envoyer un paquet. S'il n'y a pas de transmission en cours dans son voisinage et s'il n'attend pas la transmission d'un paquet de données, le nœud B répond par un paquet CTS (Clear To Send) au nœud A afin que le nœud A commence la transmission des données.

1.4.3 Station exposée

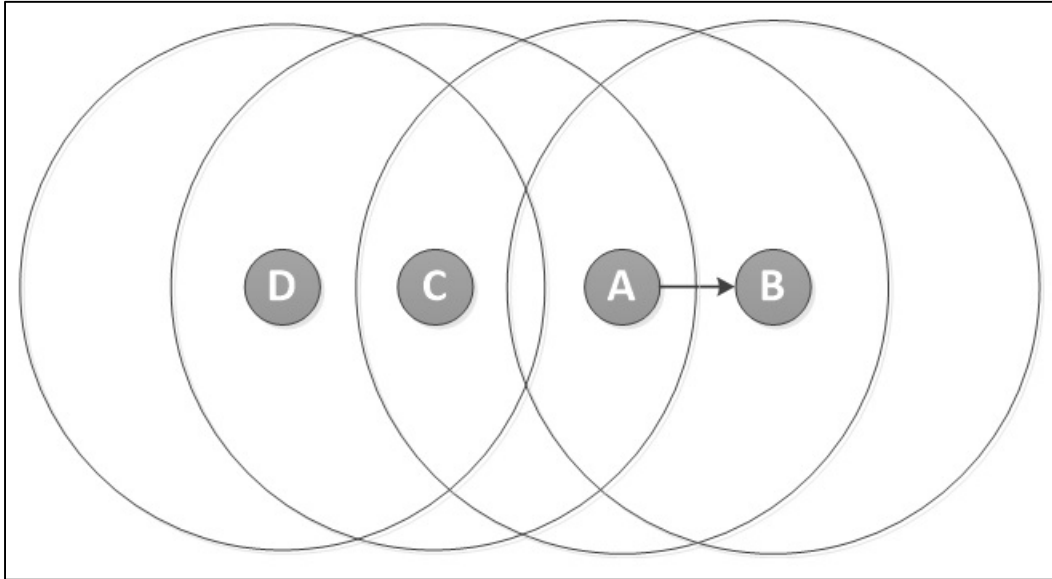


Figure 1.4 Stations exposées dans un réseau sans fil

Dans un réseau sans fil, un nœud doit attendre la fin des transmissions en cours avant de transmettre ses données afin d'éviter les collisions. La Figure 1.4 illustre quatre nœuds A, B, C et D. Le nœud A et le nœud B sont à portée de communication, le nœud A et le nœud C sont à portée de communication et le nœud C et le nœud D sont à portée de communication. Le nœud C doit attendre la fin de la transmission du nœud A car il a détecté le signal après avoir analysé le support de transmission. Le nœud C ne peut pas déterminer si sa transmission ne va pas causer une collision car il ne connaît pas la position du destinataire de la transmission en cours. Le nœud C pourrait transmettre vers le nœud D sans causer de collision puisque le nœud B est en dehors de la portée de communication du nœud C. Le nœud C est une station exposée.

1.4.4 Communication multi-sauts

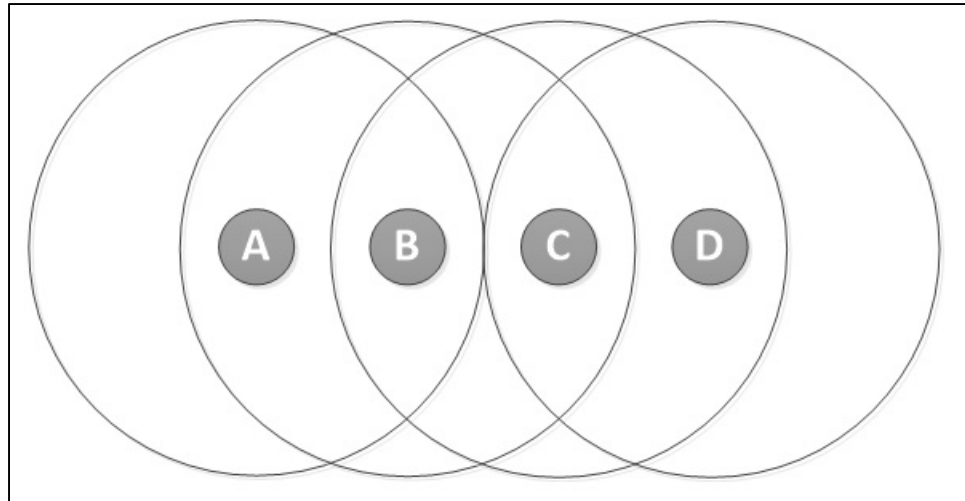


Figure 1.5 Communication multi-sauts

Dans un réseau maillé sans fil, les paquets sont relayés par différents nœuds pour atteindre leurs destinations. La Figure 1.5 illustre quatre nœuds A, B, C et D. Le nœud A doit envoyer un paquet au nœud D. La disposition des nœuds dans le réseau oblige le paquet à être relayé par le nœud B et C. La retransmission du paquet par les nœuds B et C engendrent un délai supplémentaire et une baisse de débit. Le débit entre deux nœuds voulant communiquer va dépendre du nombre de nœuds qui relayent les paquets. La dégradation du débit est en relation avec le nombre de sauts séparant les deux nœuds. Lorsque le nombre de sauts est compris entre 1 et 5, le débit se dégrade de $1/(\text{nombre de sauts})$. Lorsque le nombre de sauts dépasse 5 sauts, le débit reste constant et faible (un rapport de 1/5).

1.5 Conclusion

Les réseaux maillés sans fil présentent une architecture simple, une facilité d'installation, et des faibles coûts de maintenance. Dans les réseaux maillés sans fil, l'existence de plusieurs chemins entre deux nœuds du réseau permet de mieux supporter le passage à l'échelle et

assurer une meilleure fiabilité. Les réseaux maillés sans fil ont aussi la capacité de s'auto-configurer et de s'auto-organiser. Ils sont utilisés dans les opérations militaires, les opérations de sauvetage, les maisons et les zones rurales.

CHAPITRE 2

LES RÉSEAUX RADIO COGNITIVE

2.1 Introduction

De nos jours, l'explosion du nombre de technologies et d'applications sans fil a conduit à une augmentation de demandes de fréquence. Cependant, la majorité des fréquences ont été attribuées à des détenteurs de licence ou des services pour de grandes régions géographiques et pour une longue durée. Des études ont été menées afin de trouver une solution à ce manque de fréquence et ont déterminé que certaines de ces fréquences sont sous-exploitées dans le temps suivant la région géographique (FCC 2003). Pour combler au manque de fréquence, les chercheurs ont conçu la technologie radio cognitive. Elle consiste à exploiter le spectre de fréquences sous utilisé sans interférer avec les utilisateurs détenteurs de licence. Dans ce chapitre, on décrit les méthodes de détection des utilisateurs détenteurs de licence. On présente aussi le premier standard 802.22 utilisant la technologie radio cognitive pour des grandes zones géographiques.

2.2 Les méthodes de détection

Le réseau radio cognitive consiste à réutiliser occasionnellement le spectre de fréquences sans causer d'interférences aux utilisateurs détenteurs de licence (aussi appelés utilisateurs primaires). Il va permettre d'attribuer une large bande passante et d'assurer différentes qualités de services aux utilisateurs. La première tâche fondamentale des réseaux radio cognitive est de déceler la présence des utilisateurs détenteurs de licence dans le spectre de fréquences afin d'identifier les portions de spectre de fréquences non utilisées et de permettre aux utilisateurs des réseaux radio cognitive (aussi appelés utilisateurs secondaires) de libérer les fréquences utilisées par les utilisateurs primaires. Plusieurs méthodes ont été perfectionnées pour faciliter la détection des utilisateurs primaires. On va, à présent, décrire ces méthodes d'analyse du spectre de fréquences.

Les différentes méthodes qui ont été élaborées pour atteindre cet objectif peuvent être classées dans les catégories suivantes :

- Matched filter detection : elle consiste à avoir une connaissance préalable du signal émis par l'utilisateur primaire afin de détecter sa présence. Les informations requises pour cette détection sont le type et l'ordre de la modulation du signal, la forme des impulsions et le format des paquets;
- Energy detection : elle consiste à déceler la présence d'un signal et, suivant la puissance de ce signal, de déterminer avec une certaine probabilité la présence d'utilisateur primaire. La méthode peut être à l'origine de fausse détection qui peut causer des interférences aux utilisateurs primaires;
- Cyclostationary feature detection : elle se base sur la corrélation spectrale. En effet, le signal émis par l'utilisateur avec licence est caractérisé par une onde sinusoïdale, un train d'impulsions, une séquence de sauts de fréquences et des préfixes cycliques. Ces caractéristiques représentent une périodicité dans le signal. Elle est plus efficace que la méthode energy detection mais elle nécessite une longue période d'observation.

Dans (Cabric, Mishra et al. 2004), la méthode Energy detection a montré ses limites en présence d'un niveau élevé d'interférences. En effet, le signal émis préserve sa corrélation spectrale mais ne peut plus être détecté avec la méthode Energy detection car il y a des interférences. Donc il est préférable d'utiliser la méthode Cyclostationary feature detection quand on n'a aucune information sur les utilisateurs primaires.

Avec ces méthodes de détection, un utilisateur du réseau radio cognitive (qui est aussi appelé utilisateur secondaire) ne pourra pas éviter de causer des interférences par manque d'information sur l'utilisateur avec licence. En effet, l'utilisateur secondaire peut ne pas détecter la présence de l'utilisateur primaire à cause d'un obstacle se situant entre les deux (cas de la station cachée) et ainsi générer des interférences au niveau du récepteur. En outre, une seule machine ne peut pas analyser constamment l'ensemble du spectre de fréquences afin d'y déceler les portions de spectre non utilisées car cette opération est très longue.

Ainsi pour permettre une détection plus rapide des portions de spectre non utilisées les utilisateurs du réseau radio cognitive vont s'échanger des informations concernant l'état du spectre de fréquences. Cette méthode s'appelle la détection coopérative qui permet une réduction du temps de détection et des interférences (Yu, Wen-dong et al. 2007). Ces échanges d'informations peuvent être centralisés ou distribués. Dans l'approche centralisée, la station de base du réseau radio cognitive se charge de collecter les informations à partir des utilisateurs secondaires et d'établir les portions de spectre de fréquence non utilisées. Dans l'approche distribuée, les utilisateurs secondaires s'échangent directement entre eux les informations.

2.3 Les protocoles de collecte d'information sur les utilisateurs primaires

A présent, on va présenter une approche centralisée et une approche distribuée de collecte d'informations concernant les utilisateurs primaires.

2.3.1 Architecture centralisée

Dans (Jeon, Kim et al. 2007), un protocole a été défini pour la collecte d'informations concernant la présence des utilisateurs primaires, dans un réseau radio cognitive de manière centralisée. Dans un réseau radio cognitive, si la détection de la présence des utilisateurs primaires ne peut pas être assurée par le point d'accès alors cette fonction est assumée par les utilisateurs du réseau. Dans un premier temps, les utilisateurs secondaires analysent le spectre de fréquence afin de déceler la présence des utilisateurs primaires. Puis les utilisateurs secondaires désignés par le point d'accès transmettent leurs informations à celui-ci. Ensuite le point d'accès diffuse dans le réseau les informations concernant l'utilisation du spectre de fréquences. Dans un deuxième temps, les utilisateurs secondaires qui ont des informations concernant la présence d'utilisateur primaire non transmis par le point d'accès, envoient leurs informations au point d'accès. Puis le point d'accès diffuse à nouveau dans le réseau les informations concernant l'utilisation du spectre de fréquences. Enfin le point d'accès désigne les utilisateurs secondaires qui ont la plus faible corrélation dans les

informations transmises afin de lui faire parvenir les informations dans la prochaine phase de détection. La Figure 2.1 décrit les différentes phases du protocole.

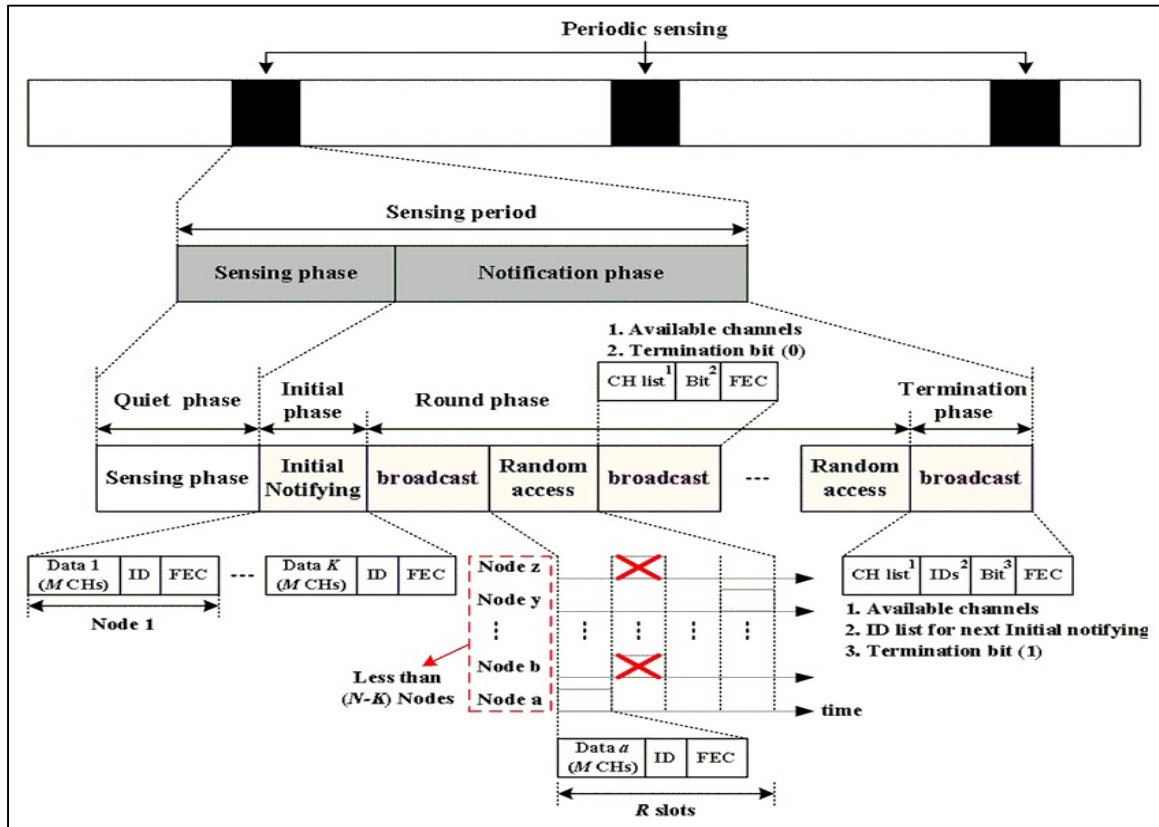


Figure 2.1 Phase du protocole de collecte d'informations centralisé
Tirée de Jeon, Kim et al. (2007)

2.3.2 Architecture distribuée

Dans (P. Pawelczak 2007), un protocole a été défini pour la collecte d'informations concernant la présence des utilisateurs primaires, dans un réseau radio cognitive de manière distribuée. Le réseau radio cognitive est divisé en plusieurs clusters dirigés par des chefs clusters comme illustré dans la Figure 2.2. Chaque chef de cluster désigne un nombre de nœud du cluster afin d'analyser le spectre de fréquence et de leur envoyer les informations. Ensuite les différents chefs de clusters s'échangent les informations concernant l'utilisation du spectre de fréquences. Enfin, les chefs des différents clusters envoient aux nœuds des

clusters les informations concernant l'utilisation du spectre de fréquences. La Figure 2.3 décrit les différentes phases du protocole.

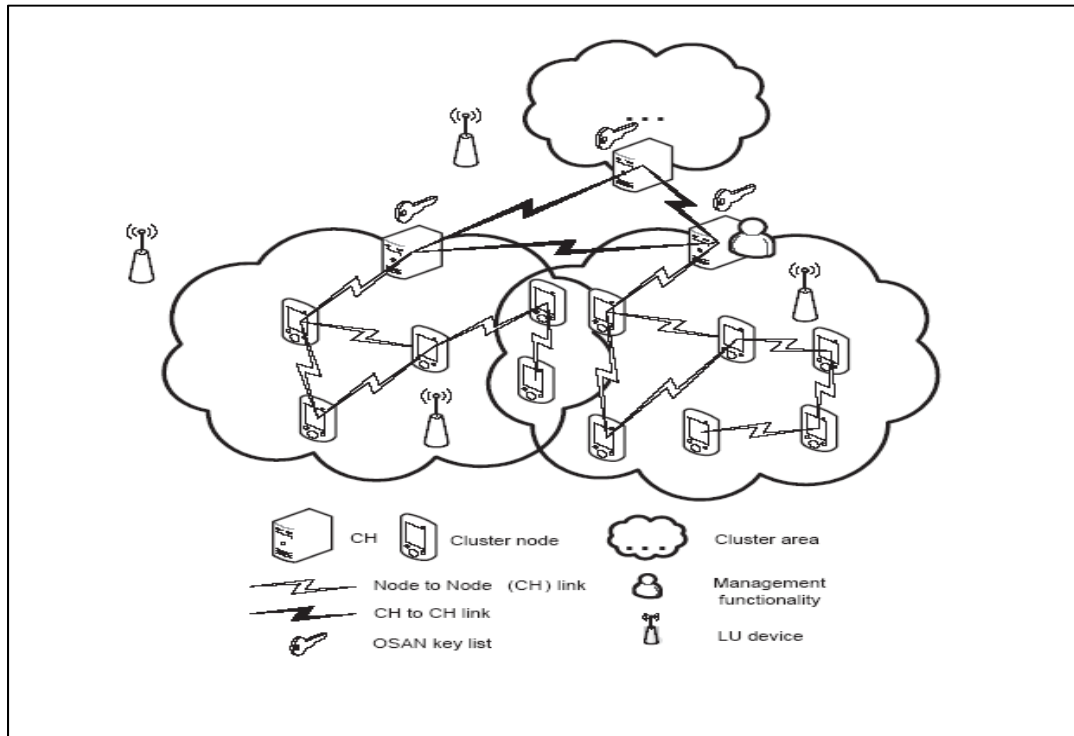


Figure 2.2 Architecture du réseau pour le protocole de collecte d'informations distribué
Tirée de P. Pawelczak (2007)

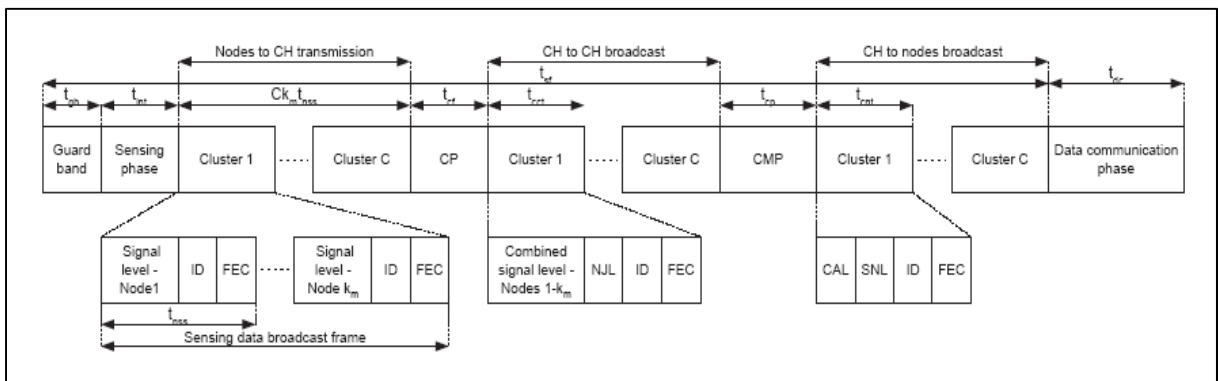


Figure 2.3 Phases du protocole de collecte d'informations distribué
Tirée de P. Pawelczak (2007)

2.4 Le premier standard pour les réseaux radio cognitive 802.22

Le groupe de travail IEEE 802.22 est chargé de concevoir les réseaux radio cognitive 802.22 dont la couche physique PHY (Physical) et la couche liaison de données MAC (Medium Access Control) pour des réseaux sans fil de dimension régionale WRAN (Wireless Regional Area Network) se basant sur la radio cognitive. Ce type de réseau doit réutiliser le spectre de fréquences actuellement alloué aux services de télévision sans causer d'interférences aux clients de ces services. En effet, ces fréquences ont des caractéristiques de propagation très favorables qui permettent aux utilisateurs lointains d'être servis et par conséquent fournissent un avantage intéressant pour les fournisseurs d'accès internet. De plus, les périphériques sans fil 802.22 ne nécessiteront pas de licence pour accéder aux fréquences déjà accordées aux services de télévision. Cet avantage permet de réduire les coûts et d'offrir un service plus abordable.

2.4.1 L'architecture des réseaux sans fil 802.22

Le projet actuel propose d'utiliser la gamme de fréquence de 54 à 862 MHz actuellement attribuée aux services de télévision en Amérique du Nord. Il est aussi envisagé d'étendre la gamme de fréquence utilisée de 41 à 910 MHz afin de s'ajuster à d'autres réglementations internationales. De plus, le standard doit s'adapter aux différentes largeurs de bande 6, 7 et 8 MHz des différents canaux internationaux de télévision.

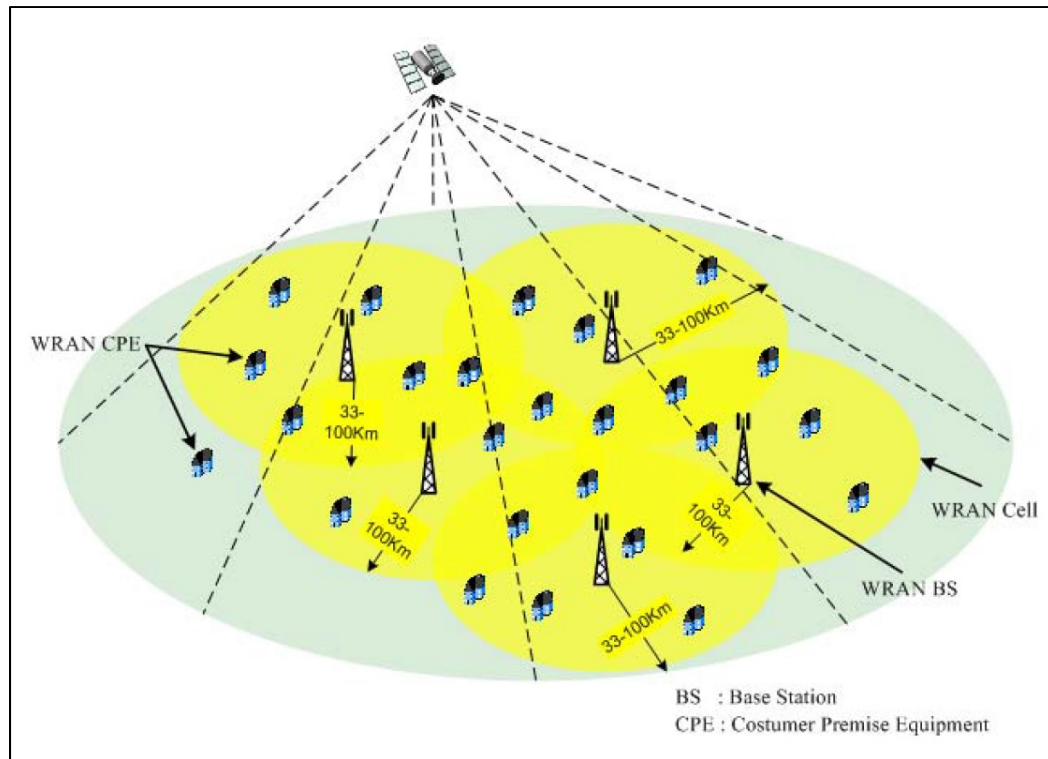


Figure 2.4 Architecture d'un réseau 802.22
Tirée de Cordeiro, Challapali et al. (2006)

La Figure 2.4 montre un exemple de déploiement d'un réseau 802.22. L'architecture du réseau 802.22 est structurée autour d'une station de base BS (base station) qui gère sa propre cellule et ses clients associés CPE (Consumer Premise Equipments). La communication entre la BS et les CPE est effectuée de point à multipoint. La BS contrôle l'accès au canal de transmission et transmet les informations dans la direction descendante vers les CPE, qui répondent au BS dans la direction ascendante. Elle est aussi chargée de la gestion de manière distribuée de la détection des utilisateurs primaires. En effet, elle doit distribuer les tâches de détection aux CPE. Ensuite, grâce aux rapports envoyés par les CPE, elle prend les décisions adéquates sur les fréquences à utiliser dans la cellule. Enfin, les CPE sont équipés d'une antenne directionnelle afin de communiquer avec la BS et d'une antenne omnidirectionnelle pour effectuer la détection.

Le standard prend en considération une efficacité spectrale de l'ordre de 0.5 bit/(sec/Hz) à 5 bit/(sec/Hz). Le débit physique doit être de 18 Mbps dans un canal de télévision de 6 MHz

pour une efficacité spectrale de 3 bit/(sec/Hz) (moyenne). Ainsi en considérant que la BS gère 12 CPE simultanément, le débit minimum par CPE est de 1,5 Mbps dans la direction descendante et de 386 kbps dans la direction ascendante. De plus, la portée des BS dans le standard 802.22 est de 100 km grâce aux caractéristiques de propagation des fréquences utilisées.

2.4.2 La couche physique

La couche physique se base sur la modulation OFDMA dans les transmissions ascendantes et descendantes afin de pouvoir diviser d'une manière flexible le canal de transmission suivant le temps et la fréquence. En outre, elle utilise l'agrégation de canal afin d'augmenter le débit de transmission.

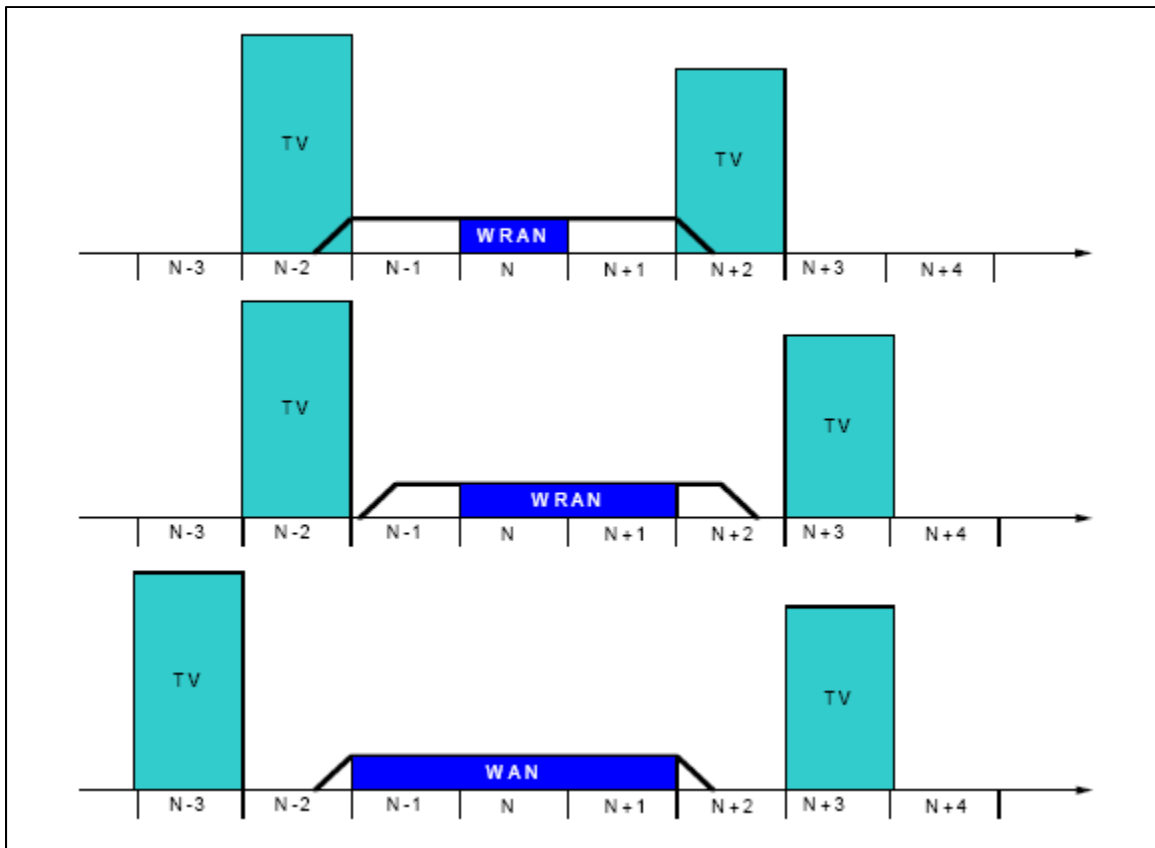


Figure 2.5 Agrégation de canal dans un réseau 802.22
Tirée de Cordeiro, Challapali et al. (2006)

La Figure 2.5 montre différents cas d'agrégation de canal. Le réseau 802.22 peut ainsi fusionner de un à trois canaux tel que représenté sur la Figure 2.5. Par ailleurs, le US grade-A TV allocation oblige de laisser libre les deux canaux adjacents afin de réduire les interférences.

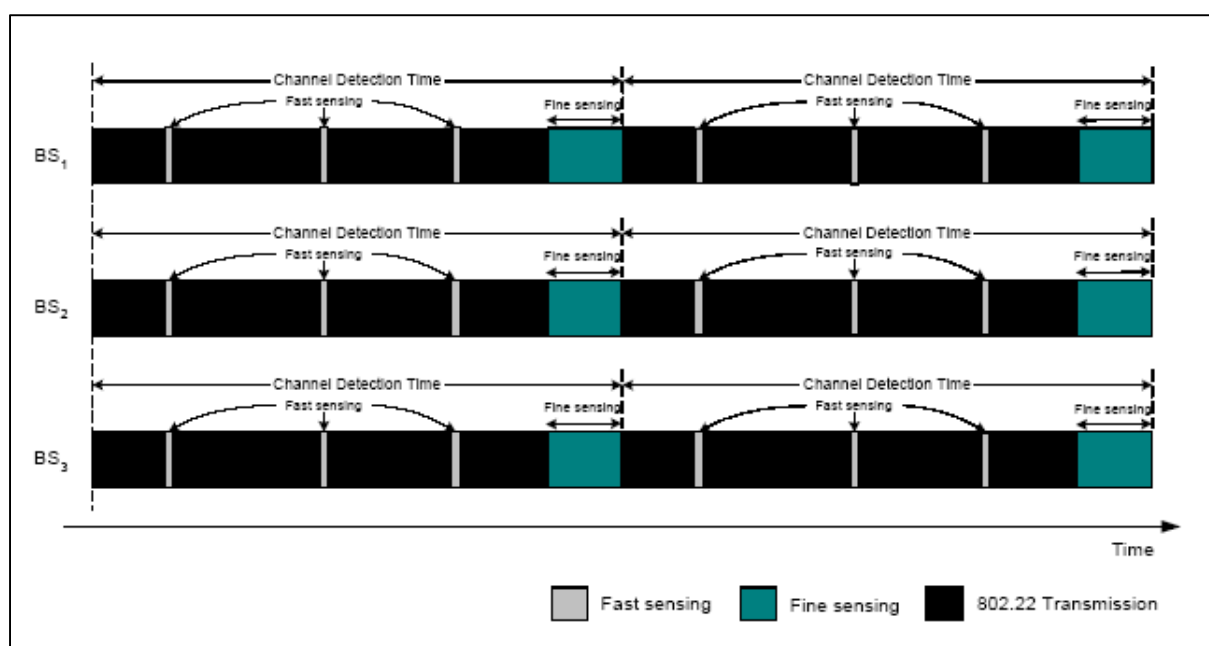


Figure 2.6 Les périodes de détection dans un réseau 802.22
Tirée de Cordeiro, Challapali et al. (2006)

La couche physique est aussi chargée de la détection des services de télévision pour ne pas leur causer d'interférences. La Figure 2.6 expose les périodes de détection dans le réseau 802.22. La BS met en place des périodes de silence dans le réseau afin que les CPE procèdent à la détection des services de télévision et ensuite envoient leurs informations. Puis, la BS établit une carte de l'utilisation spectrale dans le réseau et prend les décisions adéquates concernant les fréquences à utiliser. Pendant ces périodes de silence, tout le trafic du réseau est suspendu et les stations peuvent effectuer l'analyse du spectre plus efficacement. La station de base (BS) est responsable de contrôler et de programmer ces périodes de silence. D'autre part, deux types de détection ont été définis. Le premier est une analyse rapide de l'environnement (Fast sensing) pour détecter l'apparition de nouveaux

services de télévision. La deuxième est une analyse fine de l'environnement (Fine sensing) afin d'analyser l'ensemble des fréquences et déterminer lesquelles sont disponibles. Cette analyse fine est utilisée dans le cas où un service de télévision apparaît sur les fréquences utilisées par le réseau 802.22. Enfin, la BS maintient à jour une table dans laquelle sont classifiées les fréquences selon leurs disponibilités.

Dans la norme 802.22, un cadre complet de coexistence est fourni pour permettre aux réseaux se recouvrant d'échanger des informations afin de partager le spectre et synchroniser également leurs périodes de silence. Le protocole utilise le CBP (Coexistence Beacon Protocol), qui est basé sur la transmission des paquets CBP par les CPE et/ou les BSs. Les paquets de CBP sont transmis pendant les fenêtres de coexistence qui peuvent être ouvertes par le BS à la fin de chaque trame. Pendant ces fenêtres, les CPEs dans les secteurs de recouvrement peuvent envoyer des paquets de CBP. Ces paquets peuvent être reçus par les BSs voisins ou par les CPEs des cellules voisines, qui les font suivre à leur BSs correspondant. Les paquets de CBP diffusent l'information requise pour établir la synchronisation parmi les cellules voisines, aussi bien que l'échéancier des périodes de silence. Afin de synchroniser les BSs, les paquets de CBP contiennent des indicateurs de temps sur leurs réseaux.

2.5 Conclusion

Pour pallier au manque de fréquences, les chercheurs ont conçu la technologie radio cognitive. Elle consiste à exploiter le spectre de fréquences sous-utilisé sans interférer avec les utilisateurs détenteurs de licence.

Le réseau radio cognitive consiste à réutiliser occasionnellement le spectre de fréquences sans causer d'interférences aux utilisateurs détenteurs de licence (aussi appelés utilisateurs primaires). La première tâche des réseaux radio cognitive est de détecter la présence des utilisateurs détenteurs de licence dans le spectre de fréquence afin d'identifier les portions de

spectre de fréquences non utilisées et de permettre aux utilisateurs des réseaux radio cognitive (aussi appelés utilisateurs secondaires) de libérer les fréquences utilisées par les utilisateurs primaires

La méthode de détection Cyclostationary feature detection présente d'importants avantages par rapport aux autres méthodes de détection. Cependant l'utilisateur secondaire peut ne pas détecter la présence de l'utilisateur primaire à cause d'un obstacle se situant entre les deux (station cachée) et ainsi générer des interférences au niveau du récepteur. En outre, une seule machine ne peut pas analyser constamment l'ensemble du spectre de fréquences afin d'y déceler les portions de spectre non utilisées car cette opération est très longue. À cet effet, le réseau radio cognitive peut utiliser la méthode coopérative qui doit se baser sur un protocole de collecte d'informations efficace. En effet, l'utilisation des fréquences varie très vite dans le temps et dans l'espace. Donc il est nécessaire que l'algorithme de collecte d'informations soit rapide. De plus, il peut être envisagé de prendre en considération le positionnement géographique (GPS) dans l'échange d'informations afin d'améliorer l'élaboration d'une carte de l'utilisation du spectre de fréquences.

En présence de plusieurs réseaux radio cognitive distincts, la détection des utilisateurs primaires est plus difficile car il sera plus pénible de distinguer les signaux émis par les utilisateurs secondaires de ceux émis par des utilisateurs primaires. Dans le protocole 802.22, il a été mis en place une période de silence, durant laquelle les utilisateurs secondaires ne sont pas autorisés à transmettre de signal, afin de pouvoir mieux détecter la présence des utilisateurs primaires. Il sera nécessaire de synchroniser le début de cette période de silence entre les différents réseaux radio cognitive afin d'augmenter l'efficacité dans la détection d'un utilisateur primaire.

Le groupe de travail IEEE 802.22 est chargé de concevoir les réseaux radio cognitive 802.22 pour des réseaux sans fil de dimension régionale WRAN (Wireless Regional Area Network) se basant sur la radio cognitive. Ce type de réseau doit réutiliser le spectre de fréquences

actuellement alloué aux services de télévision sans causer d'interférences aux clients de ces services.

CHAPITRE 3

LA COUCHE MAC DES RÉSEAUX RADIO COGNITIVE

3.1 Introduction

La couche liaison de données (protocole MAC) joue un rôle stratégique dans les réseaux radio cognitive. En effet, cette couche est chargée de plusieurs fonctions importantes telles que l'échange d'informations concernant la détection des utilisateurs primaires, la réservation des portions de spectre non utilisées et la transmission des données sur les fréquences réservées. La conception de cette couche est ardue car elle dépend de plusieurs paramètres complexes. Ces paramètres sont la variation de l'utilisation spectrale par rapport au temps et à l'espace, la mobilité des nœuds du réseau radio cognitive et la variation de la qualité de service possible suivant les fréquences disponibles.

Les fonctions principales du protocole MAC sont les suivantes :

- phase d'observation (observe stage) : analyse de l'environnements et enregistrement de l'utilisation du spectre par les systèmes légaux existants;
- phase de planification (plan stage) : évaluation des possibilités d'établissement de connexions ad hoc sans causer d'interférences aux utilisateurs avec licence;
- phase de décision (decide stage) : sélection de la puissance transmise, fréquence, durée et organisation des transmissions des trames;
- phase d'action (act stage) : exécution des transmissions avec les ressources indiquées à l'instant prévu.

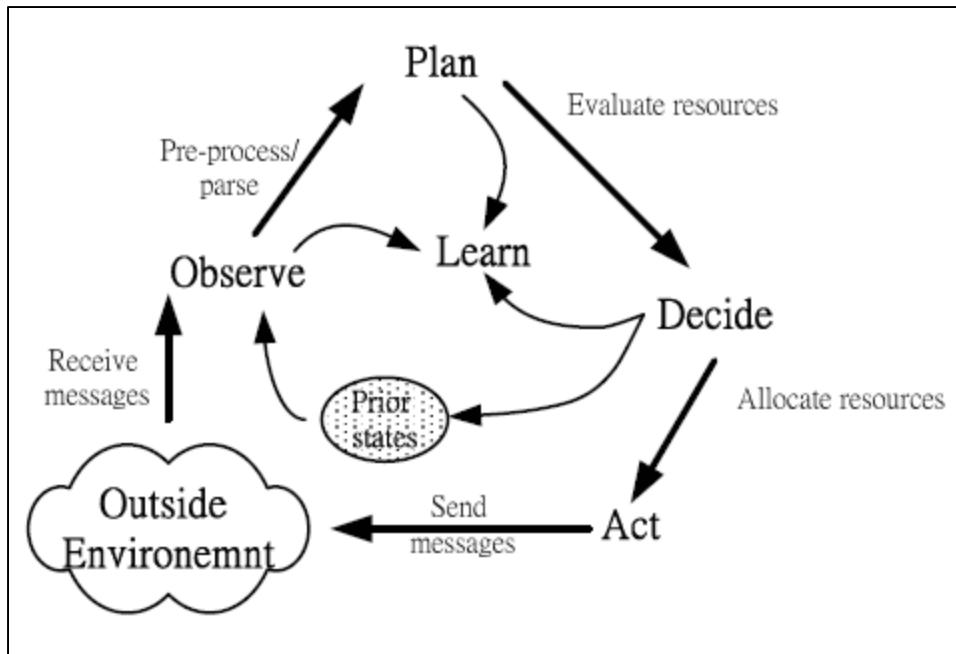


Figure 3.1 Cycle cognitif
Tirée de Mitola et Maguire (1999)

La Figure 3.1 illustre les différentes étapes du cycle cognitif par lesquelles passe le réseau radio cognitive.

L'ordonnancement dans un CWMN et dans un réseau multicanaux IEEE 802.11 présente des similitudes car ils ont à gérer l'ordonnancement des paquets dans plusieurs canaux. Dans les réseaux 802.11 multicanaux dont les nœuds sont équipés d'un seul équipement de transmission (radio), différentes approches d'ordonnancement au niveau de la couche MAC ont été proposées. Dans (Wu, Lin et al. 2000), (Yu-Chee, Shih-Lin et al. 2001) et (Hung, Law et al. 2002) l'ordonnancement de paquets au niveau de la couche MAC est basé sur la réservation de canal sur le canal de contrôle en utilisant le mécanisme RTS/CTS. Dans (Hung, Law et al. 2002), la méthode proposée est divisée en deux étapes. La première étape est la période durant laquelle les nœuds utilisent le canal de contrôle pour réserver les canaux. Dans la deuxième étape, les nœuds envoient leurs données sur le canal sélectionné en utilisant le mécanisme RTS/CTS. Dans (Hung, Law et al. 2002) et (Tzamaloukas et Garcia-Luna-Aceves 2000), les nœuds exécutent de manière synchrone une séquence de sauts sur

tous les canaux. Une paire de nœuds cesse de réaliser la séquence de sauts afin de transmettre des données dans un canal qu'elle se réserve par le mécanisme RTS / CTS. Une fois que la transmission des données est terminée, elle rejoint la séquence de sauts commune. Dans (Bahl, Chandra et al. 2004) et (Hoi, So et al. 2007), chaque nœud effectue une séquence différente de sauts générés à partir d'un nombre aléatoire. Une paire de nœuds qui souhaitent communiquer doit se rejoindre sur un canal particulier, arrêter la séquence de sauts pour effectuer la transmission de données et rejoindre leur séquence respective de sauts à la fin de la transmission.

Pour les réseaux radio cognitive dont les nœuds sont équipés d'un seul équipement de transmission (radio), différents algorithmes d'ordonnement au niveau de la couche MAC ont été proposés. Les protocoles MAC radio cognitive peuvent être classés en trois catégories MAC : protocole basé sur l'évitement des collisions, protocole basé sur la division des canaux en intervalles de temps et protocole hybride qui combine les deux précédentes approches.

Dans les protocoles MAC basés sur l'évitement des collisions, l'accès aux canaux s'effectue grâce à un mécanisme d'évitement des collisions. Ce mécanisme est généralement similaire à la méthode d'accès CSMA/CA. Il débute par une période d'analyse des canaux pour déterminer s'il y a des utilisateurs qui les utilisent. Après une période aléatoire pour réduire les risques de collision, le nœud transmet ses données. Ce mécanisme présente une simplicité de mise en place et d'utilisation mais il conduit à une utilisation inefficace des canaux. Les protocoles MAC basés sur l'évitement des collisions dans les réseaux radio cognitive sont présentés dans plusieurs travaux ((Cordeiro, Challapali et al. 2006), (Younis, Shallcross et al. 2012), et (Zame, Jie et al. 2014)).

Dans les protocoles MAC basés sur la division des canaux en intervalles de temps, chaque nœud lui est assigné des intervalles de temps dans le canal de contrôle afin de coordonner ses transmissions sur les canaux de données avec les autres nœuds. L'assignation des intervalles de temps entre les nœuds en évitant les collisions et les interférences permet d'obtenir une

meilleure performance dans le réseau par rapport aux protocoles MAC basés sur l'évitement des collisions ou hybrides. Cependant, les protocoles MAC basés sur la division des canaux en intervalles de temps sont difficiles à mettre en place à cause des problèmes de synchronisation des nœuds et d'assignation efficace des intervalles de temps aux nœuds. Les protocoles MAC basés sur la division des canaux en intervalles de temps dans les réseaux radio cognitive sont présentés dans plusieurs travaux ((Chia-Chun Hsu, Weit et al. 2007), (Jia, Zhang et al. 2008), et (Wang, Chen et al. 2007)).

Les protocoles MAC hybrides se basent sur l'évitement des collisions et la division des canaux en intervalles de temps. Généralement, le mécanisme d'évitement des collisions est utilisé lors de l'échange de données de contrôle et la division des canaux en intervalles de temps est utilisé lors de l'échange de données. Un protocole MAC hybride fournit de meilleures performances par rapport à un protocole MAC se basant sur l'évitement des collisions et une complexité inférieure à un protocole MAC se basant sur la division des canaux en intervalles de temps. Les protocoles MAC hybrides dans les réseaux radio cognitive sont présentés dans plusieurs travaux ((Atmaca 2013), (Rongbo, Wanneng et al. 2013), (Thoppian, Venkatesan et al. 2006), et (Huang et Raychaudhuri 2011)).

La répartition de la bande passante des canaux libres découverts entre les nœuds peuvent se faire suivant deux approches : approche non coopérative et coopérative. L'approche non coopérative consiste pour les nœuds du réseau à maximaliser leur performance individuelle tel que le débit, le délai, etc. Elle permet d'avoir une architecture simple et moins complexe que l'approche coopérative mais elle présente des performances globales du réseau inférieures à l'approche coopérative. L'approche coopérative se base sur la collaboration des nœuds du réseau afin de maximaliser les performances globales du réseau. L'approche coopérative utilise différents algorithmes :

- les algorithmes stochastiques se basent sur les chaînes de Markov qui représentent l'activité du réseau pour déterminer la stratégie optimale de répartition de la bande passante. Ils sont utilisés dans plusieurs travaux ((Hu, Yao et al. 2014), (Han-Feng, Shin-Ming et al. 2014), et (Devanarayana et Alfa 2014));

- les algorithmes de la théorie des jeux permettent d'établir une stratégie dans un environnement où plusieurs agents peuvent prendre des décisions. La théorie des jeux s'applique facilement au réseau maillé sans fil radio cognitive car il peut être facilement représenté par un jeu où les nœuds sont les joueurs ayant une stratégie et une fonction d'évaluation. Les algorithmes de la théorie des jeux sont utilisés dans plusieurs travaux ((Raiss-El-Fenni et El Kamili 2014), (Kae Won, Wha Sook et al. 2013), et (Fang, Xu et al. 2013));
- les algorithmes bio-inspirés appliquent des mécanismes inspirés de la nature afin de résoudre plusieurs défis dans la couche MAC tels que la répartition de la bande passante ou l'échange de données de contrôle. Les algorithmes bio-inspirés sont utilisés dans plusieurs travaux ((Atakan et Akan 2012)).

À présent, on va exposer différentes conceptions du protocole MAC : deux protocoles MAC basés sur l'évitement des collisions (le protocole SCA-MAC et le protocole HC-MAC), un protocole MAC basé sur la division des canaux en intervalles de temps (le protocole MAC des réseaux 802.22), un protocole MAC hybride et un exemple de qualité de service au niveau MAC.

3.2 Protocole MAC basé sur l'évitement des collisions

Dans cette section, on présente deux protocoles MAC basés sur l'évitement des collisions.

3.2.1 Statistical Channel Allocation MAC

Le protocole proposé SCA-MAC (Statistical Channel Allocation MAC) (Chia-Chun Hsu, Weit et al. 2007) consiste en trois principales opérations :

- analyse et apprentissage de l'environnement : cette opération se résume à effectuer la détection des utilisateurs primaires en utilisant la méthode de détection cyclostationary feature detection;
- échange de CRTS/CCTS (Control-channel-Request-To-Send/Control-channel-Clear-To-Send) sur le canal de contrôle : la source émet sur le canal de contrôle un paquet CRTS contenant les différentes possibilités d'établissement de connexion avec la destination. Le

récepteur, en recevant le paquet CRTS, étudie la meilleure possibilité pour transmettre les données et l'envoie dans un paquet CCTS. Le paquet CCTS va aussi transporter la taille de la fenêtre d'évitement de collision CA (collision avoidance window). Cette fenêtre est calculée suivant la formule suivante :

$$CA = \begin{cases} 2, n = 0 \\ 2^n, 1 \leq n < 5 \\ 32, n \geq 5 \end{cases} \text{ avec } n \text{ représentant le nombre de voisins du récepteur.}$$

En effet, CA dépend du nombre n car la probabilité de collision est extrêmement liée au nombre de voisins du récepteur;

- transmission de données et d'acquittements sur le canal de données : l'émetteur commence la transmission de données après un temps aléatoire inférieur à la taille de la fenêtre CA. Ensuite, il attend un acquittement de la destination. S'il reçoit l'acquittement alors la transmission est terminée sinon il doit recommencer les deux précédentes opérations afin de retransmettre les données.

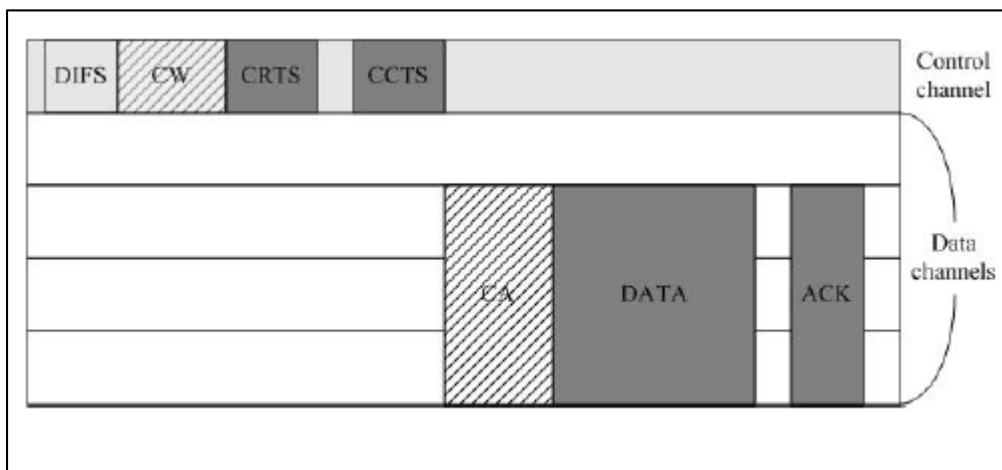


Figure 3.2 Exemple d'exécution de SCA-MAC
Tirée de Chia-Chun Hsu, Weit et al. (2007)

La Figure 3.2 montre un exemple d'exécution du protocole SCA-MAC. Dans ce protocole, le nœud peut adapter son champ de détection des utilisateurs primaires dans le spectre de fréquences. En effet, le nœud peut augmenter le nombre de fréquences qu'il parcourt afin de déceler des portions de spectre non utilisées si le spectre est surutilisé. Le protocole SCA-MAC utilise aussi l'agrégation de canal afin d'augmenter le débit de transmission. Il favorise l'utilisation de plusieurs canaux par un même nœud afin de réduire le temps de transmission et les interférences causées aux utilisateurs primaires.

3.2.2 Hardware Constrained Multi-Channel Cognitive MAC

Le protocole HC-MAC (Hardware Constrained Multi-Channel Cognitive MAC) présenté dans (Jia, Zhang et al. 2008) prend en considération les contraintes physiques. En effet, les nœuds ont chacun un seul équipement radio. Donc, les nœuds ne peuvent effectuer à la fois la détection des utilisateurs primaires et la transmission des données. Dans un premier temps, l'émetteur émet un paquet C-RTS sur le canal de contrôle. Tous les nœuds qui reçoivent ce paquet, diffèrent toutes les opérations de détection ou de transmission. La destination répond par un paquet C-CTS sur le canal de contrôle. Ensuite, les deux nœuds émetteur et récepteur vont procéder à la phase de détection des utilisateurs primaires. Ils s'échangent les informations de détection grâce à des paquets S-RTS/S-CTS. A la fin de la phase de détection, ils effectuent la transmission de données et envoient ensuite des paquets T-RTS/T-CTS afin de signaler aux autres nœuds la libération du canal de contrôle et du spectre.

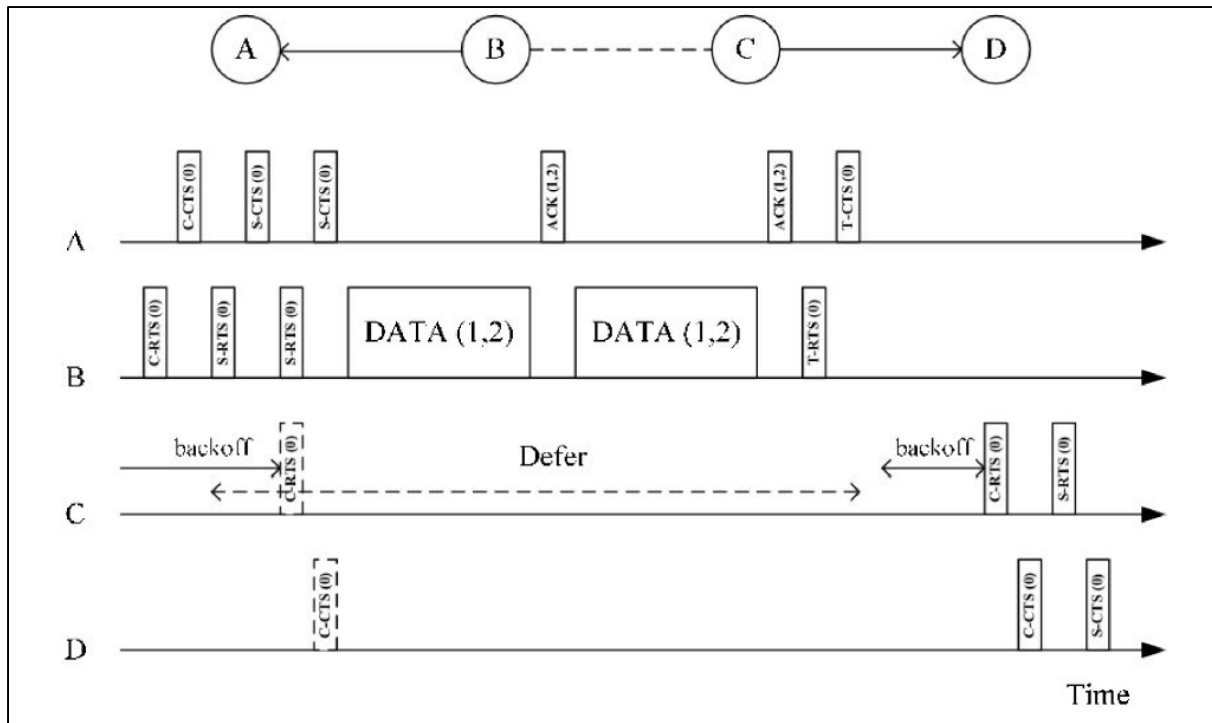


Figure 3.3 Les différentes phases du protocole HC-MAC
Tirée de Jia, Zhang et al. (2008)

La Figure 3.3 illustre un exemple d'exécution du protocole HC-MAC. On peut remarquer une réduction importante de la bande passante du réseau radio cognitive car seulement une seule transmission entre une paire de nœuds est opérée dans l'ensemble du spectre de fréquences. Le but des réseaux radio cognitive est la réutilisation des portions de spectre non utilisées. Les réseaux radio cognitive doivent donc permettre à plusieurs transmissions de données de différentes paires de nœuds d'avoir lieu simultanément sur des fréquences distinctes. L'échange d'informations lors de la détection des portions de spectre non utilisées entre l'émetteur et le récepteur va permettre de prolonger ou de raccourcir la période de détection suivant les besoins. En effet, l'émetteur et le récepteur arrêtent d'analyser le spectre dès qu'ils ont découvert les fréquences non utilisées nécessaires pour transmettre toutes les données.

3.3 Protocole MAC basé sur la division des canaux en intervalles de temps

Le protocole MAC des réseaux 802.22 doit gérer la communication point à multipoint entre le BS et les CPE et répondre rapidement aux changements de l'environnement.

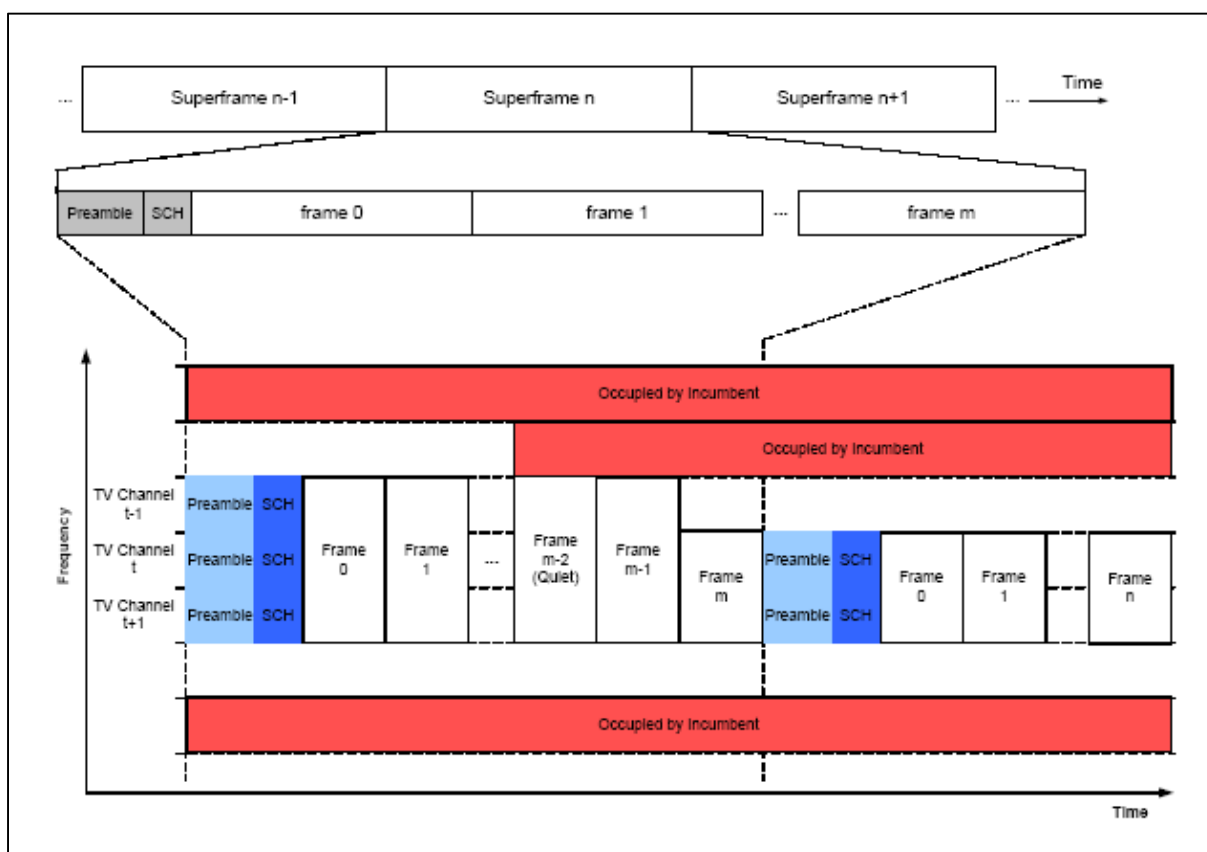


Figure 3.4 Structure générale d'une super trame 802.22
Tirée de Cordeiro, Challapali et al. (2006)

La Figure 3.4 décrit la structure générale d'une super trame envoyée sur le support de transmission. Cette super trame est précédée par un entête contenant un préambule pour la synchronisation, la configuration de l'AGC (Automatic Gain Control) et une estimation du canal. Ce préambule est suivi par des informations sur la structure de la super trame SCH (Superframe Control Header). En outre, l'entête est transmis par la BS sur chaque canal

utilisé pour faciliter la détection du réseau 802.22 et l'association des CPE à la BS. Ensuite, cet entête est suivi par une série de trames MAC contenant des données.

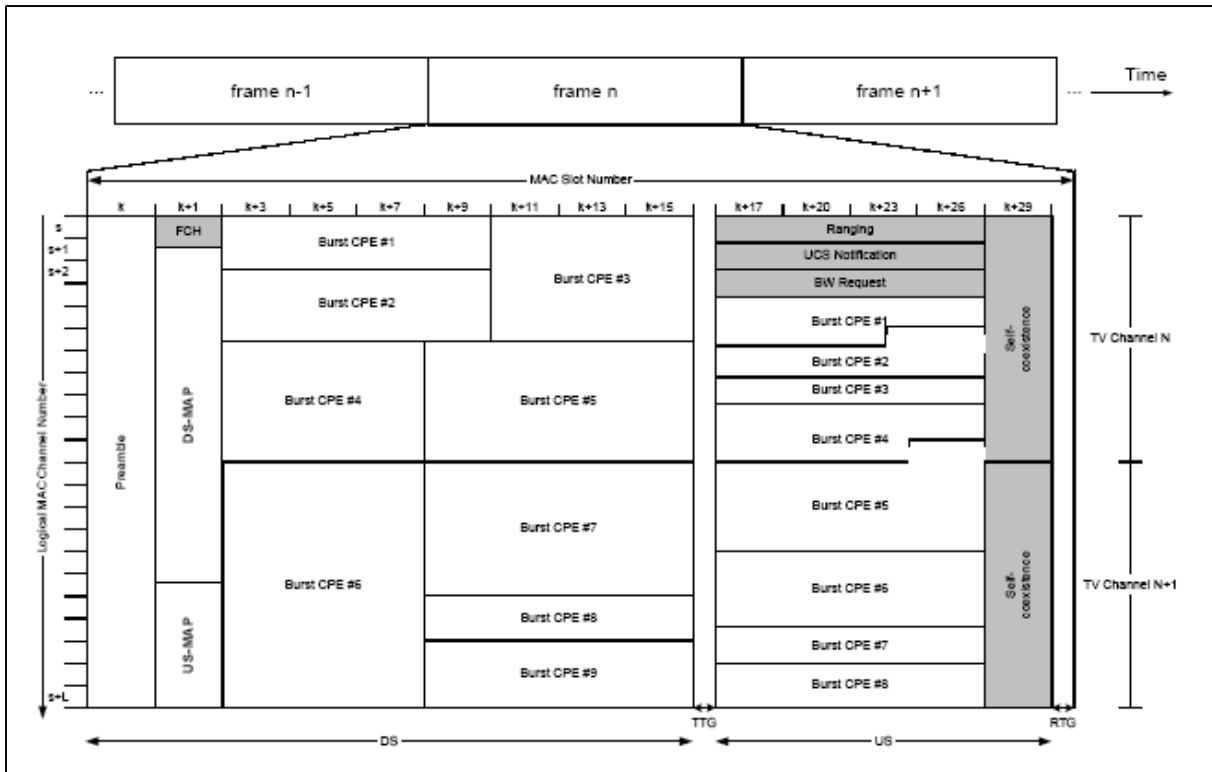


Figure 3.5 Structure d'une trame MAC 802.22
Tirée de Cordeiro, Challapali et al. (2006)

La Figure 3.5 illustre la structure d'une trame MAC. La trame MAC est divisée en deux parties : une partie pour le flux descendant DS (downstream) et une autre partie pour le flux ascendant US (upstream). La partie du flux descendant DS (downstream) contient les données transmises par la BS aux CPE. La partie du flux ascendant US (upstream) contient les données transmises par les CPE à la BS.

3.4 Protocole MAC hybride

L'objectif de (Thoppian, Venkatesan et al. 2006) est de réaliser une assignation optimale de canaux et d'intervalles de temps aux liens d'une manière distribuée. Cette approche est comparée à la solution optimale d'ordonnement qui est calculée par programmation linéaire en nombres entiers (ILP). Dans le réseau radio cognitif considéré, les nœuds sont équipés d'un seul équipement de transmission (radio) et ont un canal de contrôle. L'accès au canal de contrôle est effectué avec la méthode CSMA/CA et l'accès aux canaux sur lesquels sont envoyées les données est effectué avec la méthode TDMA. Chaque nœud lui est attribué un rang qui est plus important si le nombre de liens actifs et le nombre de canaux libres qu'il a découverts sont faibles. Le nœud avec le plus haut rang dans son voisinage à deux sauts exécute en premier l'algorithme d'assignation d'intervalles de temps. Cet algorithme attribue le premier intervalle de temps disponible au lien à ordonner. Les nœuds qui terminent l'exécution de l'algorithme sont marqués comme étant traités. Ensuite, les nœuds non traités avec le plus haut rang dans leurs voisinages à deux sauts exécutent à leur tour l'algorithme d'assignation d'intervalles de temps. Dès que tous les nœuds sont traités, chaque nœud avec le rang le plus bas dans son voisinage à deux sauts commence à déterminer s'il a la plus grande taille de trame de données (le nombre d'intervalles de temps nécessaires pour ordonner tous les liens) dans le réseau. Enfin, le nœud qui a la plus grande taille de trame de données émet un message à tous les nœuds pour indiquer la taille de trame de données la plus grande et l'heure de début de la phase de transmission des données. En cas d'égalité entre deux ou plusieurs nœuds, le nœud le plus élevé d'identité diffuse son message à tous les nœuds restants.

Les résultats présentés dans (Thoppian, Venkatesan et al. 2006) montrent que cette approche désignée dans la suite du rapport comme approche de hiérarchisation présente une taille de trame de données proche de l'optimal. Cependant, l'approche de hiérarchisation présente un problème de passage à l'échelle, une quantité de données de contrôle échangées élevées et une longue durée d'exécution. L'algorithme d'assignation de canal et d'intervalle de temps dans (Thoppian, Venkatesan et al. 2006) est réalisée selon un ordre établi par les rangs des nœuds

et dispose d'un faible nombre d'exécution simultanée. Dans une topologie de réseau maillé sans fil linéaire dont les nœuds ont des rangs qui augmentent progressivement à partir du début de la chaîne, l'algorithme est exécuté successivement par les nœuds. Par conséquent, le temps total d'exécution de l'algorithme d'ordonnement augmente de façon exponentielle avec le nombre de nœuds dans le réseau. En outre, l'utilisation de la méthode d'accès CSMA/CA force l'envoi d'une copie du paquet de contrôle à chacun des voisins. Chaque paquet de contrôle envoyé nécessite RTS, CTS, et un paquet ACK qui provoque une augmentation significative de la quantité de données de contrôle échangées. Enfin, l'utilisation du mécanisme d'évitement de collisions (backoff) ajoute un délai supplémentaire pour l'accès au canal de contrôle.

3.5 Exemple de qualité de service au niveau de la couche MAC

Le protocole MAC proposé dans (Wang, Chen et al. 2007) se base sur le cycle cognitif illustré dans la Figure 3.6. Il propose dans la phase d'observation, d'établir trois tables contenant diverses informations afin d'aider le nœud dans la prise de décisions. Les trois tables sont les suivantes :

- Primary user Information Table (PIT) contient les informations concernant les utilisateurs primaires dans les systèmes légaux existants. Ces informations vont permettre au nœud de connaître les portions de spectre non utilisées;
- Reservation Information Table (RIT) contient les informations de réservation des flux de trafic sensible au délai. En conséquence, toutes les stations connaissent les périodes de temps réservées et évitent ainsi les collisions;
- Contention Information Table (CIT) contient les propriétés des flux de trafic non temps réel. Il fournit des informations sur les flux de trafic non temps réel, qui peuvent être utilisés pour réduire les collisions et qui peuvent améliorer le débit du canal.

Dans la phase de planification, les mécanismes *gating mechanism*, *linear backoff algorithm* et *stall avoidance scheme* ont été élaborés afin d'améliorer les performances du réseau radio cognitive tel que le débit, le délai d'accès au support de transmission et l'équité.

Le mécanisme *gating mechanism* est utilisé pour éviter de provoquer des interférences aux utilisateurs primaires des systèmes légaux existants et de réduire les collisions avec les utilisateurs du réseau radio cognitive. Il se base sur l'utilisation de la détection coopérative et de l'algorithme modifié p-persistent CSMA.

Le mécanisme *linear backoff algorithm* permet d'accélérer l'accès au support de transmission aux flux de trafic sensible au délai. En effet, les flux de trafic sensibles au délai doivent appliquer l'algorithme linéaire de backoff avec la fenêtre congestion CW suivante :

$$CW_{rt} = \min (CW_{max} , CW_{min} \times (N_{att} - 1))$$

avec N_{att} est le nombre de tentative de transmission de requête, CW_{max} est la taille maximum de CW et CW_{min} est la taille minimum de CW . Ainsi les flux de trafic sensible au délai ont un accès plus rapide au support de transmission par rapport aux autres flux.

Le dernier mécanisme *stall avoidance scheme* est utilisé pour résoudre le problème de mise en mémoire tampon des données non temps réel. En effet, les flux de trafic non sensibles au délai ont la priorité la plus faible pour accéder au support de transmission. Donc un nombre important des paquets de ces flux sont mis dans des mémoires tampons en attendant d'être envoyés. Les nœuds ayant des mémoires tampons de taille limitée détruisent des paquets lorsque les mémoires tampons sont pleines. Afin d'éviter ce problème, le mécanisme redimensionne la fenêtre de congestion CW en appliquant la formule suivante :

$$CW_{stall} < CW_{min}$$

En effet, dès que la taille de la mémoire tampon dépasse un seuil défini, le nœud redimensionne la fenêtre de congestion CW afin de transmettre plus rapidement les paquets contenus dans cette mémoire tampon.

Dans la phase de décision, une nouvelle procédure appelée Invited Reservation Procedure est mise en place afin d'assurer une qualité de service aux nœuds du réseau radio cognitive. Cette procédure définie, dans un premier temps, deux périodes CFP (contention free period) et CP (contention period). La première période CFP est réservée aux flux de trafic sensibles au délai. Durant cette période, le récepteur envoie un rt-CTS (real-time clear-to-send) pour informer l'émetteur que le support de transmission est libre. Durant la seconde période CP qui est plus courte, les données non sensibles au délai sont transmises en utilisant le mécanisme RTS/CTS (request-to-send/clear-to-send). Au cours des deux périodes, toutes les trames de données sont acquittées par un acquittement positif ACK. La Figure 3.6 illustre le fonctionnement de la procédure Invited Reservation Procedure.

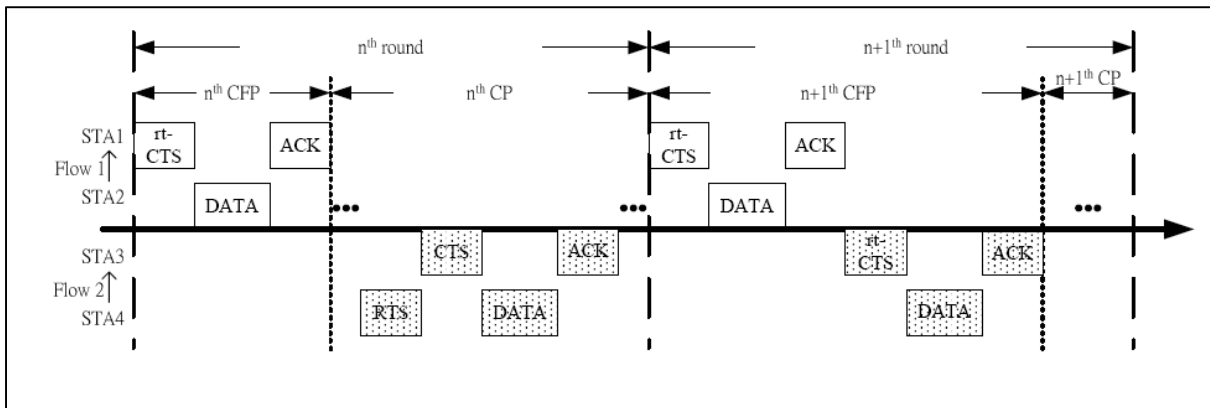


Figure 3.6 Procédure Invited Reservation Procedure
Tirée de Wang, Chen et al. (2007)

Enfin, dans la phase d'action, un mécanisme de synchronisation distribué est utilisé. Il consiste à utiliser le premier rt-CTS et le dernier ACK de la période CFP afin de synchroniser les nœuds. Le premier rt-CTS est émis par la première station de la liste RIT et le dernier ACK est envoyé par la dernière station de la liste RIT.

Ce protocole n'a pas traité le problème de détection des utilisateurs primaires ni le problème du partage des fréquences. Le mécanisme de synchronisation est peu efficace car il se base sur la période CFP. En effet, s'il n'y a pas de flux temps réel, il n'y a pas de période CFP et donc aucun paquet de synchronisation n'est transmis. De plus, il est nécessaire d'avoir un

canal de contrôle afin que l'émetteur et le récepteur puissent communiquer pour sélectionner une fréquence à utiliser pour transmettre les données.

3.6 Conclusion

La couche liaison de données (protocole MAC) joue un rôle stratégique dans les réseaux radio cognitive. En effet, cette couche est chargée de plusieurs fonctions importantes telles que l'échange d'informations concernant la détection des utilisateurs primaires, la réservation des portions de spectre non utilisées et la transmission des données sur les fréquences réservées.

Les protocoles MAC basés sur l'évitement des collisions et les protocoles MAC hybrides réutilisent les mécanismes du protocole MAC 802.11 afin de déjouer divers problèmes. En effet, le mécanisme RTS/CTS est utilisé pour réserver le canal et résoudre le problème des stations cachées. De plus, le mécanisme de backoff est employé pour permettre de réduire les collisions entre les utilisateurs secondaires. D'autre part, les protocoles MAC ont mis en évidence la nécessité d'avoir un canal de contrôle afin que l'émetteur et le récepteur puissent communiquer pour sélectionner une fréquence à utiliser pour transmettre les données (établissement d'un rendez-vous).

Par ailleurs, le nœud peut augmenter le nombre de fréquences qu'il parcourt afin de déceler des portions de spectre non utilisées si le spectre est surutilisé. Il peut utiliser aussi l'agrégation de canaux afin d'augmenter le débit de la transmission. L'utilisation de plusieurs canaux par un même nœud favorise la réduction du temps de transmission et des interférences causées aux utilisateurs primaires.

Le protocole 802.22 permettra la création de réseau sans fil de dimension régionale en se basant sur la radio cognitive. Cependant, il présente encore des lacunes dans sa conception. En effet, dans le cas où le nombre de fréquences disponibles est très faible, les différents

réseaux 802.22 (de différents opérateurs) rentreront en compétition pour l'accès à ces fréquences, causant ainsi une chute des performances.

CHAPITRE 4

ORDONNANCEMENT DÉCENTRALISÉ

4.1 Problématique

Les réseaux maillés radio cognitive nécessitent une couche MAC adaptée à ce nouvel environnement. En effet, ce type de réseau sans fil se trouve confronté à un changement fréquent de la fréquence à utiliser afin de ne pas perturber les utilisateurs primaires (utilisateurs détenteurs de licence). Ainsi, un certain nombre de problèmes résulte de cette contrainte. Ces principaux problèmes sont les suivants :

- l'usage des fréquences par les utilisateurs primaires varie dans le temps et dans l'espace. Ainsi, le réseau maillé radio cognitive doit changer constamment de fréquences utilisées pour s'adapter aux variations de l'environnement. Les nouveaux utilisateurs secondaires (utilisateurs non détenteurs de licence, appartenant aux réseaux radio cognitive) doivent analyser, dans un premier temps, le spectre de fréquences afin de découvrir la fréquence utilisée actuellement par le réseau maillé radio cognitive. Ainsi, le réseau maillé radio cognitive doit trouver un moyen d'indiquer la fréquence actuellement utilisée dans le réseau aux nouveaux utilisateurs secondaires;
- le problème de la station cachée est un problème récurrent dans les réseaux sans fil. La résolution du problème de la station cachée est complexe dans les réseaux maillés radio cognitive car les utilisateurs secondaires changent fréquemment de fréquences;
- le nombre d'équipements radio par nœud augmente la complexité du réseau maillé radio cognitive. En effet, chaque nœud doit gérer l'assignation des fréquences à chaque radio et le nombre important de communications de chaque radio;
- deux nœuds désirant communiquer doivent trouver le moyen de se mettre d'accord sur la fréquence utilisée. En effet, l'établissement de rendez-vous entre deux nœuds désirant communiquer entre eux peut avoir lieu sur un canal de contrôle. Les deux nœuds doivent trouver une fréquence commune qui n'est pas utilisée par les utilisateurs primaires;

- dans les réseaux maillés radio cognitive, il sera indispensable d'établir plusieurs qualités de service. La qualité de service dépend de la fréquence utilisée. En effet, l'utilisation d'une fréquence subissant peu d'interférences et étant peu sollicitée par les utilisateurs primaires permettra d'assurer une meilleure qualité de service. De plus, il sera nécessaire d'utiliser plusieurs fréquences pour une même communication afin d'améliorer la qualité de service. D'autre part, il sera indispensable d'assurer une communication sans interruption due à l'apparition d'un utilisateur primaire et au changement de fréquence. Donc, il faudra assurer une gestion optimale des fréquences dans le réseau maillé radio cognitive afin de satisfaire toutes les demandes de qualité de service;
- dans le cas où le nombre de fréquences disponibles est très faible, les différents réseaux maillés radio cognitive (de différents opérateurs) rentreront en compétition pour l'accès à ces fréquences, causant ainsi une chute des performances. Cette chute des performances est due aux interférences causées par les réseaux. De plus, en présence de plusieurs réseaux radio cognitive distincts, la détection des utilisateurs primaires est plus difficile car il sera plus pénible de distinguer les signaux émis par les utilisateurs secondaires de ceux émis par des utilisateurs primaires. Donc, il faut trouver une méthode pour assurer la coexistence de différents réseaux maillés radio cognitive dans un environnement dynamique;
- en outre, il faudra s'assurer que les diverses solutions permettent un passage à une grande échelle de nœuds.

4.2 Modèle mathématique du problème d'ordonnancement

Dans ce projet, on a choisi d'utiliser Time Division Multiple Access (TDMA) comme protocole d'accès au canal dans les réseaux CWMN car il réduit les collisions et améliore l'utilisation du canal. TDMA consiste en la division dans le temps du canal en différents intervalles de temps qui seront assignés aux utilisateurs. L'objectif de l'ordonnancement au niveau TDMA MAC dans un réseau CWMN est de minimiser le nombre d'intervalles de temps nécessaires pour la transmission des données en assignant un canal et un intervalle de temps à chaque lien sans interférer avec des liens déjà ordonnancés. Chaque intervalle de

temps est assigné à au moins un lien qui représente un émetteur et un récepteur qui ont des données à échanger. Pour atteindre cet objectif, on propose un algorithme pour planifier l'assignation des intervalles de temps aux liens de manière décentralisée.

Notre motivation est d'améliorer le passage à l'échelle du réseau, de réduire la quantité de données de contrôle, et de minimiser le temps global d'ordonnancement. On considère un réseau CWMN dans lequel les nœuds sont équipés d'une antenne radio omnidirectionnelle et utilisent un canal de contrôle commun. On suppose que toutes les radios ont un délai de commutation de canal égal à zéro et leur zone d'interférence est égale à leur portée de communication. Chaque nœud peut avoir un ensemble différent de canaux de données disponibles.

Un lien l est défini par :

- un émetteur $t(l)$ et un récepteur $r(l)$ qui sont dans la portée de communication de chacun et ont un paquet à échanger;
- $LinkChSet_l$ est l'ensemble de canaux communs disponibles entre les nœuds $t(l)$ et $r(l)$ et n'est pas vide;
- $InterferenceSet_l$ est l'ensemble des liens qui peuvent interférer avec le lien l . Un lien n appartient au $InterferenceSet_l$ si $r(l)$ est dans le champ de communication de $t(n)$ ou si $r(n)$ est dans le champ de communication de $t(l)$;
- $ExclusionSet_l$ est l'ensemble des liens qui ont au moins un nœud en commun avec le lien l . Le lien n appartient à $ExclusionSet_l$ si l'émetteur $t(n)$ ou le récepteur $r(n)$ est aussi un émetteur $t(l)$ et un récepteur $r(l)$;
- X_{lcs} est une variable qui est définie de la manière suivante :

$$X_{lcs} = \begin{cases} 1 & \text{si le lien } l \text{ est actif sur le canal } c \text{ et l'intervalle de temps } s. \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Dans un réseau CWMN qui a un ensemble de liens $LinkSet$ et un ensemble de canaux $ChSet$, l'algorithme d'ordonnancement doit satisfaire les conditions suivantes :

$$\forall l \in LinkSet, \sum_{c \in LinkChSet_l} \sum_{s=1}^k X_{lcs} = 1 \quad (4.1)$$

$$\forall l \in LinkSet, \forall c \in LinkChSet_l, \forall s \ 1 \leq s \leq k, \quad (4.2)$$

$$X_{lcs} + \sum_{n \in InterferenceSet_l} X_{ncs} \leq 1$$

$$\forall l \in LinkSet, \forall s \ 1 \leq s \leq k, \quad (4.3)$$

$$\sum_{c \in ChSet} X_{lcs} + \sum_{c \in ChSet} \sum_{n \in ExclusionSet_l} X_{ncs} \leq 1$$

$$\forall l \in LinkSet, \forall c \notin LinkChSet_l, \forall s \ 1 \leq s \leq k, X_{lcs} = 0 \quad (4.4)$$

L'équation (4.1) indique que chaque lien lui est assigné seulement un canal et un intervalle de temps. L'équation (4.2) vérifie que les liens qui interfèrent entre eux ne leurs sont pas affectés le même canal au même intervalle de temps. L'équation (4.3) fait en sorte qu'un nœud ne procède pas à deux opérations en même temps (c'est à dire il ne peut pas transmettre deux paquets, recevoir deux paquets ou transmettre et recevoir un paquet en même temps). L'équation (4.4) assure que le lien l sera ordonnancé sur un canal qui est commun à $t(l)$ et $r(l)$. Notre objectif est de proposer un algorithme d'ordonnancement qui satisfait les quatre équations tout en minimisant le nombre d'intervalles de temps k utilisé pour planifier tous les liens dans le réseau. L'algorithme doit permettre un meilleur passage à l'échelle et une plus grande rapidité d'exécution.

4.3 Ordonnancement décentralisé basé sur la coloration des sommets à deux sauts

Dans cette section, on présente la solution d'ordonnancement des liens dans le réseau. Pour améliorer le passage à l'échelle, chaque nœud du réseau lui est attribué une couleur qui est unique dans son voisinage à deux sauts (coloration des sommets) (Zhang 2007) et (Haixiang et Lipo 2005). L'algorithme de coloration des sommets à deux distances est utilisé pour colorer les nœuds du réseau. L'ordre d'exécution de l'algorithme d'assignation de canal et d'intervalle de temps est déterminé par la couleur du nœud. Ainsi, les nœuds qui ont la même couleur exécutent l'algorithme en même temps. Par conséquent, le temps total

d'ordonnement des liens est défini par le nombre de couleurs qui dépend de la densité des nœuds du réseau.

Pour éviter tous les inconvénients dus à l'utilisation de CSMA / CA, les nœuds utilisent le système TDMA pour envoyer des paquets de contrôle sur le canal de contrôle. Par conséquent, il y aura deux sous-trames dans la trame TDMA, comme indiqué sur la Figure 4.1.

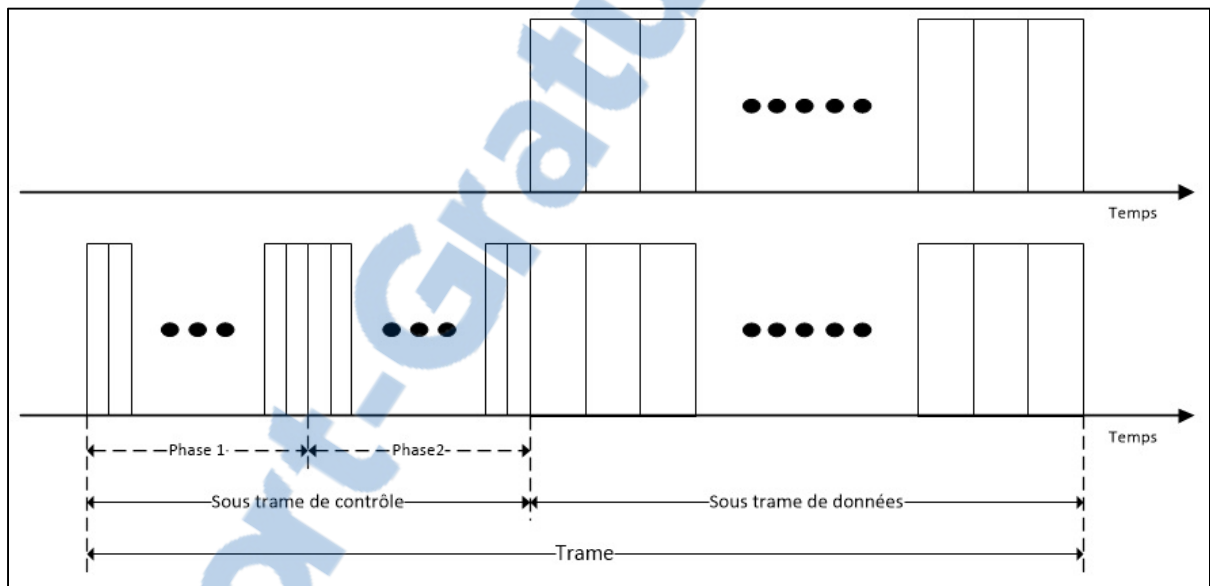


Figure 4.1 Structure d'une trame pour l'ordonnement décentralisé

La sous-trame de contrôle est divisée en mini-intervalles de temps pour envoyer des paquets de contrôle. La sous-trame de données est divisée en mini-intervalles de temps pour envoyer des paquets de données. En évitant les collisions pour accéder au canal de contrôle, un nœud peut diffuser un paquet de contrôle dans les mini-intervalles de temps de contrôle à ses voisins ce qui conduit à réduire le nombre de paquets de contrôle des données échangés. Dans la sous-trame de contrôle, chaque mini-intervalle de temps de contrôle lui est attribué une couleur. Les nœuds qui ont la même couleur que le mini-intervalle de temps peuvent transmettre leurs données de contrôle. Il est important de noter que la synchronisation TDMA

dans le réseau est obtenue en utilisant un GPS. D'autre part, les nœuds analysent le spectre et échangent les informations sur les canaux disponibles entre chaque trame.

Dans notre approche de la coloration, l'exécution de l'algorithme d'assignation de canal et d'intervalle de temps de données a besoin de deux phases. Dans la première phase, appelée phase d'ordonnancement de liens, les nœuds planifient leurs liens sortants alors que dans la deuxième phase, dénommée établissement de la taille de la sous-trame de données, les nœuds déterminent la taille maximale de la sous-trame de données dans le réseau.

4.3.1 Phase 1 – Phase d'ordonnancement des liens

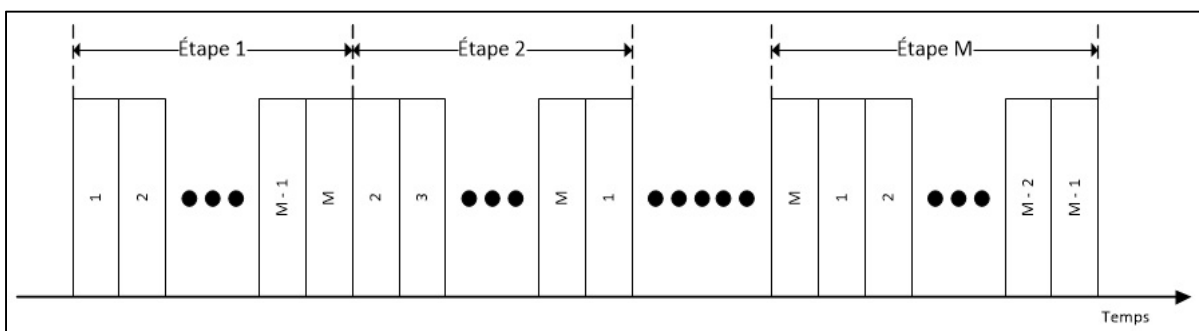


Figure 4.2 Couleurs des intervalles de temps dans la première phase de l'ordonnancement

Dans la première phase, l'ordre d'exécution de l'algorithme d'assignation de canal et d'intervalle de temps se fait en fonction des couleurs du nœud. Les nœuds qui ont le plus faible indice de couleur exécutent l'algorithme en premier. Dans un réseau avec M couleurs, la première phase a M étapes comme décrit dans la Figure 4.2. Chaque étape a M mini-intervalles de temps de contrôle. Au début d'une étape i, tous les nœuds de couleur i assignent les canaux et les intervalles de temps de données à leurs liens sortants et diffusent les informations d'ordonnancement dans le message `Schedule_Information` à leurs voisins dans le premier mini-intervalle de temps de contrôle (qui a la couleur i). En particulier, un nœud sélectionne les liens sortants avec le plus petit nombre de canaux disponibles. En cas d'égalité, le nœud source sélectionne les liens sortants sur la base du plus petit ID du nœud de destination et ainsi de suite. Puis, ce nœud attribue à chaque lien sortant un intervalle de

temps de données sans provoquer d'interférence avec les liens déjà ordonnancés en commençant par le premier intervalle de temps de données disponible de chaque canal. Étape i a M mini-intervalles de temps de contrôle pour permettre aux voisins de différentes couleurs de transmettre l'information aux nœuds à deux sauts. Les mini-intervalles de temps de contrôle sont colorés de i à M , puis de 1 à $i-1$. A la fin de l'étape i , tous les nœuds de couleur i sont marqués comme traités. Ainsi, le nombre total de mini-intervalles de temps de contrôle nécessaires pour planifier tous les liens dans le réseau est M^2 .

4.3.2 Phase 2 – Établissement de la taille de la sous-trame de données

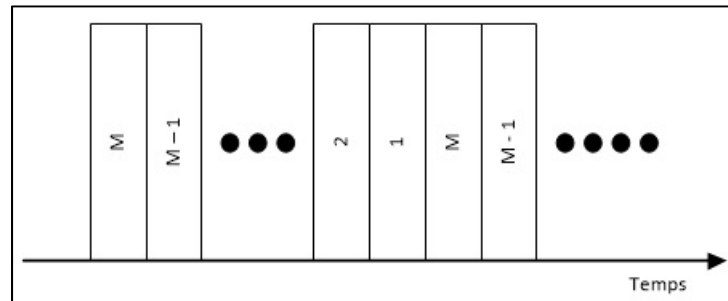


Figure 4.3 Couleurs des intervalles de temps dans la deuxième phase de l'ordonnancement

Dans la deuxième phase, les nœuds déterminent la taille maximale de la sous-trame des données dans le réseau. Les mini-intervalles de temps de contrôle sont colorés de manière cyclique de M à 1 tel que présenté dans la Figure 4.3. Les nœuds qui ont la plus haute couleur dans leur voisinage à deux sauts sont qualifiés de nœuds racine et commencent à établir la taille maximale de la sous-trame de données en utilisant l'algorithme de parcours en largeur d'un graphe (breadth-first search). Un nœud racine envoie un message Tentative_taille qui comprend les informations suivantes: la taille maximale de la sous-trame des données, l'identité du nœud racine, et l'identité de nœud parent, qui est égale à son identité. Les voisins d'un nœud racine deviennent ses enfants dans l'arborescence logique.

Lorsqu'un nœud x reçoit un message de Tentative_taille du nœud y provenant du nœud racine z effectue les actions suivantes :

- si la taille maximale de la sous-trame de données contenue dans le message est plus grande que la taille de la sous-trame de données maximale du nœud x , alors le nœud x devient un enfant du nœud y dans l'arborescence logique du nœud racine z et met à jour sa taille maximale de la sous-trame. En cas d'égalité, pour la taille maximale de la sous-trame de données, le nœud x effectue ce qui suit:
 - si le nœud x ne fait pas déjà partie d'une arborescence logique, alors le nœud x devient un enfant dans l'arborescence logique du nœud racine z ;
 - sinon si le nœud x fait déjà parti d'une arborescence logique du nœud racine v , le nœud x devient un enfant dans l'arborescence logique du nœud racine z si l'ID du nœud z est supérieure à l'ID du nœud v .

Après être devenu un enfant dans l'arborescence logique du nœud racine z , le nœud x enregistre le moment de réception du message `Tentative_taille` dans la variable `Temps_Recept_Tentative`. La variable `Temps_Recept_Tentative` indique le temps mis par le message `Tentative_taille` pour atteindre le nœud à partir du nœud parent. Elle sera utilisée pour connaître le temps nécessaire pour un message du nœud racine pour atteindre le nœud le plus éloigné dans le réseau. Le nœud diffuse l'information sur la taille maximale de la sous-trame des données à l'ensemble de ses voisins dans le message `Tentative_taille` qui comprend la taille maximale de la sous-trame des données, l'identité du nœud racine, et l'identité du nœud parent. Tous les voisins, à l'exception du nœud parent peuvent devenir un enfant potentiel du nœud x . En recevant le message `Tentative_taille`, le nœud y a une confirmation que le nœud x est son enfant dans l'arborescence logique;
- si la taille de la sous-trame de données maximale contenue dans le message est inférieure à la taille de la sous-trame de données maximale du nœud x , alors le nœud x ignore le message;
- si le nœud x fait déjà parti de l'arborescence logique du nœud racine z , le nœud x supprime le nœud y de la liste des enfants potentiels.

Quand un nœud a la liste d'enfants potentiels vide et n'a pas d'enfants, il envoie un message `Acquittement` qui contient la valeur de la variable `Temps_Recept_Tentative` à son parent.

Quand un nœud a des messages d'acquittement de tous ses enfants et a une liste d'enfants potentiels vide, il envoie un message Acquittement à son parent. Le message Acquittement contient la plus grande valeur de message de Temps_Recept_Tentative reçu dans les messages d'acquittement de ses enfants. Le nœud racine qui a reçu un message Acquittement de tous ses enfants en déduit que sa taille maximale de la sous-trame de données est la plus élevée et que tous les nœuds du réseau font partie de son arborescence logique. Ainsi, il a réussi à propager la taille maximale de la sous-trame de données à tous les nœuds dans le réseau. Ensuite, il calcule le délai pour atteindre le nœud le plus éloigné à partir de la valeur la plus élevée de Temps_Recept_Tentative et le temps de transmission du message Tentative_taille. Grâce à la connaissance de ce délai, le nœud connaît le temps qu'il faudra pour que son message atteigne tous les nœuds dans le réseau et ainsi, peut établir l'heure de début de la phase de communication. Ensuite, le nœud envoie un message de Information_Phase_Communication qui indique la fin de la deuxième phase et contient l'heure de début et le nombre d'intervalles de temps de la phase de communication de données. Le message Information_Phase_Communication se propage dans l'arborescence logique.

4.4 Exemple d'exécution de la solution d'ordonnement

Dans cette section, on va présenter un simple exemple d'exécution de l'algorithme d'ordonnement.

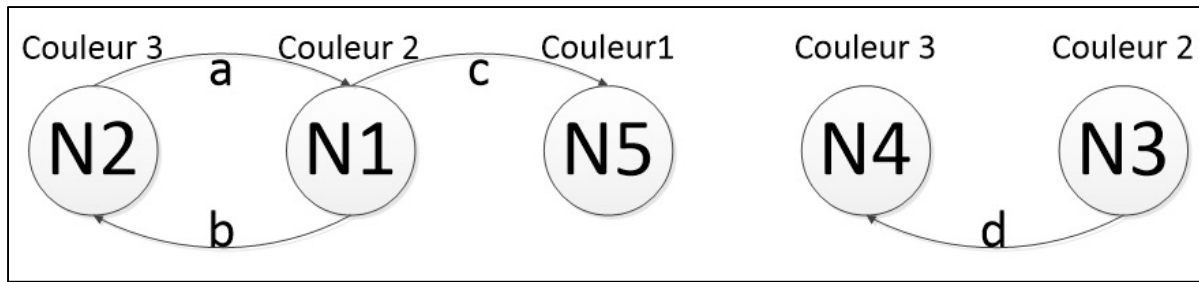


Figure 4.4 Réseau sans fil maillé pour l'exemple

La Figure 4.4 illustre le réseau sans fil maillé pour l'exemple d'exécution de l'algorithme d'ordonancement. Le réseau est composé de cinq nœuds N1, N2, N3, N4 et N5. Une couleur est assignée à chaque nœud dans le réseau en respectant la règle qu'un nœud ne peut pas avoir la même couleur qu'un de ces voisins à deux sauts. Le réseau a eu besoin de trois couleurs pour colorier tous les nœuds. La couleur 1 est attribuée au nœud N5. La couleur 2 est attribuée aux nœuds N1 et N3. La couleur 3 est attribuée aux nœuds N2 et N4. Les flèches reliant les nœuds représentent les liens actifs entre les nœuds. La direction de la flèche indique le sens dans lequel le paquet est envoyé. Dans ce réseau, il y a quatre liens actifs a, b, c, d. Il faut donc ordonnancer quatre paquets dans le réseau :

- un paquet envoyé du nœud 2 vers le nœud 1 (lien a);
- un paquet envoyé du nœud 1 vers le nœud 2 (lien b);
- un paquet envoyé du nœud 1 vers le nœud 5 (lien c);
- un paquet envoyé du nœud 3 vers le nœud 4 (lien d).

4.4.1 Première phase de l'ordonnancement

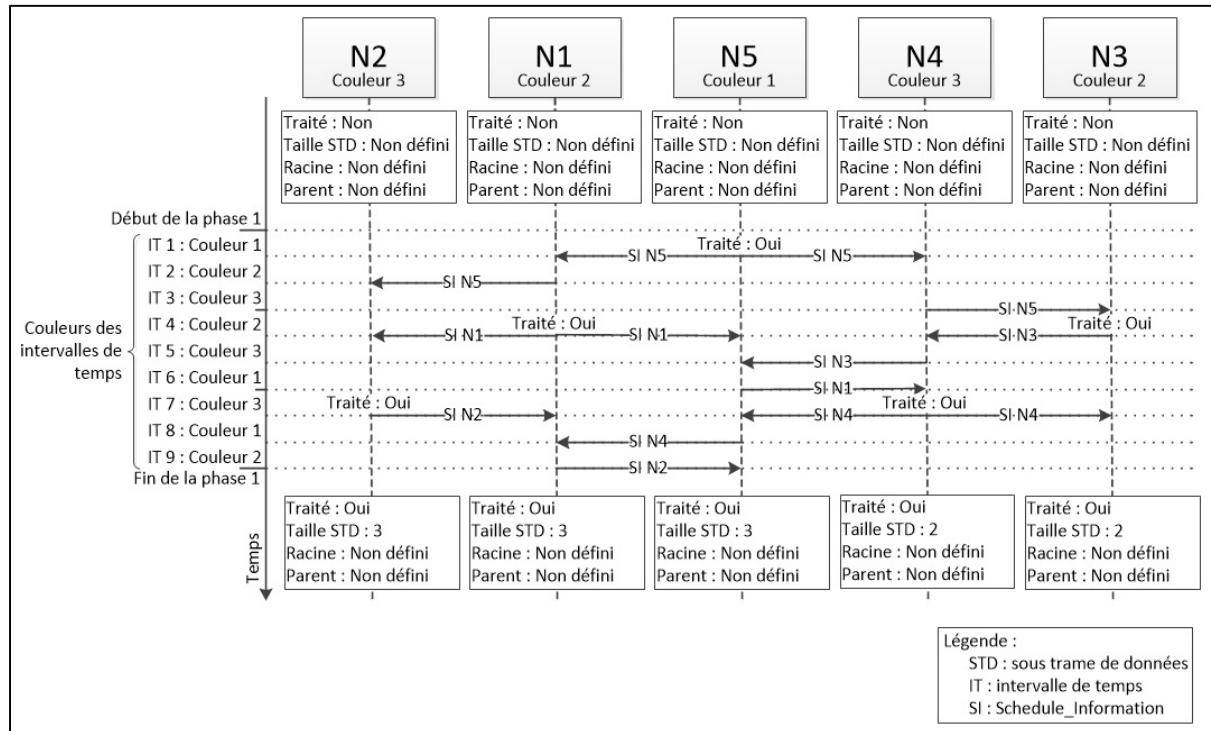


Figure 4.5 Première phase de l'ordonnancement pour l'exemple

La Figure 4.5 décrit les différentes étapes de la première phase de l'ordonnancement pour cet exemple. Les étapes de la première phase sont séparées par un trait sur l'échelle de temps. Une couleur est assignée à chaque intervalle et indique aux nœuds qui ont la même couleur qu'ils ont le droit de transmettre. Les nœuds qui ont la même couleur que le premier intervalle de temps d'une étape ordonnancent les paquets à envoyer et transmettent les informations sur les paquets ordonnancés dans leur voisinage à deux sauts. Ainsi l'intervalle de temps 1 permettent aux nœuds qui ont la couleur 1 d'ordonnancer les paquets à envoyer et de transmettre les informations sur les paquets ordonnancés dans leur voisinage à deux sauts. Les intervalles 2 et 3 permettent aux nœuds qui ont les couleurs 2 et 3 de relayer les informations transmises par les nœuds qui ont la couleur 1. L'intervalle de temps 4 permettent aux nœuds qui ont la couleur 2 d'ordonnancer les paquets à envoyer et de transmettre les informations sur les paquets ordonnancés dans leur voisinage à deux sauts. Les intervalles 5 et 6 permettent aux nœuds qui ont les couleurs 3 et 1 de relayer les

informations transmises par les nœuds qui ont la couleur 2. L'intervalle de temps 7 permettent aux nœuds qui ont la couleur 3 d'ordonner les paquets à envoyer et de transmettre les informations sur les paquets ordonnancés dans leur voisinage à deux sauts. Les intervalles 8 et 9 permettent aux nœuds qui ont les couleurs 1 et 2 de relayer les informations transmises par les nœuds qui ont la couleur 3.

A la fin de la première phase, tous les paquets sont ordonnancés dans le réseau. Le résultat de l'ordonnancement illustré dans la Figure 4.6 est une sous-trame de données de trois intervalles dont les paquets sont envoyés de la manière suivante :

- dans le premier intervalle de temps, un paquet du lien *b* et *d* sont envoyés;
- dans le deuxième intervalle de temps, un paquet du lien *c* est envoyé;
- dans le troisième intervalle de temps, un paquet du lien *a* est envoyé.

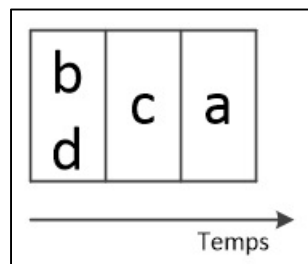


Figure 4.6 Sous-trame de données pour l'exemple

Les nœuds du réseau à la fin de la première phase ont des tailles de sous-trame de données différentes car chaque nœud a des informations partielles sur les paquets ordonnancés dans l'ensemble du réseau. En effet, les nœuds obtiennent seulement les informations des nœuds dans leur voisinage à deux sauts étant donné que les liens se trouvant au-delà du voisinage à deux sauts ne peuvent pas rentrer en conflit avec ses liens à ordonnancer. De plus, dans un réseau, il y a des zones où le trafic est plus important donc le nombre de paquets à ordonnancer est plus important. Ainsi, la taille de la sous-trame de données obtenue à la fin de la première phase d'ordonnancement sera différente suivant la zone où se trouve le nœud. Dans cet exemple, les nœuds 3 et 4 ont une sous-trame de données dont la taille est de deux

intervalles de temps. Les nœuds 1, 2 et 5 ont une sous-trame de données dont la taille est de trois intervalles de temps.

4.4.2 Deuxième phase de l'ordonnancement

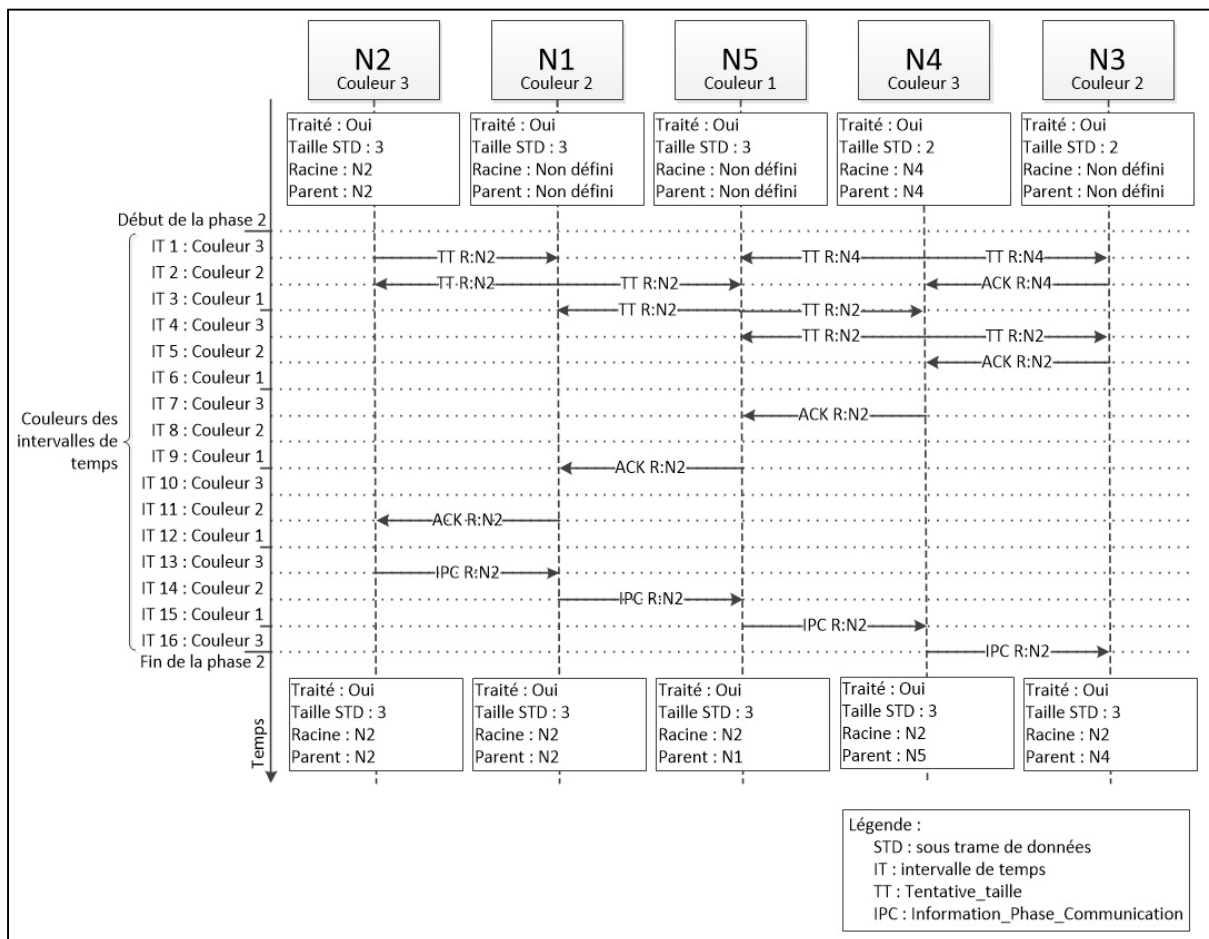


Figure 4.7 Deuxième phase de l'ordonnancement pour l'exemple

La Figure 4.7 expose les différentes étapes de la deuxième phase d'ordonnancement. Les nœuds 2 et 4 ont la plus haute couleur dans leur voisinage à deux sauts et sont ainsi qualifiés de nœuds racines. Ils commencent à établir la taille maximale de la sous-trame de données en utilisant l'algorithme de parcours en largeur d'un graphe (breadth-first search). Dans le premier intervalle de temps, les nœuds 2 et 4 envoient un message Tentative_taille pour

déterminer s'ils ont la taille maximale de la sous-trame de données. Dans le deuxième intervalle de temps, le nœud 1 adhère à l'arbre logique du nœud racine 2 puisqu'il a une taille de sous-trame de donnée égale à celle du nœud 2. Ensuite, il propage les informations envoyées par le nœud 2. Les nœuds 5 et 4 effectuent les opérations que le nœud 1 dans l'intervalle de temps 3 et 4 respectivement. Dans le deuxième intervalle de temps, Le nœud 3 retourne au nœud 4 un acquittement pour indiquer qu'il a adhéré à l'arbre logique construit par le nœud 4 et qu'il n'a pas de voisins potentiels qui peuvent aussi adhérer. Dans le quatrième intervalle de temps, le nœud 3 reçoit les informations concernant l'arbre logique construit par le nœud 2. Il constate que le nœud 2 a une taille de sous-trame de données qui est plus grande que celle du nœud 4. Il devient donc l'enfant du nœud 4 dans l'arbre logique du nœud racine 2. Il envoie un acquittement pour indiquer qu'il a adhéré à l'arbre logique construit par le nœud 2 et qu'il n'a pas de voisins potentiels qui peuvent aussi adhérer. De l'intervalle de temps 5 à 11, les nœuds envoient des acquittements pour indiquer qu'ils ont adhéré à l'arbre logique construit par le nœud 2 et qu'ils n'ont pas d'autres voisins potentiels qui peuvent aussi adhérer. A l'intervalle de temps 11, le nœud 2 est informé qu'il est le nœud racine du seul arbre logique du réseau et que tous les nœuds du réseau ont adhéré à cet arbre. A l'intervalle de temps 13, le nœud 2 envoie un message `Information_Phase_Communication` qui indique la fin de la deuxième phase et contient l'heure de début et le nombre d'intervalles de temps de la phase de communication de données.

4.5 Conclusion

On a présenté une solution décentralisée de couche MAC pour les réseaux maillés sans fil. La solution se base sur l'algorithme de coloration des sommets à deux distances pour permettre une exécution simultanée de l'assignation des intervalles de temps par les nœuds. Elle utilise TDMA comme méthode d'accès au support de transmission. Dans la suite du rapport, la solution d'ordonnancement décentralisé est désignée comme l'approche de coloration. La solution présentée dans (Thoppian, Venkatesan et al. 2006) est désignée comme l'approche de hiérarchisation.

CHAPITRE 5

SIMULATION ET ANALYSE DES RESULTATS

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, on compare l'approche de hiérarchisation et l'approche de coloration dans les situations suivantes : l'augmentation de la dimension du réseau, l'augmentation du nombre de nœuds dans le réseau et l'augmentation du nombre de canaux dans le réseau. L'augmentation de la dimension du réseau consiste à agrandir le réseau tout augmentant le nombre de nœuds dans le réseau afin de garder la même densité des nœuds. L'augmentation du nombre de nœuds dans le réseau consiste à préserver la dimension du réseau tout en augmentant le nombre de nœuds dans le réseau afin d'accroître la densité des nœuds. L'augmentation du nombre de canaux consiste à augmenter le nombre de canaux disponibles pour chaque nœud dans le réseau. Cette comparaison permet de déterminer l'amélioration du passage à l'échelle et la diminution de la durée de l'assignation des canaux et des intervalles de temps de données. Pour atteindre cet objectif, on analyse le temps passé pour transmettre des paquets de contrôle et les paquets de données, la taille de la sous-trame de données, et le débit utile d'un lien. Les résultats présentés dans les figures ci-dessous présentent la valeur moyenne de 50 simulations de 60 secondes chacune. Le logiciel de simulation utilisé pour effectuer les simulations pour les deux approches est NS-2 (NS-2). La durée de l'intervalle de temps pour la transmission des données est de 0,6675ms qui est le temps nécessaire pour transmettre un paquet de 1500 octets. Dans les simulations, les nœuds ont toujours un paquet de 1500 octets à envoyer à chaque voisin.

5.2 Variation de la dimension du réseau

L'augmentation de la dimension du réseau va permettre de mesurer les performances des deux approches lors du passage à l'échelle. Dans cette section, on compare l'approche de hiérarchisation et l'approche de coloration avec deux scénarios de simulation. Cette section présente les résultats des simulations pour l'approche de hiérarchisation et l'approche de

coloration dans un réseau maillé et dans un réseau en grille. Dans les simulations, les nœuds ont une portée de communication de 250m. Le nombre de canaux disponibles au niveau de chaque nœud est choisi aléatoirement entre 1 et 25. L'identité du canal est choisie entre 1 et 50. Dans le premier scénario de simulation, les nœuds sont placés pour former un réseau en grille et séparés par une distance de 176m. Le nombre de nœuds dans le réseau est de 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100, 121, et 144. Dans le deuxième scénario de simulation, les nœuds sont placés de manière aléatoire dans une zone carrée. Les dimensions de la zone sont 467m × 467m, 738m × 738m, 1044m × 1044m, 1279m × 1279m, 1477m × 1477m, 1651m × 1651m, 1809m × 1809m dans lesquels sont placés pour assurer la même densité 10, 25, 50, 75, 100, 125, et 150 nœuds, respectivement.

5.2.1 Durée d'exécution de l'ordonnancement

Dans cette section, on examine le temps passé pour les deux approches pour effectuer l'ordonnancement des paquets dans le réseau avant d'envoyer les paquets de données.

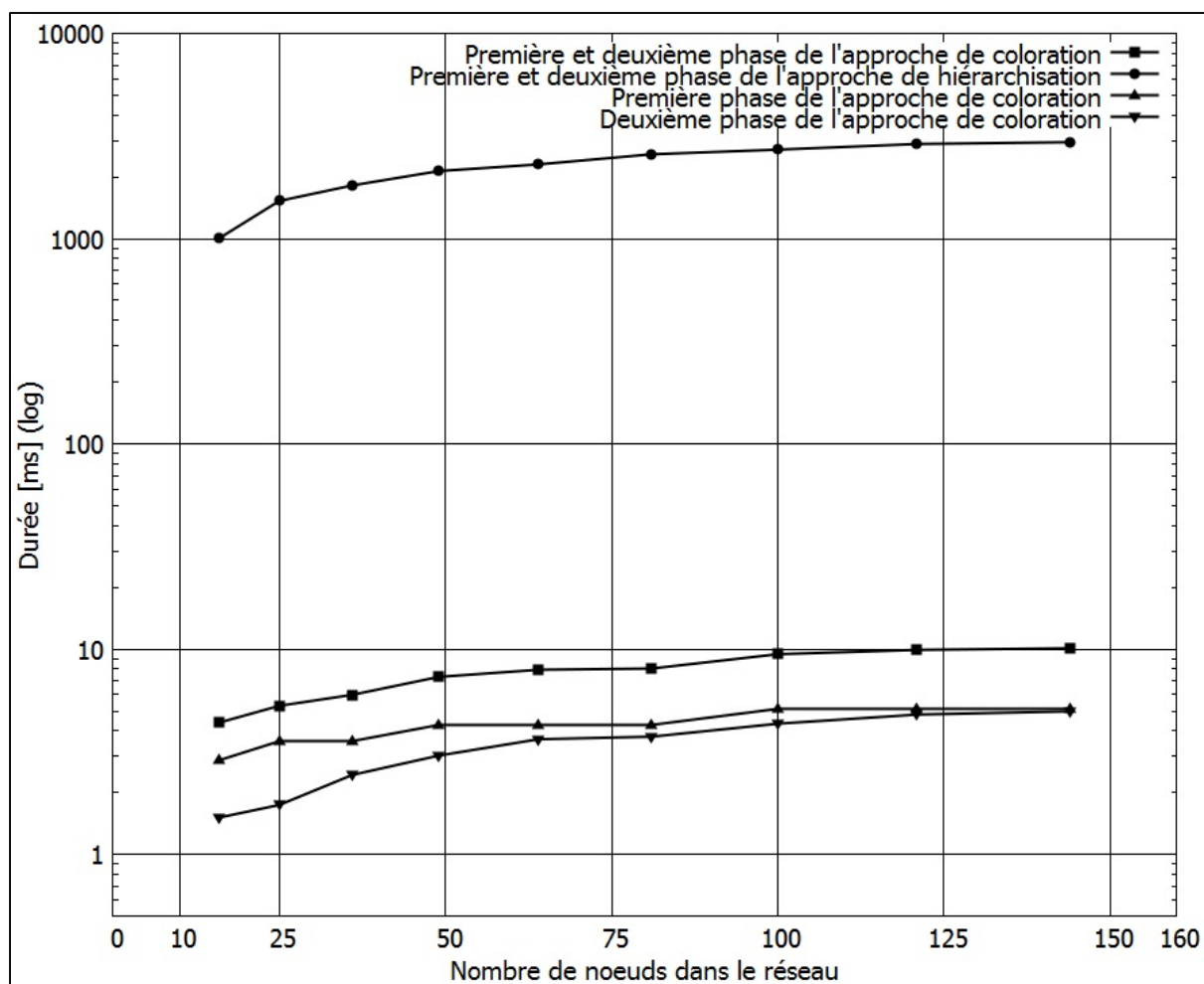


Figure 5.1 La durée nécessaire pour ordonnancer les liens et établir la taille de la sous-trame de données pour les deux approches dans un réseau en grille

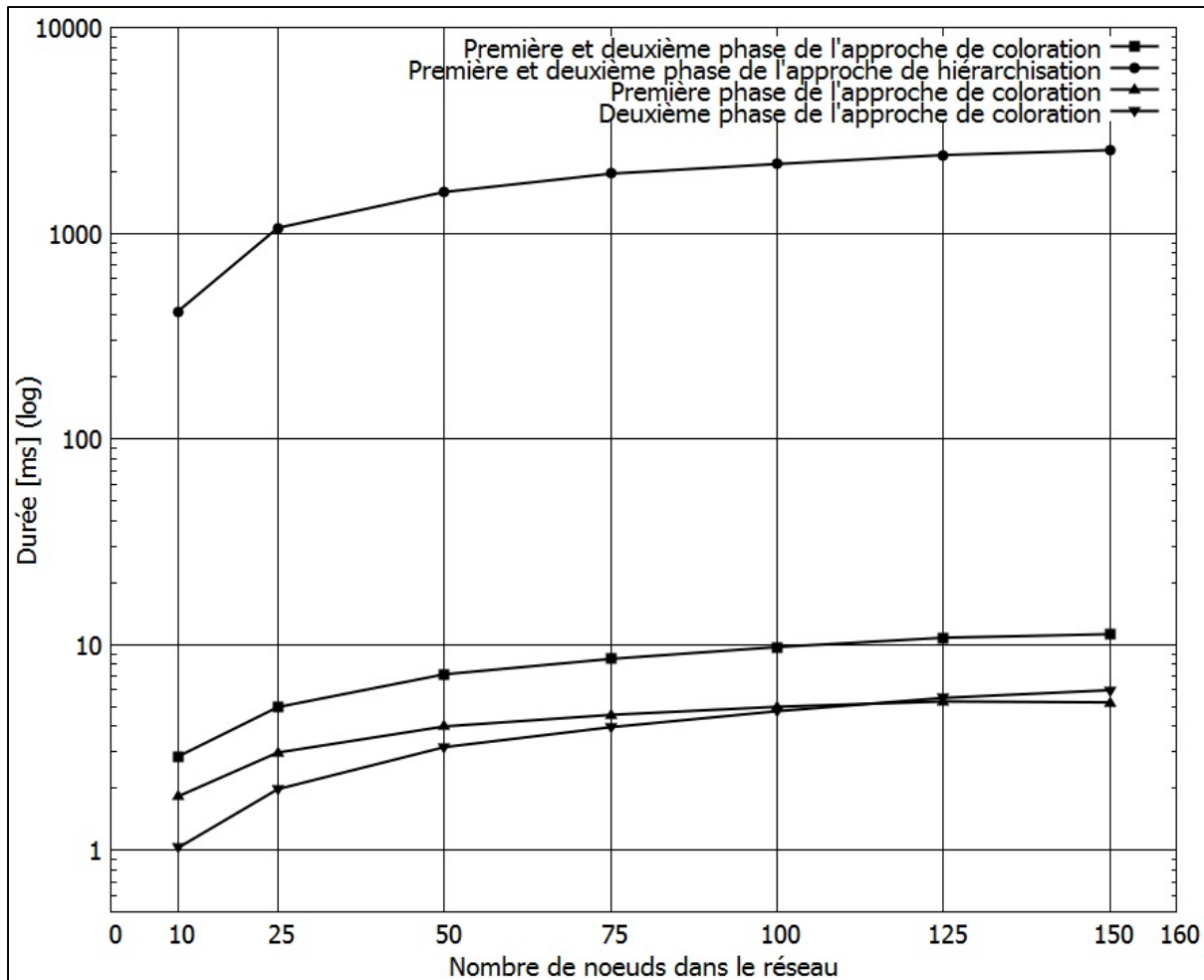


Figure 5.2 La durée nécessaire pour ordonnancer les liens et établir la taille de la sous-trame de données pour les deux approches dans un réseau maillé

La Figure 5.1 et la Figure 5.2 montrent le temps passé pour la transmission de données de contrôle pour le premier scénario et le deuxième scénario de simulations. On observe une différence importante entre les deux approches. Le temps consacré à la transmission de données de contrôle pour l'approche de hiérarchisation varie de 1,074s à 3,046s pour le premier scénario de simulation et de 0,416s à 2,533s pour le deuxième scénario de simulation. Le temps consacré à la transmission de données de contrôle pour l'approche de coloration varie de 4,288ms à 10,075ms pour le premier scénario de simulation et de 2,846ms à 11,211ms pour le deuxième scénario de simulation. La diminution de la durée nécessaire pour ordonnancer les liens est justifiée par l'utilisation de l'algorithme de coloration des sommets à deux distances pour permettre l'exécution simultanée de

l'algorithme d'ordonnancement par plusieurs nœuds. Elle est justifiée aussi par l'utilisation de TDMA pour éviter les collisions pour l'accès au canal de contrôle. On observe que la courbe du temps passé pour la première phase de la méthode de coloration a un comportement similaire à celui du nombre de couleurs nécessaires pour le réseau (Figure 5.5 et Figure 5.6), car la durée de la première phase est fonction du nombre de couleurs nécessaires pour le réseau.

5.2.2 Efficacité dans l'ordonnancement des paquets

Dans cette sous-section, on compare l'efficacité dans l'ordonnancement des paquets. Cette efficacité est mesurée par la taille de la sous-trame de données obtenue par l'ordonnancement. En effet, l'algorithme d'ordonnancement doit assigner des intervalles de temps aux différents liens actifs tout en minimisant la taille de la sous-trame de données.

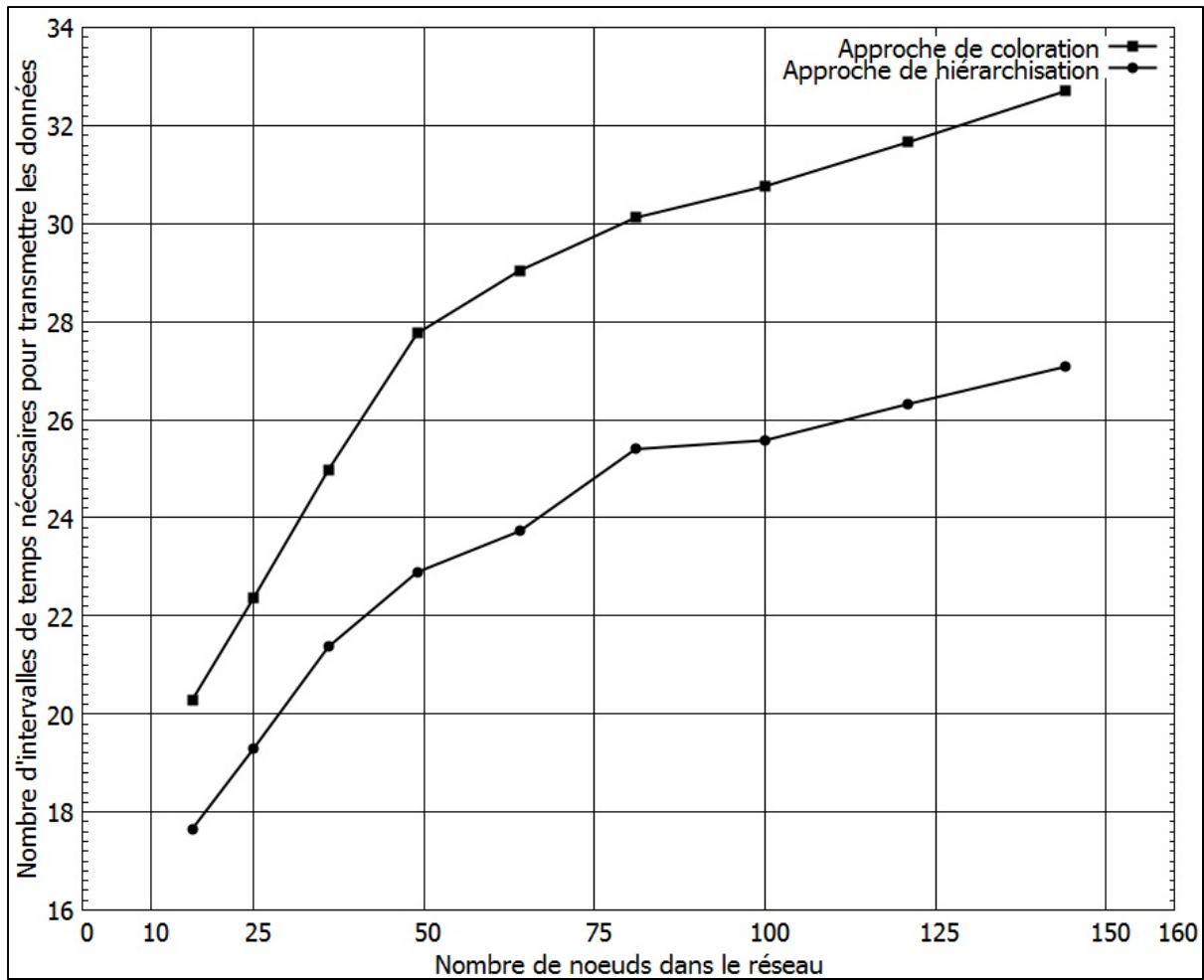


Figure 5.3 La taille de la sous-trame de données pour les deux approches dans un réseau en grille

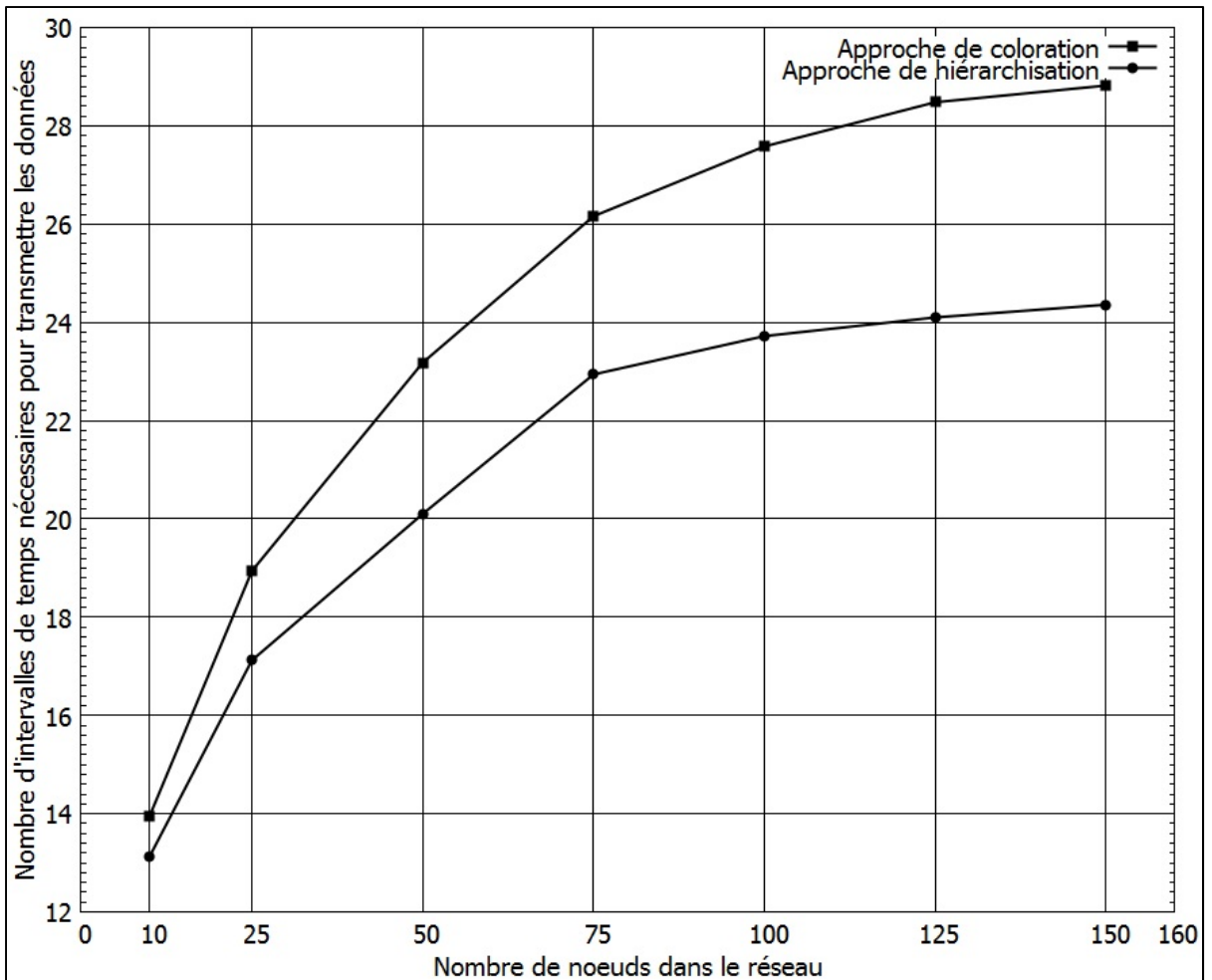


Figure 5.4 La taille de la sous-trame de données pour les deux approches dans un réseau maillé

La Figure 5.3 et la Figure 5.4 montrent le nombre d'intervalles de temps dans la sous-trame de données nécessaires pour transmettre les données pour le premier scénario et pour le deuxième scénario de simulation. On constate que l'approche de hiérarchisation a besoin de moins d'intervalles de temps pour transmettre les données que l'approche de coloration. Dans le cas où le réseau a 144 nœuds (12×12 grille) pour le premier scénario de simulation, on observe une différence de 5,58 intervalles de temps entre les deux approches ce qui représente 3,724ms. Dans le cas où le réseau a 150 nœuds pour le deuxième scénario de simulation, on observe une différence de 4,46 intervalles de temps entre les deux approches qui représente 2,977ms. L'approche de hiérarchisation parvient à ordonnancer de manière plus optimale les liens car elle donne la priorité pour ordonnancer les liens aux nœuds qui ont

un faible ratio entre le nombre de canaux et le nombre de liens. Cependant le gain obtenu par cette efficacité dans l'ordonnancement ne compense pas le temps que nécessite l'approche de hiérarchisation pour ordonnancer les liens. On observe aussi une différence dans la taille de la sous-trame de données entre le premier et le second scénario de simulation car dans le premier scénario, les nœuds sont placés de manière déterministe dans le réseau pour couvrir la zone du réseau et pour maximiser le nombre de voisins de chaque nœud. Par conséquent, cette différence peut s'expliquer par le fait que dans la topologie en grille, le nombre moyen de voisins et les liens sortants à ordonnancer sont plus importants que dans la topologie maillée.

5.2.3 Coloration des nœuds du réseau

Dans cette sous-section, on analyse le nombre de couleurs nécessaires par l'algorithme de coloration des sommets à deux distances pour assigner une couleur à tous les nœuds du réseau.

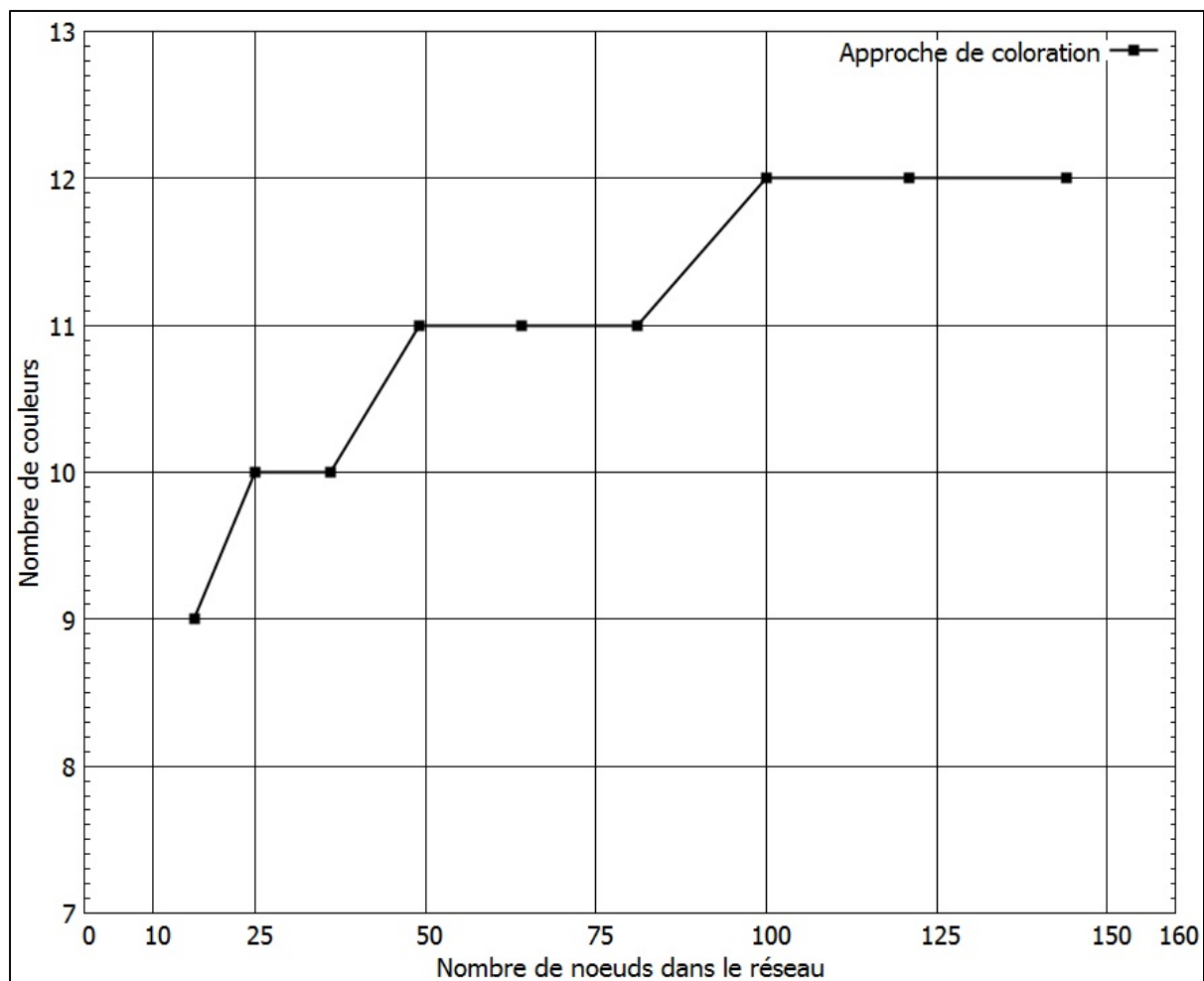


Figure 5.5 Le nombre de couleurs nécessaires pour l'approche de coloration dans un réseau en grille

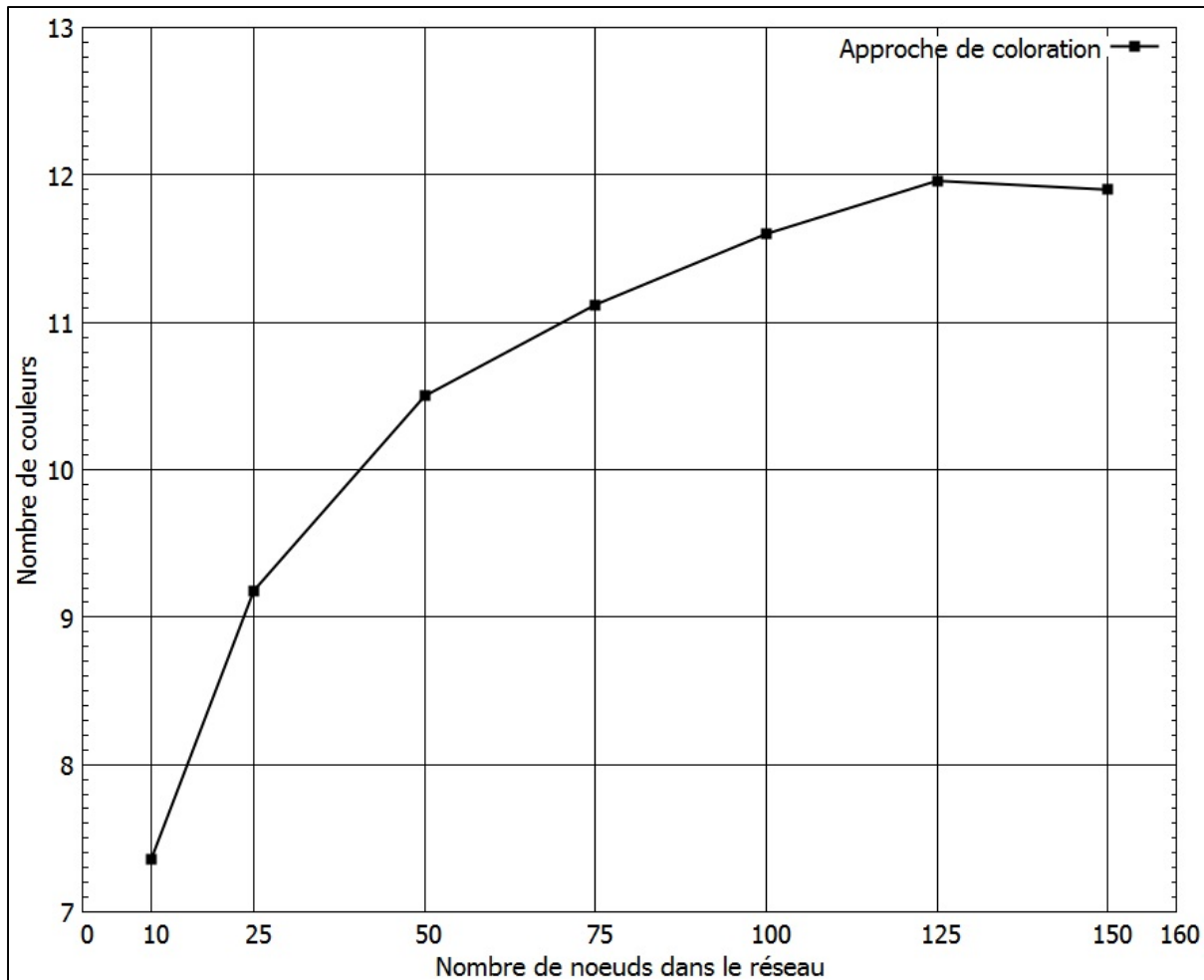


Figure 5.6 Le nombre de couleurs nécessaires pour l'approche de coloration dans un réseau maillé

La Figure 5.5 et la Figure 5.6 montrent le nombre moyen de couleurs nécessaires dans le réseau pour l'approche de coloration dans le premier et le second scénario de simulation. Dans le premier scénario, on observe que le nombre de couleurs devient constant à partir de 100 nœuds dans le réseau. Dans le deuxième scénario, on constate que le nombre moyen de couleurs converge à 11,93 à partir de 125 nœuds dans le réseau. La différence dans le comportement de la courbe du nombre de couleurs entre le premier et le deuxième scénario de simulation est due aux faits que dans le premier scénario de simulations les nœuds sont placés de manière déterministe dans le réseau alors que dans le second scénario de simulations les nœuds sont placés au hasard dans le réseau.

5.2.4 Débit utile

Dans cette section, on compare le débit utile obtenu par les deux approches.

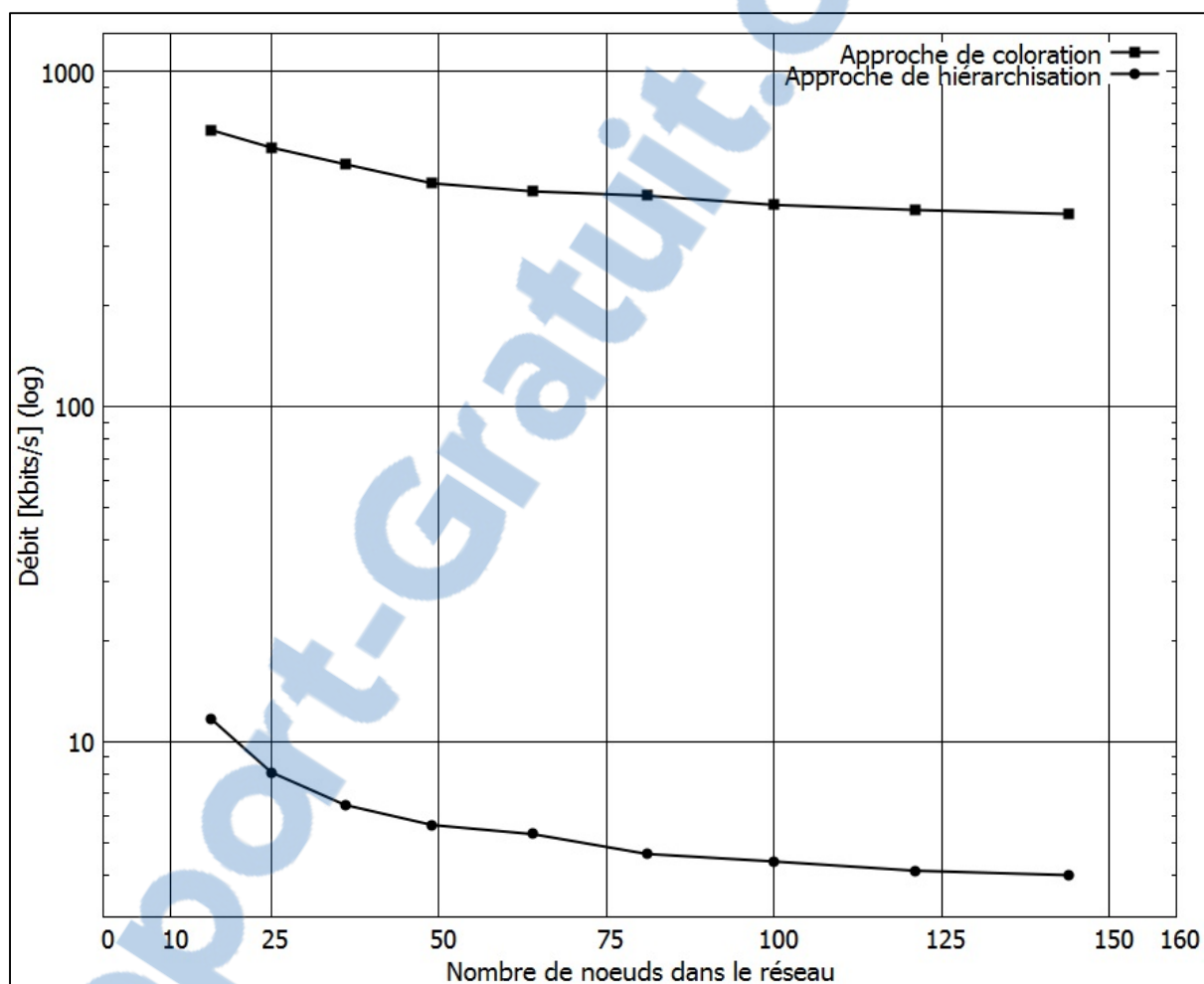


Figure 5.7 Le débit utile moyen pour les deux approches dans un réseau en grille

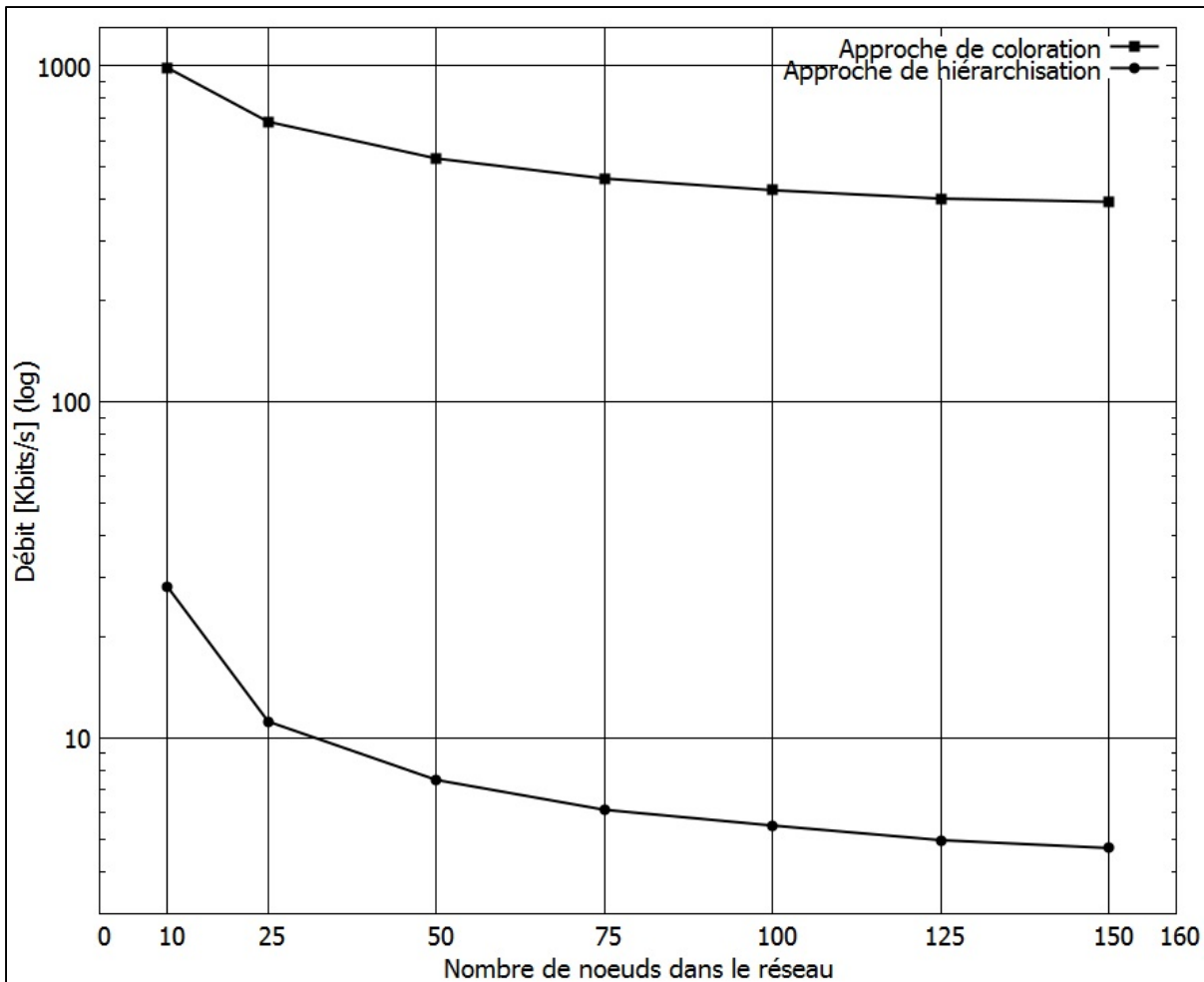


Figure 5.8 Le débit utile moyen pour les deux approches dans un réseau maillé

La Figure 5.7 et la Figure 5.8 montrent le débit utile moyen d'un lien pour le premier scénario et pour le deuxième scénario de simulation. Comme prévu, l'approche de coloration permet d'obtenir un meilleur débit utile que l'approche de hiérarchisation. En effet, l'approche de coloration accomplit un débit utile pour un lien de 375,048 à 672,694 kbit/s pour la topologie en grille et 394,102 à 987,515 kbit/s pour la topologie maillée. Elle accomplit un débit utile pour un nœud de 2,635 à 3,531 Mbit/s pour la topologie en grille et 2,488 à 3,717 Mbit/s pour la topologie maillée. D'autre part, l'approche de hiérarchisation accomplit un débit utile pour un lien de 3,915 à 11,037 kbit/s pour la topologie en grille et 4,705 à 28,2 kbit/s pour la topologie maillée. Elle accomplit un débit utile pour un nœud de 27,519 à 57,945 kbit/s pour la topologie de réseau et 29,713 à 106,146 kbit/s pour la topologie maillée. La différence

majeure dans le débit utile entre les deux approches peut être expliquée par le fait que l'approche de hiérarchisation nécessite plus de temps pour ordonnancer les liens.

5.3 Variation du nombre de nœuds dans le réseau

Cette section présente les résultats des simulations pour l'approche de hiérarchisation et l'approche de coloration dans un réseau maillé dans lequel on augmente la densité des nœuds dans le réseau. Dans les simulations, les nœuds ont une portée de communication de 150m. Le nombre de canaux disponibles au niveau de chaque nœud est choisi aléatoirement entre 1 et 25. L'identité du canal est choisie entre 1 et 50. Dans le premier scénario de simulation, les nœuds sont placés pour former un réseau en grille dans une zone carrée de 467m × 467m. Le nombre de nœuds dans le réseau est de 4, 9, 16, 25 et 36. Dans le deuxième scénario de simulation, les nœuds sont placés de manière aléatoire dans une zone carrée de 467m × 467m dans laquelle sont placés 5, 10, 15, 20 et 25 nœuds.

5.3.1 Durée d'exécution de l'ordonnancement

Dans cette section, on examine le temps passé pour les deux approches pour effectuer l'ordonnancement des paquets dans le réseau avant d'envoyer les paquets de données.

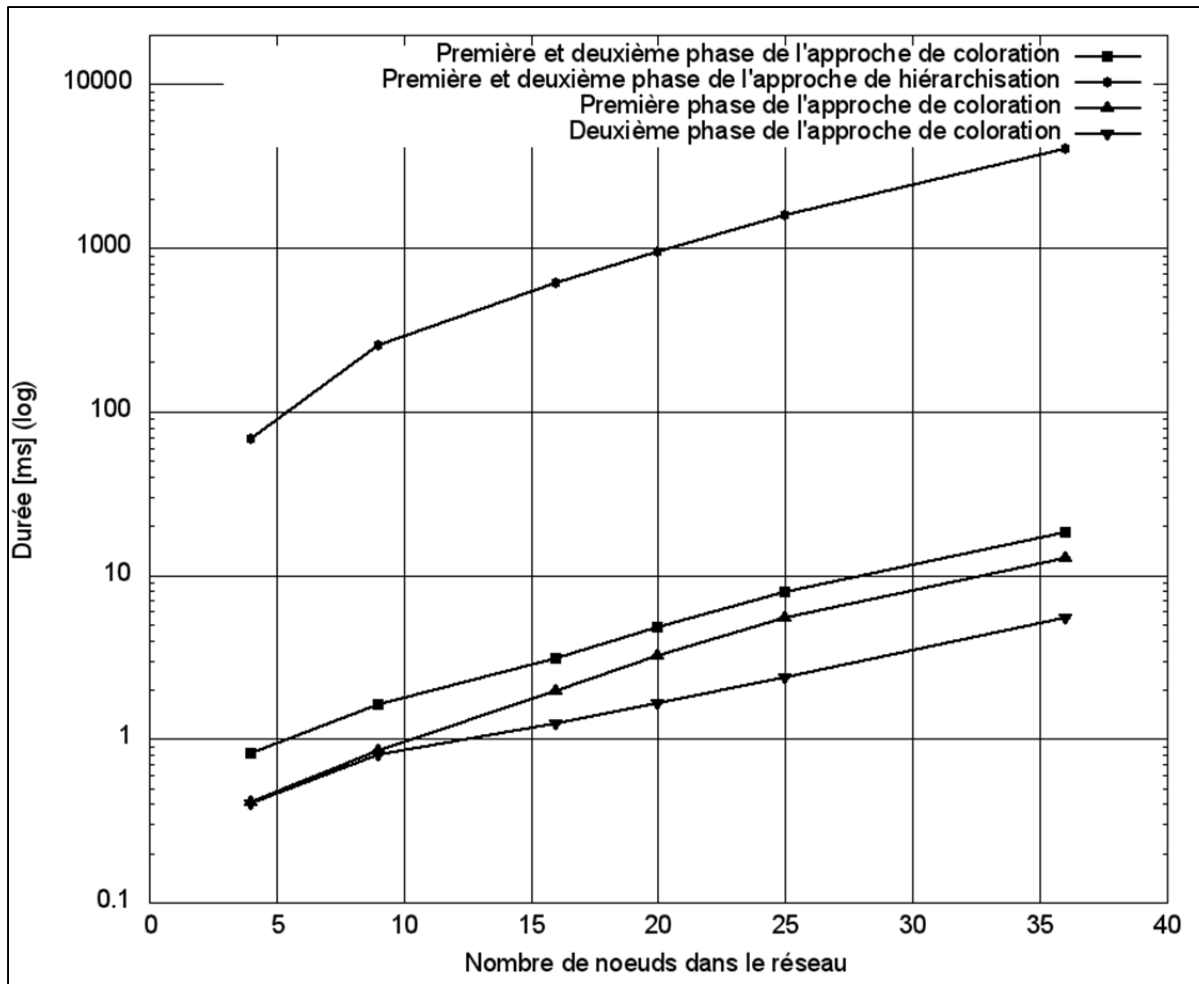


Figure 5.9 La durée nécessaire pour ordonnancer les liens et établir la taille de la sous-trame de données pour les deux approches dans un réseau en grille

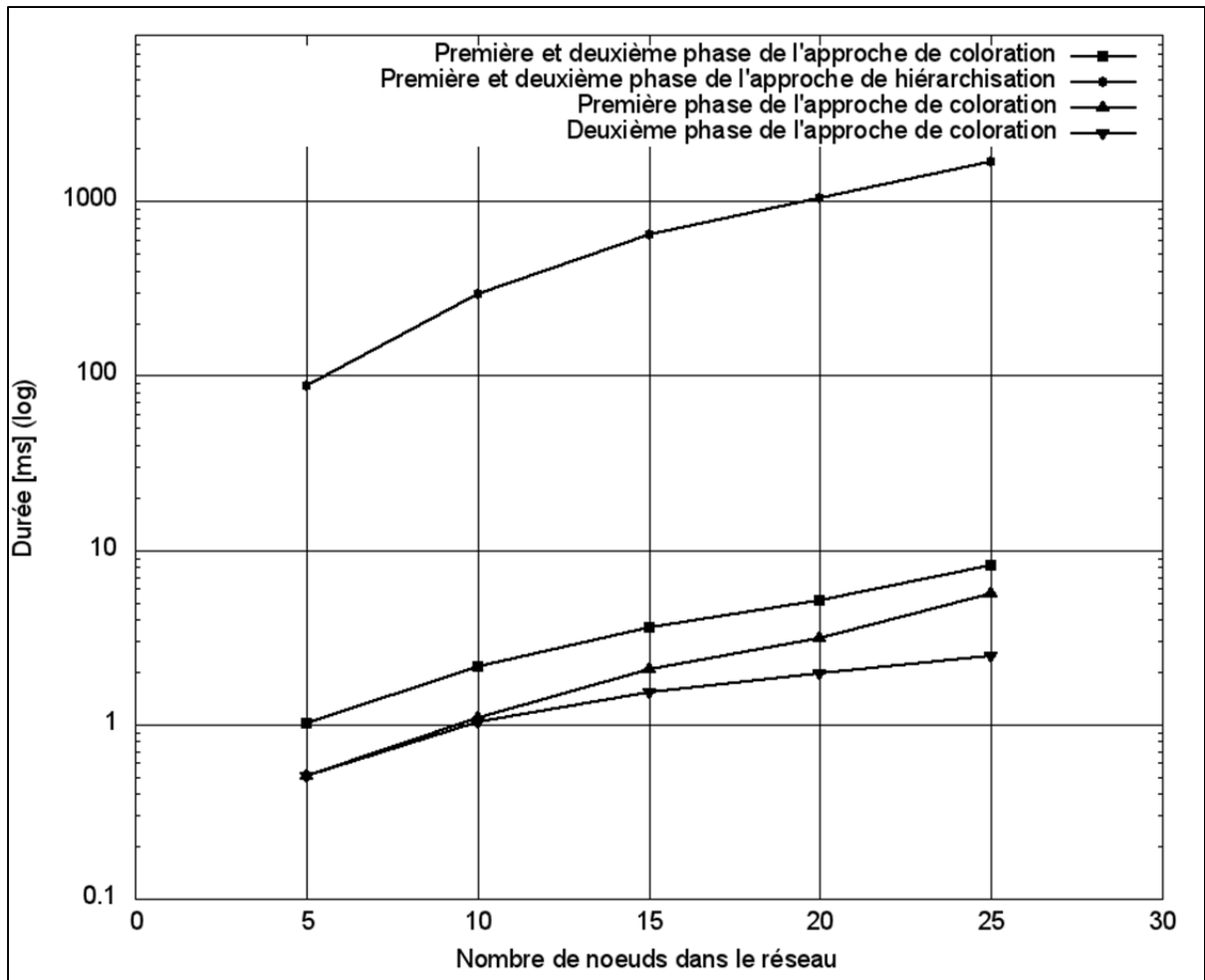


Figure 5.10 La durée nécessaire pour ordonnancer les liens et établir la taille de la sous-trame de données pour les deux approches dans un réseau maillé

La Figure 5.9 et la Figure 5.10 montrent le temps passé pour la transmission de données de contrôle dans le cas de l'augmentation du nombre de nœuds dans le réseau dans le premier et le second scénario de simulation. On observe une différence importante entre les deux approches. Le temps consacré à la transmission de données de contrôle pour l'approche de hiérarchisation varie de 67,342ms à 4,003s pour le premier scénario et varie de 87,667ms à 1,693s dans le deuxième scénario. Le temps consacré à la transmission de données de contrôle pour l'approche de coloration varie de 0,861ms à 18,211ms dans le premier scénario et varie de 1,013ms à 8,133ms dans le deuxième scénario. On remarque que l'augmentation du nombre de nœuds dans le réseau résulte en une augmentation plus rapide du temps consacré à la transmission de données de contrôle pour l'approche de hiérarchisation que

pour l'approche de coloration. En effet, le temps consacré à la transmission de données de contrôle a été multiplié par 59 dans le premier scénario et par 19 dans le deuxième scénario pour l'approche de hiérarchisation. Il a été multiplié par 21 dans le premier scénario et par 8 dans le deuxième scénario pour l'approche de coloration.

5.3.2 Efficacité dans l'ordonnement des paquets

Dans cette sous-section, on compare l'efficacité dans l'ordonnement des paquets.

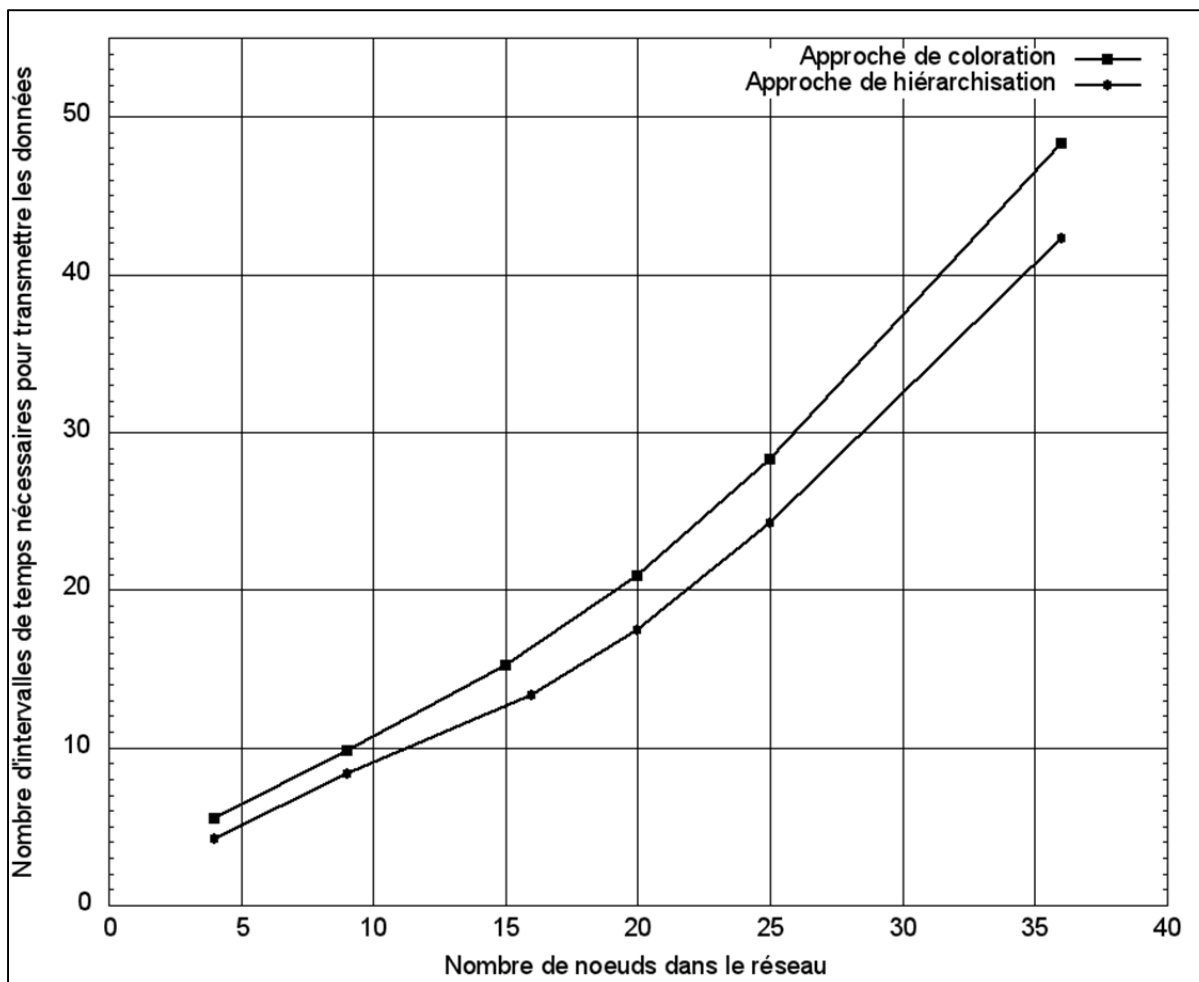


Figure 5.11 La taille de la sous-trame de données pour les deux approches dans un réseau en grille

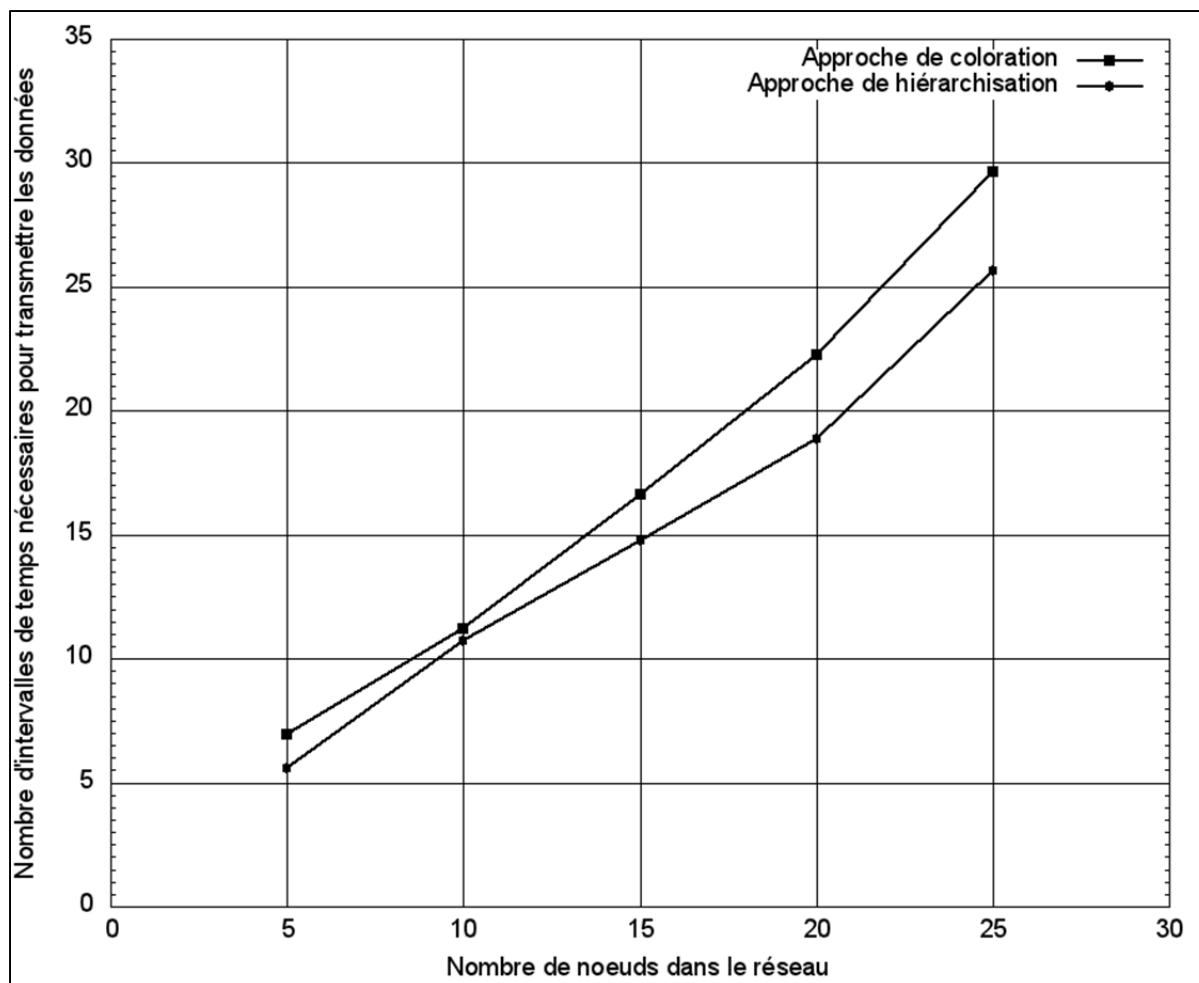


Figure 5.12 La taille de la sous-trame de données pour les deux approches dans un réseau maillé

La Figure 5.11 et la Figure 5.12 montrent le nombre d'intervalles de temps nécessaires dans la sous-trame de données pour transmettre les données dans le cas de l'augmentation du nombre de nœuds dans le réseau dans le premier et le second scénario de simulation. On constate que l'approche de hiérarchisation a besoin de moins d'intervalle de temps pour transmettre les données que l'approche de coloration. La différence entre l'approche de hiérarchisation et l'approche de coloration accroît avec l'augmentation du nombre de nœuds car le nombre de liens à ordonnancer augmente. En effet, l'approche de hiérarchisation présente une meilleure efficacité dans l'ordonnancement par rapport l'approche de coloration quand le nombre de liens devient plus important que le nombre d'intervalles de temps disponibles.

5.3.3 Coloration des nœuds du réseau

Dans cette sous-section, on analyse le nombre de couleurs nécessaires par l'algorithme de coloration des sommets à deux distances pour assigner une couleur à tous les nœuds du réseau maillé.

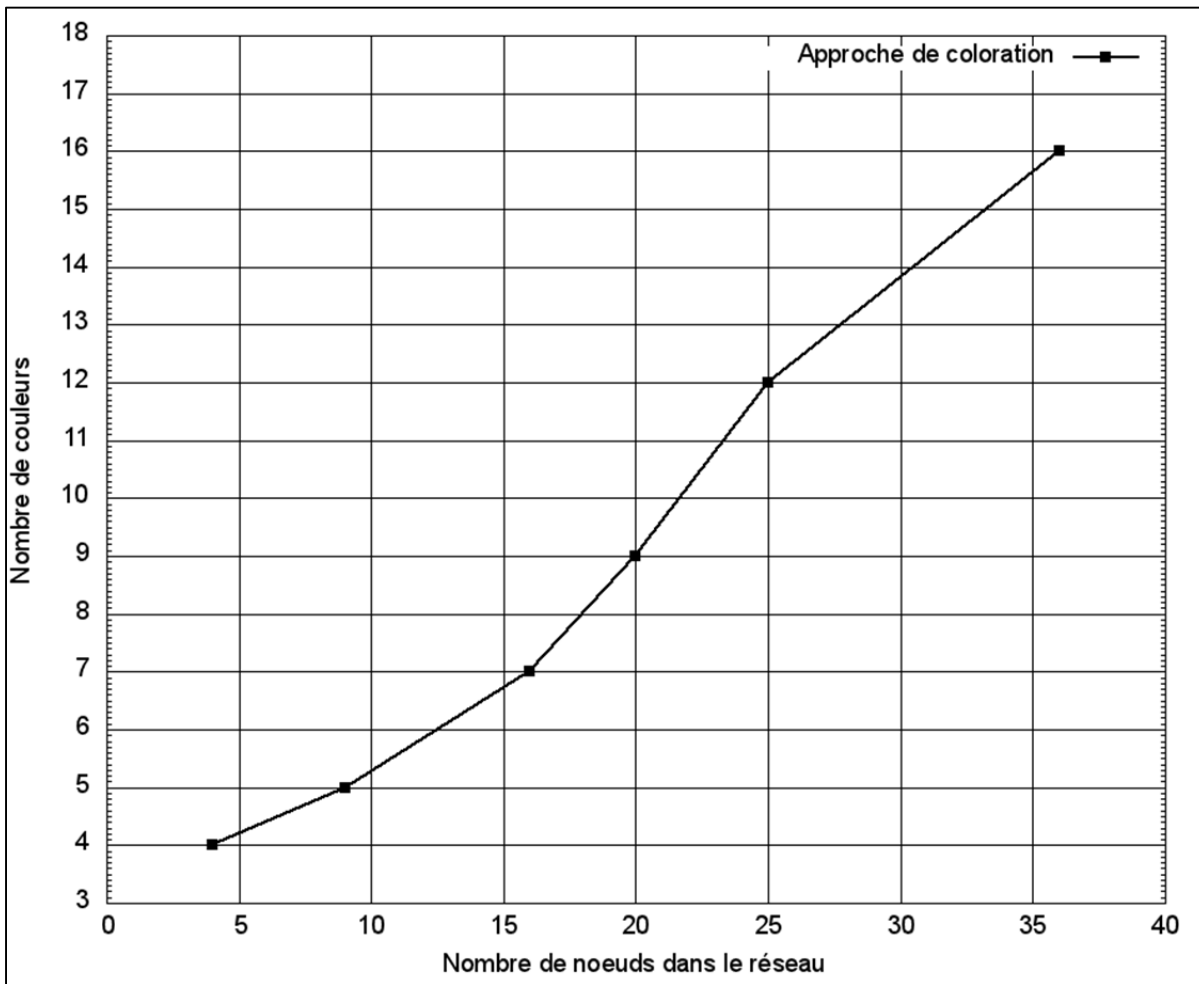


Figure 5.13 Le nombre de couleurs nécessaires pour l'approche de coloration dans un réseau en grille

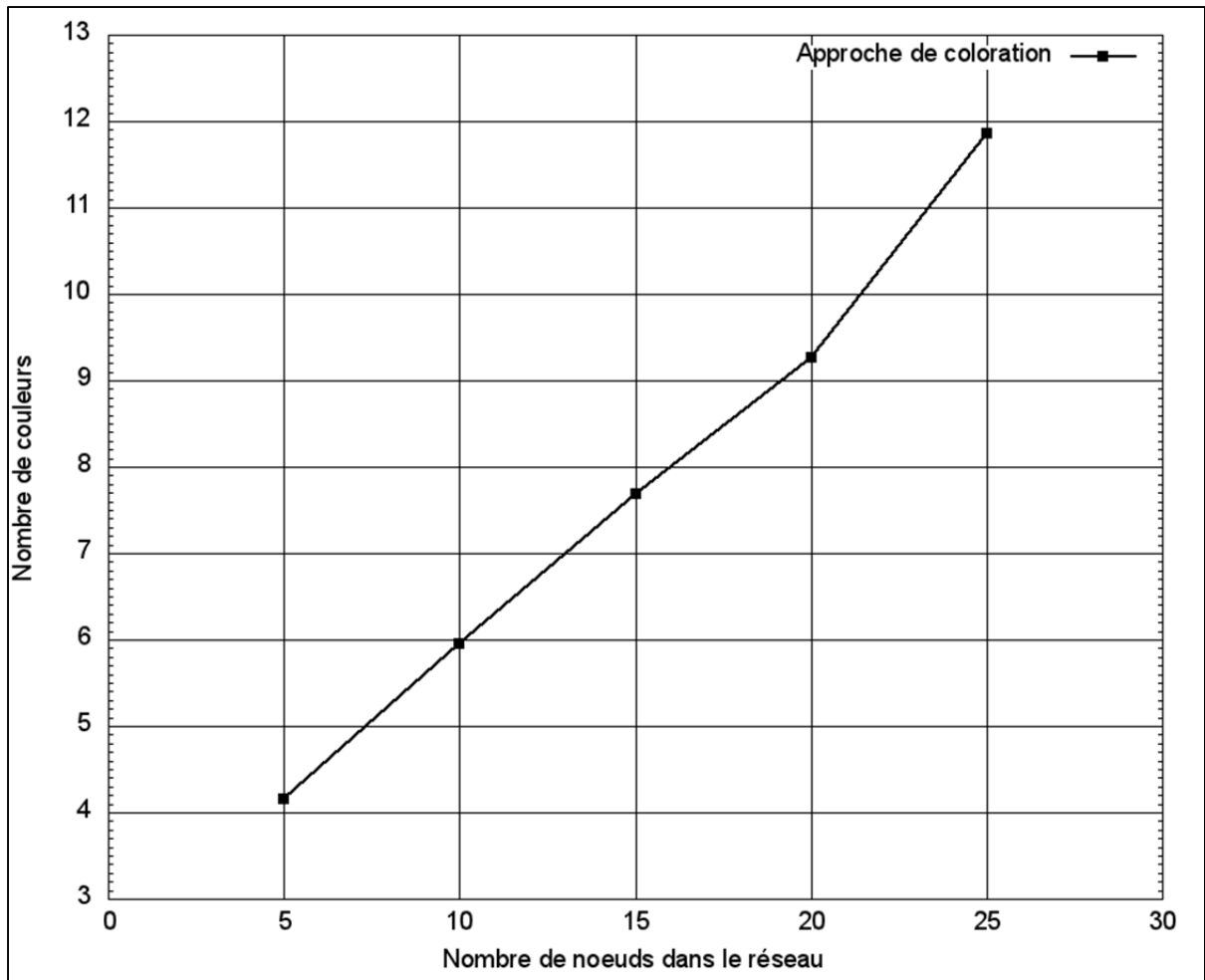


Figure 5.14 Le nombre de couleurs nécessaires pour l'approche de coloration dans un réseau maillé

La Figure 5.13 et la Figure 5.14 montrent le nombre moyen de couleurs nécessaires dans le réseau pour l'approche de coloration dans le cas de l'augmentation du nombre de nœuds dans le réseau dans le premier et le second scénario de simulation. Dans le premier scénario de simulation, on observe que le nombre moyen de couleurs nécessaires dans le réseau a été multiplié par 4 en augmentant le nombre de nœuds de 4 à 36 nœuds. Dans le second scénario de simulation, on observe que le nombre moyen de couleurs nécessaires dans le réseau a été multiplié par 3 en augmentant le nombre de nœuds de 5 à 25 nœuds.

5.3.4 Débit utile

Dans cette section, on compare le débit utile obtenu par les deux approches.

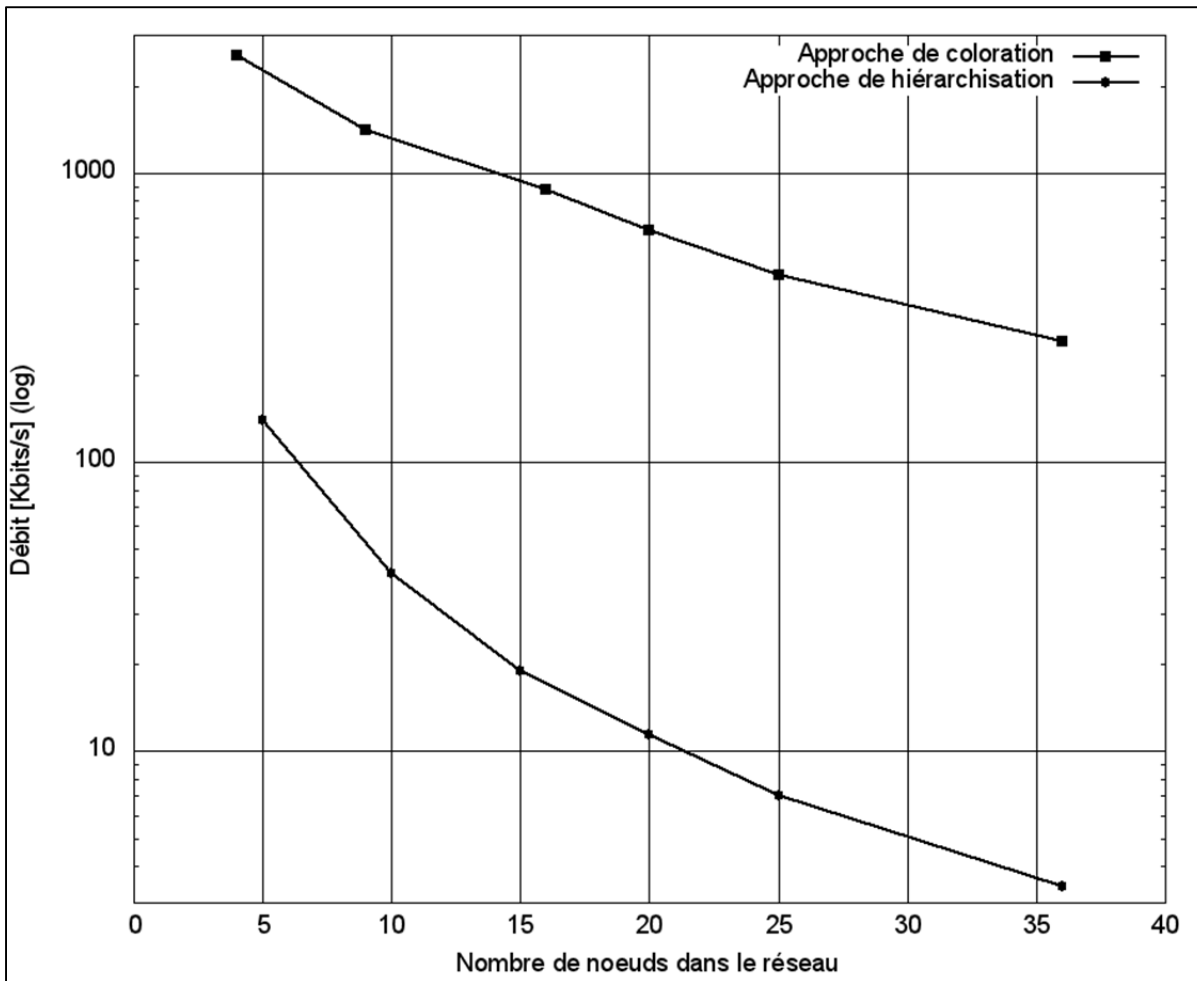


Figure 5.15 Le débit utile moyen pour les deux approches dans un réseau en grille

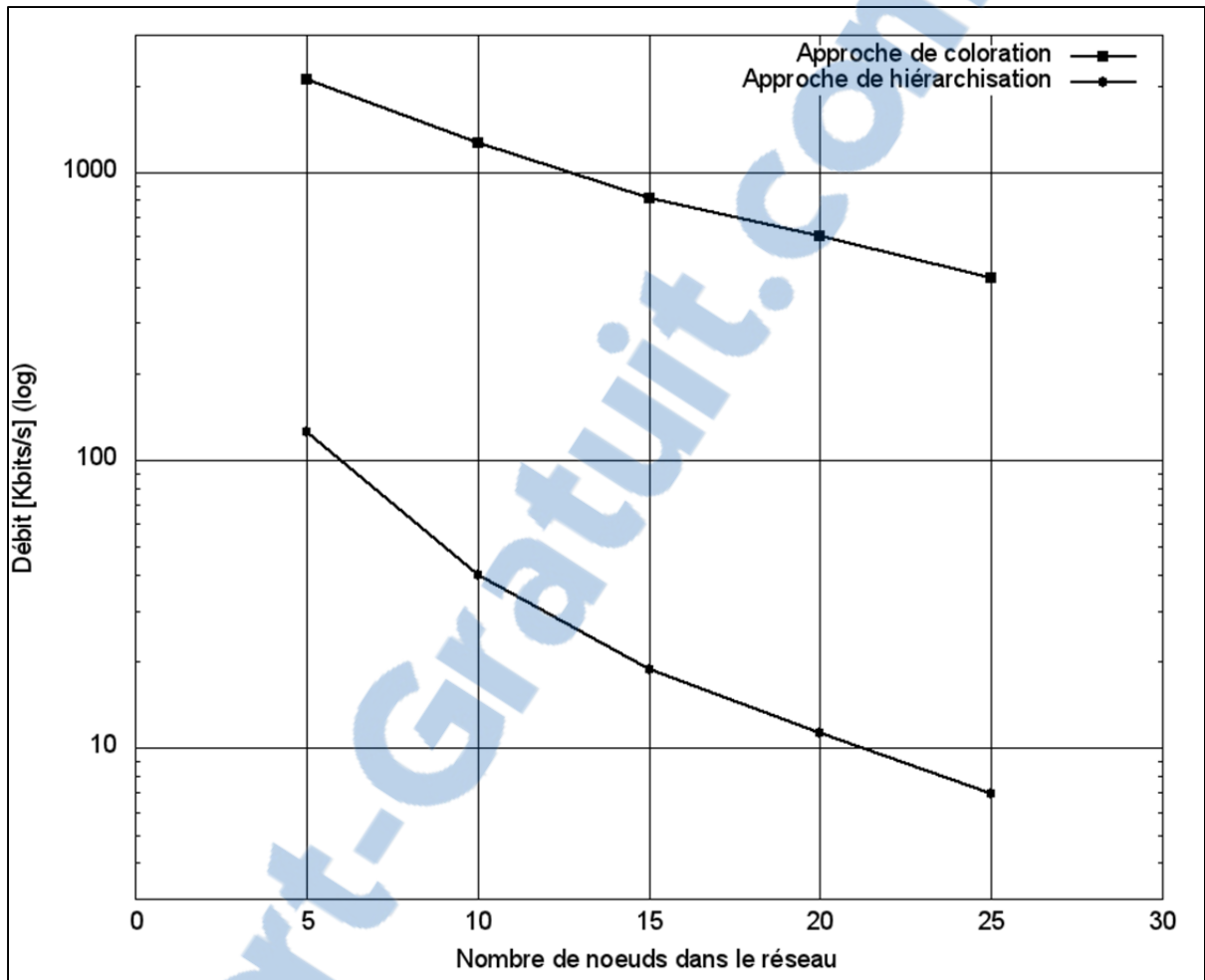


Figure 5.16 Le débit utile moyen pour les deux approches dans un réseau maillé

La Figure 5.15 et la Figure 5.16 montrent le débit utile moyen d'un lien dans le cas de l'augmentation du nombre de nœuds dans le réseau dans le premier et le second scénario de simulation. L'approche de coloration permet d'obtenir un meilleur débit utile que l'approche de hiérarchisation. En effet, l'approche de coloration accomplit un débit utile pour un lien de 0,261 à 2,564 Mbit/s dans le premier scénario et de 0,429 à 2,112 Mbit/s dans le second scénario. D'autre part, l'approche de hiérarchisation enregistre un débit utile pour un lien de 3,421 à 139,812 kbit/s dans le premier scénario et de 6,988 à 125,234 kbit/s dans le second scénario. On observe que le débit utile moyen d'un lien diminue plus rapidement pour l'approche de hiérarchisation que l'approche de coloration. Avec l'augmentation du nombre de nœuds, dans le premier scénario, le débit utile moyen pour un lien est divisé par 41 pour

l'approche de hiérarchisation et par 10 pour l'approche de coloration. Dans le second scénario, il est divisé par 18 pour l'approche de hiérarchisation et par 5 pour l'approche de coloration. L'impact de l'augmentation du nombre de nœuds dans le réseau est plus important pour l'approche de hiérarchisation que pour l'approche de coloration car le temps nécessaire pour ordonnancer les paquets pour l'approche de hiérarchisation dépend fortement du nombre de nœuds dans le réseau.

5.4 Variation du nombre de canaux dans le réseau

Cette section présente les résultats des simulations pour l'approche de hiérarchisation et l'approche de coloration dans un réseau maillé dans lequel on augmente le nombre de canaux disponibles. Dans les simulations, les nœuds ont une portée de communication de 250m. Les nœuds partagent les mêmes canaux disponibles. Le nombre de canaux dans le réseau est augmenté de 1 à 15. Dans le premier scénario de simulation, les nœuds sont placés pour former un réseau en grille. Le nombre de nœuds dans le réseau est de 25. Dans le deuxième scénario de simulation, les nœuds sont placés de manière aléatoire dans une zone carrée de 500m x 500m dans laquelle sont placés 25 nœuds.

5.4.1 Durée d'exécution de l'ordonnement

Dans cette sous-section, on examine le temps passé pour les deux approches pour effectuer l'ordonnement des paquets dans le réseau avant d'envoyer les paquets de données. Le temps consacré à la transmission de données de contrôle ne varie pas car le nombre de nœuds dans le réseau reste le même. L'augmentation du nombre de canaux n'a pas d'impact. Le temps consacré à la transmission de données de contrôle pour l'approche de hiérarchisation est de 5,054s dans le premier scénario et de 5,542s dans le second scénario. Le temps consacré à la transmission de données de contrôle pour l'approche de coloration est de 20,312ms dans le premier scénario et de 21,947ms dans le second scénario.

5.4.2 Efficacité dans l'ordonnement des paquets

Dans cette sous-section, on compare la taille de la sous-trame de données obtenue par l'ordonnement.

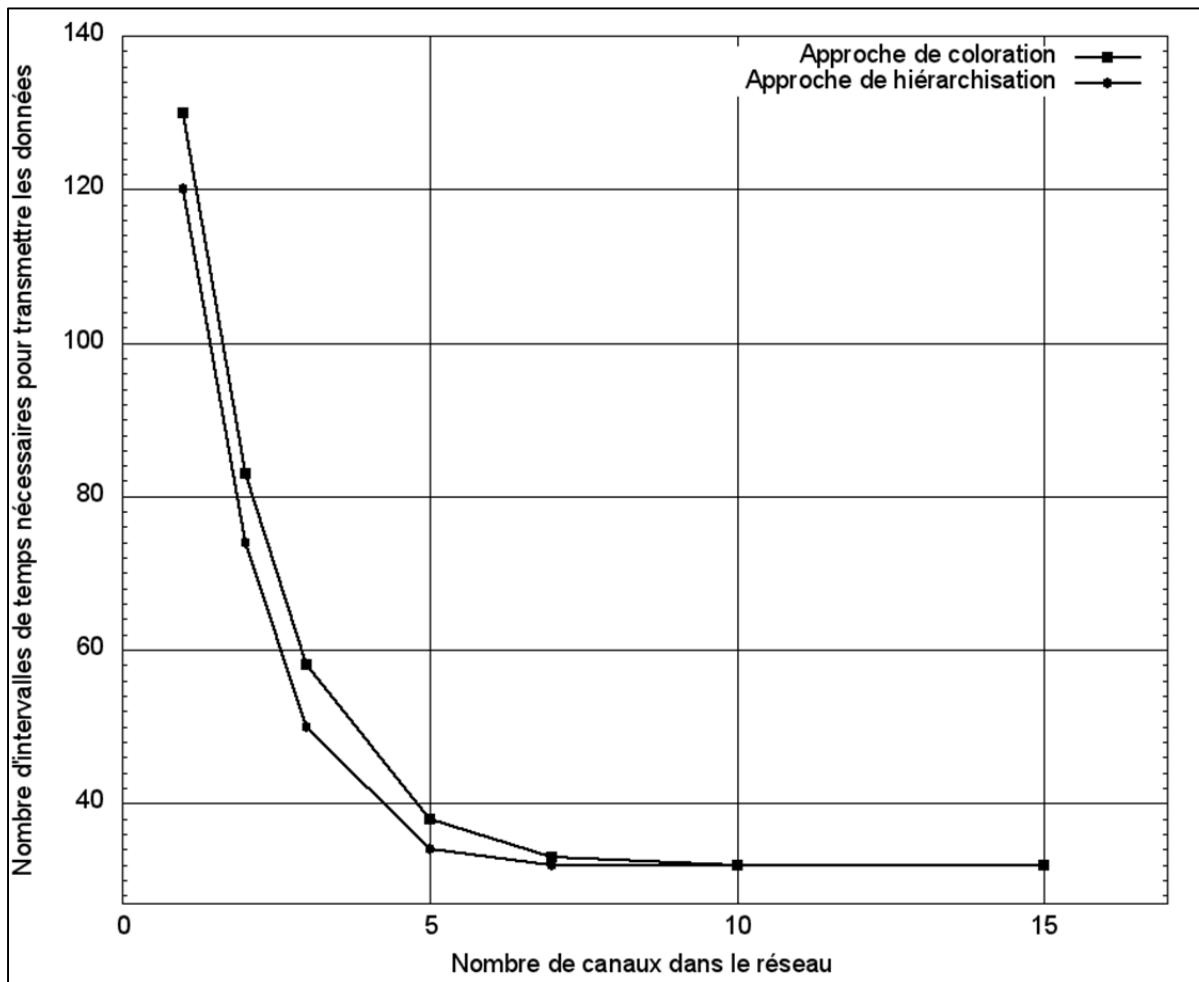


Figure 5.17 La taille de la sous-trame de données pour les deux approches dans un réseau en grille

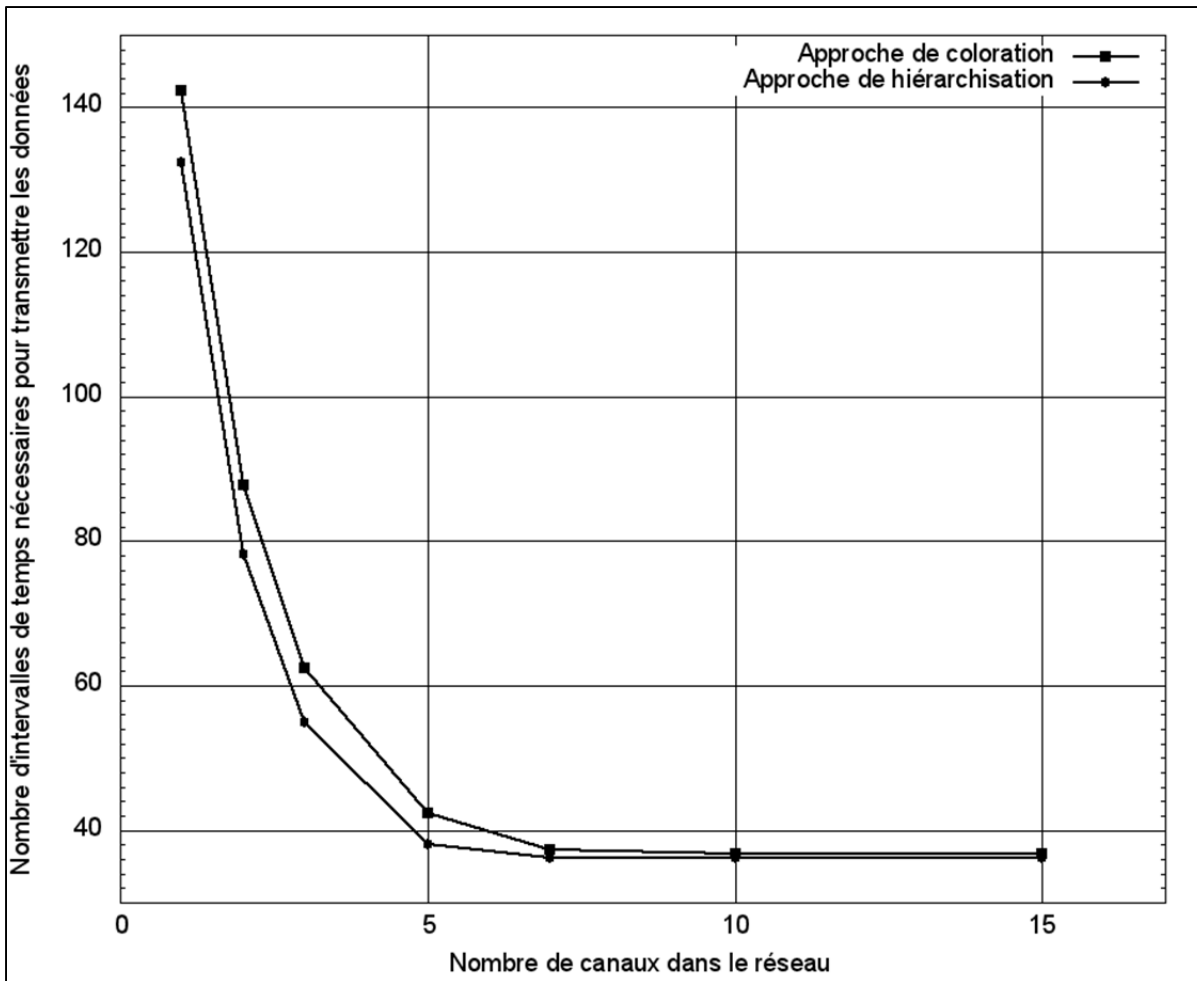


Figure 5.18 La taille de la sous-trame de données pour les deux approches dans un réseau maillé

La Figure 5.17 et la Figure 5.18 montrent le nombre d'intervalles de temps nécessaires dans la sous-trame de données pour transmettre les données dans le cas de l'augmentation du nombre de canaux dans le réseau. On constate que l'approche de hiérarchisation a besoin de moins d'intervalles de temps pour transmettre les données que l'approche de coloration quand le nombre de canaux disponibles est inférieur à 7. Quand le nombre de canaux est égal ou supérieur à 7, on observe qu'il y a une très faible différence entre la taille de la sous-trame de données pour les deux approches. En effet, l'augmentation du nombre de canaux rend l'ordonnement moins complexe car le nombre d'intervalles de temps disponibles est plus important que le nombre de liens à ordonner. Ainsi, dans cette situation, l'approche de hiérarchisation n'offre pas un meilleur ordonnancement et nécessite une durée importante

pour ordonnancer les liens. On observe aussi que la taille de la sous-trame de données ne descend pas en dessous d'un certain seuil car les contraintes d'ordonnement définies dans la sous-section 4.2 doivent être remplies et dépendent de la disposition des nœuds dans le réseau et du nombre moyen de voisins.

5.4.3 Coloration des nœuds du réseau

Dans cette sous-section, on analyse le nombre de couleurs nécessaires par l'algorithme de coloration des sommets à deux distances pour assigner une couleur à tous les nœuds du réseau maillé. Le nombre moyen de couleurs nécessaires dans le réseau est 18 pour le premier scénario et 19,74 pour le second scénario. Ce nombre ne varie pas avec l'augmentation des canaux car la coloration dépend de nombre nœuds dans le réseau qui reste inchangé. Le nombre de nœuds dans le réseau est de 25 nœuds.

5.4.4 Débit utile

Dans cette sous-section, on compare le débit utile obtenu par les deux approches.

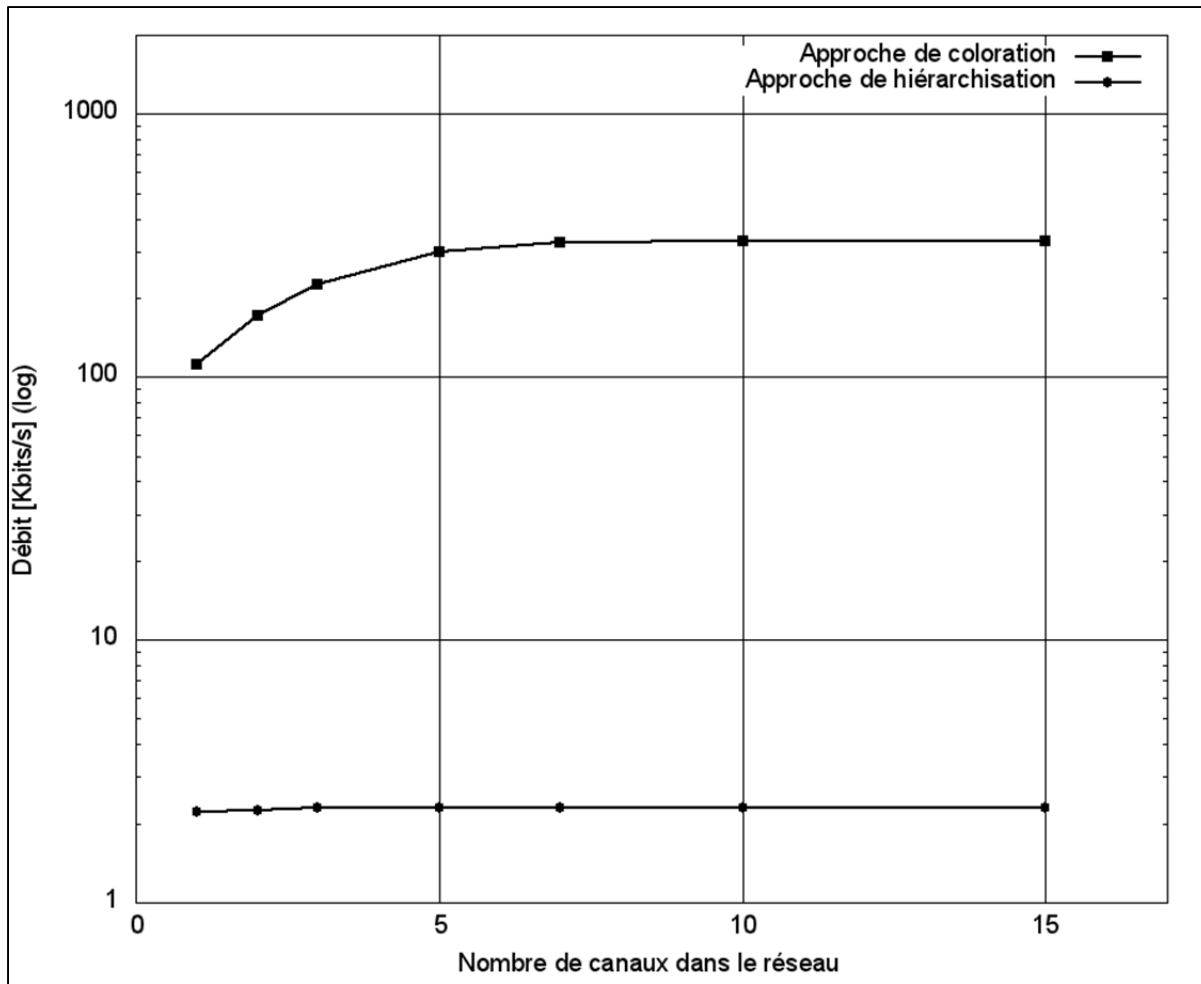


Figure 5.19 Le débit utile moyen pour les deux approches dans un réseau en grille

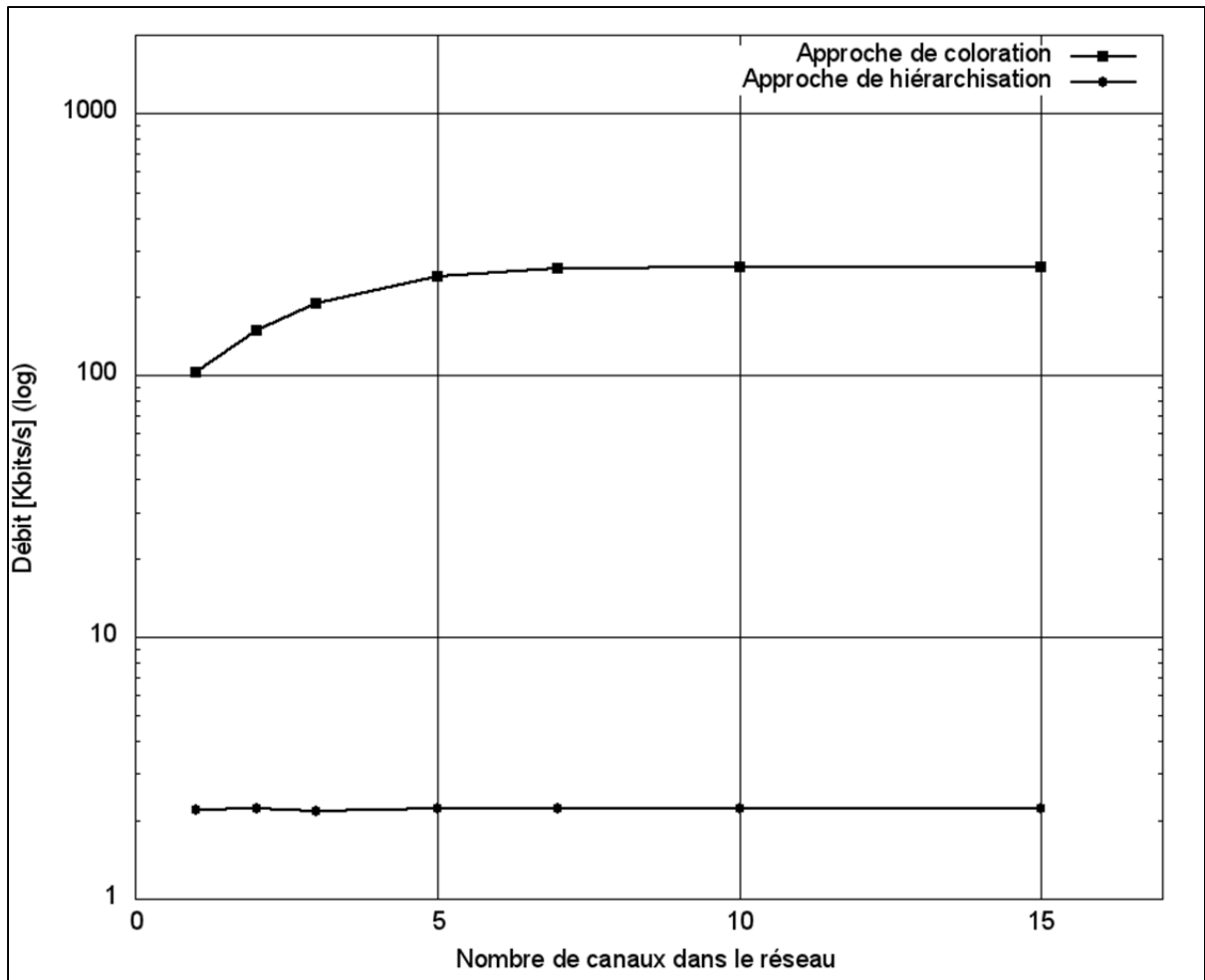


Figure 5.20 Le débit utile moyen pour les deux approches dans un réseau maillé

La Figure 5.19 et la Figure 5.20 montrent le débit utile moyen d'un lien dans le cas de l'augmentation du nombre de nœuds dans le réseau. L'approche de coloration permet d'obtenir un meilleur débit utile que l'approche de hiérarchisation. En effet, l'approche de coloration accomplit un débit utile pour un lien de 112,172 à 328,668 kbit/s pour le premier scénario et de 102,583 à 258,003 kbit/s pour le second scénario. L'augmentation de canaux engendre une augmentation de débit utile car la taille de la sous-trame de données diminue. D'autre part, l'approche de hiérarchisation accomplit un débit utile pour un lien de 2,223 à 2,300 kbit/s pour le premier scénario et de 2,199 à 2,216 kbit/s pour le second scénario. Pour l'approche de hiérarchisation, le débit utile moyen reste quasiment constant malgré la diminution de la taille de la sous-trame de données. Le gain de temps obtenu par la

diminution de la taille de la sous-trame de donnée est extrêmement faible par rapport au temps nécessaire pour ordonnancer les liens. Ainsi, l'impact de l'augmentation du nombre de canaux pour l'approche de hiérarchisation est extrêmement faible.

5.5 Conclusion

On observe que l'approche de coloration utilise les canaux de manière plus efficace que l'approche de hiérarchisation. Dans l'approche de coloration, le temps passé pour la transmission de données représente 68,51% à 75,96% pour la topologie en grille et de 63,17% à 76,57% pour la topologie maillée. D'autre part, dans l'approche de hiérarchisation, le temps passé pour la transmission de données représente 0,59% à 1,13% pour la topologie en grille et de 0,63% à 2,05% pour la topologie maillée. Par conséquent, l'approche de coloration fournit une meilleure utilisation des canaux que l'approche de hiérarchisation.

Les résultats montrent aussi que l'approche de coloration permet un meilleur passage à l'échelle. En effet, l'algorithme de coloration des sommets à deux distances permet de parvenir à un meilleur passage à l'échelle car l'exécution de l'algorithme d'ordonnancement dépend du nombre des couleurs dans le réseau. Ceci permet aux nœuds qui ont la même couleur d'ordonnancer leurs liens sortants en même temps. En outre, l'utilisation de la méthode TDMA pour envoyer les paquets sur le canal de contrôle réduit la quantité de paquets de contrôle envoyés et la durée d'exécution de l'algorithme d'ordonnancement. De plus, l'approche de la coloration permet aux liens de transmettre un paquet avec un délai inférieur à celui de l'approche de hiérarchisation. Par conséquent, la méthode de coloration présente un avantage pour les applications en temps réel.

Lors de la variation du nombre de nœuds et du nombre de canaux dans le réseau, l'approche de coloration conserve de meilleures performances que l'approche de hiérarchisation. En effet, lorsque le réseau présente une forte densité de nœuds ou le réseau a un faible nombre

de canaux disponibles, l'approche de coloration réalise des performances acceptables et largement supérieures à celles de l'approche de hiérarchisation.

L'approche de hiérarchisation présente une meilleure planification car l'algorithme d'ordonnancement donne la priorité aux nœuds qui présentent un faible rapport entre le nombre de canaux découverts et le nombre de liens à ordonnancer. Cependant l'approche de hiérarchisation a besoin d'un nombre important de paquets de contrôle échangés afin d'ordonnancer efficacement les liens conduisant ainsi à avoir une utilisation non efficace des canaux et un débit moyen très faible.

CONCLUSION

Dans le cadre de ce travail, on a proposé un algorithme d'ordonnancement décentralisé au niveau de la couche MAC des réseaux maillés radio cognitive. Cet algorithme permet de répondre aux nouveaux défis des CWMN. En effet, l'algorithme permet d'ordonner la transmission des trames de données de manière décentralisée dans un environnement dynamique dans lequel les canaux disponibles varient dans l'espace et le temps. L'approche utilise l'algorithme de coloration des sommets à deux distances pour permettre une exécution simultanée de l'algorithme d'ordonnancement par les nœuds dans le réseau. Il utilise également le système TDMA pour éviter toutes collisions lors de l'accès au support de transmission.

On a comparé notre approche à une autre approche existante, qui est désignée comme l'approche de hiérarchisation. Les résultats montrent une amélioration significative en termes de passage à l'échelle, de débit utile, d'utilisation efficace des canaux, de diminution de quantité de données de contrôle envoyées, de durée d'exécution de l'ordonnancement et de la taille de la trame. En effet, l'algorithme de coloration des sommets à deux distances permet de parvenir à un meilleur passage à l'échelle car l'exécution de l'algorithme d'ordonnancement dépend du nombre des couleurs dans le réseau. Ceci permet aux nœuds qui ont la même couleur d'ordonner en même temps leurs liens sortants. En outre, l'utilisation de la méthode TDMA pour envoyer les paquets sur le canal de contrôle réduit la quantité de paquets de contrôle envoyés et la durée d'exécution de l'algorithme d'ordonnancement.

D'autre part, l'approche de coloration permet de répondre aux exigences de différents types d'applications telles que les applications temps réel et non temps réel. L'approche de coloration accomplit un débit utile pour un lien de 375,048 à 987,515 kbit/s et un débit utile pour un nœud de 2,488 à 3,717 Mbit/s. Le temps consacré à la transmission d'une trame pour l'approche de coloration varie de 12,151ms à 31,913ms. Cependant, l'approche de

hiérarchisation permet d'obtenir une meilleure longueur de trame, mais l'écart est négligeable par rapport aux avantages apportés par l'approche de coloration.

Dans les travaux futurs, on peut envisager d'améliorer l'algorithme d'ordonnancement en concevant différents niveaux de qualité de service. Ces différents niveaux de qualité de service vont permettre à différents types d'applications (applications temps réel, non temps réel, etc) de fonctionner dans le réseau.

ANNEXE I

ARTICLE PUBLIÉ

Cette annexe contient l'article que j'ai publié en tant que premier auteur à la septième conférence Advanced International Conference on Telecommunications (AICT) qui a eu lieu à Saint-Martin, Antilles Néerlandaises du 20 au 25 mars 2011 (Msakni, Dung et al. 2011).

A Scalable Decentralized MAC Scheduling for Cognitive Wireless Mesh Network

Mehdi Msakni, Luong Dinh Dung, Mohamad Haidar and Zbigniew Dziong

Electrical Engineering Department
Ecole de Technologie Supérieure (ETS)
Montréal, Québec, Canada
e-mail : mehdi.msakni.1@ens.etsmtl.ca

Abstract— Cognitive Wireless Mesh Networks (CWMN) is a promising technology that combines the advantages of Wireless Mesh Networks (WMN) with the capacity enhancement feature due to the use of available channels discovered with cognitive radio technology. In CWMN, Medium Access Control (MAC) layer has to schedule data communications in a dynamic environment in which available channels change in space and time. Therefore, scheduling in a CWMN is more difficult than scheduling in multi-channel IEEE 802.11 since each node in a CWMN can support different set of channels for data transmission where as in IEEE 802.11 all nodes share same set of channels. In this paper, we propose an efficient link scheduling algorithm in a distributed architecture in CWMN. The solution utilizes 2-distance vertex coloring scheme at the node level which increases the processing speed of the scheduling algorithm and lessens the overhead control data. Simulation results show that the proposed algorithm improves the scalability, the speed, and the amount of control data exchange when compared with existing algorithms.

Keywords—Wireless Mesh Networks; Cognitive Radio; Medium Access Control layer scheduling; link scheduling; vertex colouring

I. INTRODUCTION

Wireless Mesh Networks (WMNs) have a growing popularity due to its simple architecture, ease of installation, and low costs of maintenance [1]. Because WMNs utilize the air medium, this makes it susceptible to radio frequency interference that limits the network capacity. In fact, the radio frequency interference limits the number of simultaneous transmissions in a single channel causing the network capacity to drop [2].

One approach to enhance the network capacity is to utilize the multiple available channels that are discovered by means of Cognitive Radio (CR) [3]. CR is a promising technology that allows communication

on channels without acquiring a license. The nodes, in reference to the WMN nodes in a CR system, also referred to as secondary users (SUs), sense the spectrum periodically to find unutilized channels. Then, the SUs communicate among themselves using the discovered unutilized channels with the condition that they do not interfere with channels' owners, also known as the primary users (PUs). Therefore, a Cognitive Wireless Mesh Networks (CWMN) requires a new MAC layer enhancement that can meet the challenges of this new environment. Unlike multi-channel networks, such as IEEE 802.11, where the set of channels is shared among all nodes, this type of network faces continuous changes in availability of channels in space and time. In fact, each node in the network can have different set of channels. Consequently, any pair of nodes that wish to communicate has to establish a common communication channel and time to exchange packets without causing interference with other existing transmissions. Therefore, CWMN requires an efficient scheduling algorithm that can tackle the above challenges.

In this paper, we consider Time Division Multiple Access (TDMA) as our channel access protocol. Since it avoids collision and provides efficient channel utilization. The goal of TDMA MAC scheduling in a CWMN is to minimize the number of timeslots needed for data transmission by assigning a channel and a timeslot to each link without interfering with already scheduled links. Each TDMA slot is assigned to at least one link which represents the transmitter-receiver pair that has data to exchange. To achieve this objective, we propose an algorithm to schedule the links in a distributed manner.

The rest of the paper is organized as follows. Section II defines the problem at hand in a set of equations. Section III describes the related works to the domain. Section IV reveals our approach to the

link scheduling algorithm. Section V presented the numerical results of our approach. Finally, Section VI concludes the paper.

II. PROBLEM FORMULATION

Our motivation is to improve the scalability of the network, reduce the amount of control overhead, and minimize the overall scheduling time. We consider a CWMN in which the nodes are equipped with an omni-directional radio antenna and use one common control channel. We assume that all the radios have a channel switching delay equal to zero and their interference range is equal to their communication range. Each node may have different set of data channels available.

A link l is defined by:

- A transmitter $t(l)$ and a receiver $r(l)$ which are in the communication range of each others and have a packet to exchange.
- $LinkChSet_l$ is the set of common available channels between nodes $t(l)$ and $r(l)$ and is not empty.
- $InterferenceSet_l$ is the set of links that can interfere with link l . Link n belongs to $InterferenceSet_l$ if $r(l)$ is in the communication range of $t(n)$ or if $r(n)$ is in the communication range of $t(l)$.
- $ExclusionSet_l$ is the set of links that have at least a node in common with link l . Link n belong to $ExclusionSet_l$ if the transmitter $t(n)$ or the receiver $r(n)$ is also the transmitter $t(l)$ or the receiver $r(l)$.
- X_{lcs} is a variable where

$$X_{lcs} = \begin{cases} 1 & \text{if link } l \text{ is active on channel } c \text{ and timeslots.} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

In CWMN, which have a set of links $LinkSet$ and a set of channels $ChSet$, the scheduling algorithm should satisfy:

$$\forall l \in LinkSet, \sum_{c \in LinkChSet_l} \sum_{s=1}^k X_{lcs} = 1 \quad (1)$$

$$\forall l \in LinkSet, \forall c \in LinkChSet_l, \forall s, 1 \leq s \leq k, \\ X_{lcs} + \sum_{n \in InterferenceSet_l} X_{ncs} \leq 1 \quad (2)$$

$$\forall l \in LinkSet, \forall s, 1 \leq s \leq k, \\ \sum_{c \in ChSet} X_{lcs} + \sum_{c \in ChSet} \sum_{n \in ExclusionSet_l} X_{ncs} \leq 1 \quad (3)$$

$$\forall l \in LinkSet, \forall c \notin LinkChSet_l, \forall s, 1 \leq s \leq k, X_{lcs} = 0 \quad (4)$$

Equation (1) states that each link is assigned to one and only one channel and one timeslot. Equation (2) verifies that the interfering links are not assigned to the same channel and timeslot. Equation (3) ensures that a node does not perform two operations simultaneously (i.e. transmit two packets or receive two packets or transmit one packet and receive one packet). Equation (4) guarantees that link l can only be scheduled on a channel that is common to $t(l)$ and $r(l)$. Our objective is to propose a scalable and fast scheduling algorithm that satisfies the four equations while minimizing the number of timeslots, k , used to schedule all the links in the network.

III. RELATED WORK

In multi-channel single-radio 802.11 networks, different approaches to scheduling at the MAC layer have been proposed. In [4], [5] and [6] a MAC layer scheduling based on reservation of channel by RTS/CTS mechanism on the control channel has been presented. In [7], the proposed approach is divided into two steps: The first step is a control one during which the nodes use the control channel to select the channels to be used, and, in the second step the nodes send their data on the selected channel using the RTS/CTS mechanism. In [8] and [9], nodes synchronously execute a common sequence of hops across all channels. A pair of nodes stops performing the channel hopping sequence in order to make data transmission in which they reserve the channel by RTS/CTS mechanism. Once data transmission ends, they rejoin the common hopping sequence. In [10] and [11], each node carries out a different sequence of hops generated from a random number. A pair of nodes wishing to communicate must meet on a particular channel, stops the sequence of hops to carry out the data transmission, and rejoins their respective sequence of hops at the end of the transmission.

For a single-radio Cognitive network, different MAC layer scheduling algorithms have been proposed. A MAC layer scheduling based on reservation of channel by RTS/CTS mechanism on the control channel was presented in [12], [13], and [14]. The objective of [15] is to achieve efficient channel and timeslot assignments to the links in a distributed way which is compared to the optimal scheduling solution found by an Integer-Linear Programming (ILP) formulation. In the considered cognitive radio network, the nodes are equipped with a radio and a

control channel. The CSMA/CA scheme is used to access the control channel and the TDMA scheme is used to access the data channels. Each node has a rank which depends on the number of active links and the number of channels. The node with the highest rank in its two-hop neighborhood processes the algorithm of assignment of timeslots. This algorithm assigns the first available timeslot to the link. Nodes that finish the execution of the algorithm are marked as covered. Then, the uncovered nodes with the highest rank in its two-hop neighborhood execute the algorithm. As soon as all the nodes are covered, each node with the lowest rank in its two-hop neighborhood starts to examine if it has the highest schedule length (the number of timeslots needed to schedule all the links) in the network. Finally, the node that has the highest schedule length broadcasts a message to all the nodes to indicate the highest schedule length and the start time of communication phase. In case of tie among two or more nodes, the highest ID node broadcasts its message to all of the remaining nodes.

From the results shown in [15], we can see that this approach, referred to as ranking approach, demonstrates a schedule length near to the optimal. However, the ranking approach presents a problem of scalability, high overhead, and a long execution time. The channel and timeslot assignment algorithm in [15] is carried out according to an order established by the ranks of the nodes and has a low simultaneous execution number. In a chained wireless network topology whose nodes have ranks which increase gradually starting from the beginning of the chain, only one node execute the algorithm at a time. Therefore, the total time of scheduling will increase exponentially with the number of nodes in the network. Moreover, the use of CSMA/CA scheme forces to send a copy of the control packet to each of the neighbors. Each sent control packet requires RTS, CTS and an ACK packet which causes a significant increase in the amount of control data exchanged. Finally, the use of the backoff mechanism also adds an additional delay to access the control channel.

IV. SCHEDULING ALGORITHM

In this section, we present our link scheduling solution in the network. To achieve a scalable solution, each node is assigned a color which is unique in its two-hop neighborhood (vertex coloring) [16] and [17]. The order of execution of the channel and data timeslot assignment algorithm is determined by the color of the node. So the nodes which have the same color carry out the algorithm at the same time. Therefore, the total time of scheduling is defined by the number of colors which depends on the network's node density.

To avoid any inconvenience due to the use of CSMA/CA, the nodes utilize the TDMA scheme to send control packets on the control channel. Therefore, there will be two sub-frames in the TDMA frame as shown in Figure 1. The control sub-frame is divided into mini-timeslots to send control packets and the data sub-frame is divided into timeslots to send data packets. By avoiding contention to access the control channel, a node can broadcast a control packet in the control mini-timeslots to its neighbors which leads to reduce the amount of data control packets. In a control sub-frame, each control mini-timeslot corresponds to a color in which the nodes with this color can transmit. It is of importance to note that TDMA synchronization in the network is achieved by using a GPS device and that the nodes sense the spectrum and exchange control information about available channels between each frame.

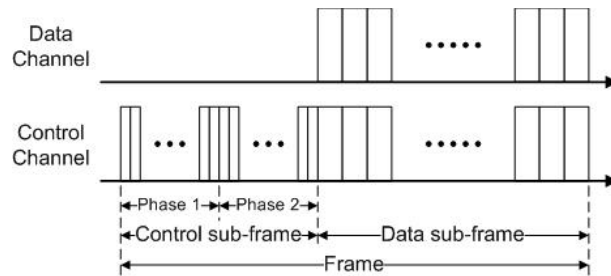


Figure 1. Structure of frame which is composed of a control phase and a data communication phase in the CWMN

In our coloring approach, the execution of the channel and data timeslot assignment algorithm needs two phases. In the first phase, referred to as the scheduling link phase, nodes schedule their outgoing links where as in the second phase, referred to as the establishing data sub-frame size, nodes determine the maximum data sub-frame size in the network. Here are more details about each phase:

A. Phase 1- Scheduling Link Phase

In the first phase, the execution order of the channel and data timeslot assignment algorithm is done according to node colors. Nodes who have the lowest color index execute the algorithm first. In a network with M colors, the first phase will need M step as described in the Figure 2. Each step has M control mini-timeslots. At the beginning of a step i , all nodes of color i assign channels and data timeslots to their outgoing links and broadcast the scheduling information in the message *Schedule_Information* to their neighbors in the first control mini-timeslot (which have the color i). In particular, a node selects the outgoing links with the lowest number of available

channel. In case of a tie, the source node selects the outgoing links based on the lowest ID of the destination node and so forth. Then, this node assigns to each outgoing link a data timeslot without causing interference with the already scheduled links by starting with the first available data timeslot of each channel. Step i have M control mini-timeslots to allow the neighbors of different colors to forward the information in the two-hop neighborhood. Control mini-timeslots are colored from i to M then from 1 to $i-1$. At the end of step i , all nodes of color i are marked covered. Thus, the total number of control mini-timeslots needed to schedule all the links in the network is M^2 .

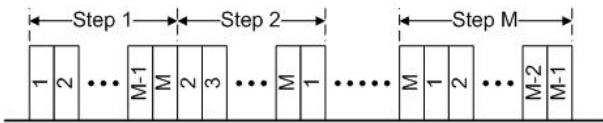


Figure 2. Timeslot colouring in the first phase of the scheduling algorithm

B. Phase 2 – Establishing the Data Sub-Frame Size

In the second phase, nodes determine the maximum data sub-frame size in the network. The control mini-timeslots are colored cyclically from M to 1 as presented in Figure 3. Nodes that have the highest color in its two-hop neighborhood are termed as root nodes and start to establish the maximum data sub-frame size in a breadth-first fashion. The breadth-first fashion is described as follows. A root node sends an *Attempt_size* message which includes the following information: its actual maximum data sub-frame size, identity of the root node, and identity of parent node which is equal to its identity. The neighbors of a root node become its children in the logical tree.

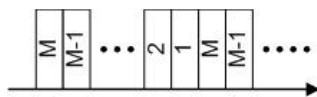


Figure 3. Timeslot colouring in the second phase of the scheduling algorithm

When a node x receives an *Attempt_size* message of the root node z from node y does one of the following:

- If the maximum data sub-frame size contained in the message is bigger than the actual maximum data sub-frame size of node x , then node x becomes a child of node y in the logical tree of root node z and updates its

maximum data sub-frame size. In case of a tie, for the maximum data sub-frame size, node x does one of the following: (i) if node x is not part of any logical tree, then, node x becomes a child in the logical tree of root node z , (ii) else node x is already a part of a logical tree of root node v . Therefore, node x becomes a child in the logical tree of root node z if the ID of node z is higher than the ID of node v . After becoming a child in the logical tree of root node z , node x writes in the *Time_Recv_Attempt* message the reception time of the message *Attempt_size*. It broadcasts the information about the maximum data sub-frame size to all of its neighbors in the message *Attempt_size* which includes the maximum data sub-frame size, the identity of the root node, and the identity of the parent node. All of the neighbors except its parent become a potential child of node x . By receiving the message *Attempt_size*, node y has a confirmation that node x is its child in the logical tree.

- If the maximum data sub-frame size contained in the message is lower than the actual maximum data sub-frame size of node x , then node x discards the message.
- If the message indicates that node x is the parent of node y , then node x changes the status of node y from a potential child to child.
- If node x is already part of the logical tree of the root node z and the message indicates that node w is the parent of node y , then node x removes node y from its list of potential children. When a node has empty list of potential children and has no children, it sends an *Acknowledgement* message which contains *Time_Recv_Attempt* to its parent. When a node has *Acknowledgement* messages from all of its children and has an empty list of potential children, it sends an *Acknowledgement* message to its parent. The *Acknowledgement* message contains the highest value of *Time_Recv_Attempt* message received in the *Acknowledgement* messages of its children.

The root node who has received an *Acknowledgement* message from all of its children deduce that its data sub-frame size is the highest and that all nodes in the network are part of its logical tree. So, it has spread successfully the maximum data sub-frame size to all the nodes in the network. Then, it computes the delay to reach the furthest node from the highest value of *Time_Recv_Attempt* and the time of

transmission of the message *Attempt_size*. With this delay known, the node knows the time it will take for its message to reach all the nodes in the network and, then, can establish the start time of the communication phase. Then, the node sends a *Communication_Phase_Information* message which contains the start time and the number of timeslots of the data communication phase and indicates the end of the second phase. The *Communication_Phase_Information* message travel through the logical tree.

V. PERFORMANCE ANALYSIS

In this section, we compare the ranking approach and the coloring approach in two sets of simulations to determine scalability improvement and the reduction of the execution time of the channels and data timeslots assignments. To achieve this objective, we analyze the time spent for transmitting control packets and data packets, the data sub-frame size, and the goodput of a link. The results shown in the figures below present the mean value of 50 simulations of 60 seconds each. The simulation platform used in our simulations for the two approaches is NS-2 [18]. Nodes have a communication range of 250m and always have a packet of 1500 bytes to send to each neighbor. The number of channels available at each node is randomly chosen between 1 and 25. The channel identities are chosen between 1 and 50. The data timeslot is 0,6675ms which is the time necessary to transmit a packet of 1500 bytes. In the first set of simulation scenarios, nodes are placed to form a grid topology and separated by a distance of 176m. The number of nodes in the grid is 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100, 121, and 144. In the second set of simulation scenarios, nodes are placed randomly in a square area. In this set, the area of the network is 467m x 467m, 738m x 738m, 1044m x 1044m, 1279m x 1279m, 1477m x 1477m, 1651m x 1651m, and 1809m x 1809m for 10, 25, 50, 75, 100, 125, and 150 nodes, respectively, ensuring the same density.

Figure 4 and Figure 5 show the time spent for transmitting control data for the first set of simulations and the second set of simulations. We observe an important difference between the two approaches. The time spent for transmitting control data for the ranking approach vary from 1,074s to 3,046s for the first set of simulation scenarios and from 0,416s to 2,533s for the second set of simulation scenarios. The time spent for transmitting control data for the coloring approach ranges from 4,288ms to 10,075ms for the first set of simulation scenarios and from 2,846ms to 11,211ms for the second set of simulation scenarios. The difference can be justified due to the fact that the coloring approach is using 2-distance vertex coloring to allow simultaneous execution of the scheduling

algorithm where as the coloring approach is using TDMA to avoid contention to access the control channel. We notice that the curve of the time spent for the first phase of the coloring approach have similar behavior to that of the number of colors needed for the network (Figure 8 and Figure 9) because the duration of the first phase depends on the number of colors.

Figure 6 and Figure 7 show the schedule length for the first set of simulation scenarios and for the second set of simulation scenarios. We observe that the ranking approach achieve a better schedule length than the coloring approach. In the scenario of 144 nodes (12 x 12 grid) for the first set of simulations, we notice a difference of 5,58 timeslots between the two approaches which represents 3,724ms. While in the scenario of 150 nodes for the second set of simulations, we observe a difference of 4,46 timeslots between the two approaches which represents 2,977ms. The ranking approach presents a better schedule length because it gave priority to nodes that have a low ratio between the number of channels and the number of links to schedule their links. However, this difference is relatively small compared to time spent to send control data for the ranking approach. We see a difference in the schedule length between the first and the second set of simulations since in the first set the nodes are placed deterministically in the network to cover the network area and to maximize the number of neighbors for each node. Therefore, this difference can be explained by the fact that in the grid topology the mean number of neighbors and outgoing links to be scheduled is higher than in the mesh topology.

Figure 8 and Figure 9 show the mean number of colors needed in the network for the coloring approach in the first set of simulation scenarios and in the second set of simulation scenarios. In the first set, we observe that the number of colors become constant for more than 100 nodes in the network. In the second set, we notice that the mean number of colors converge to 11,93 for more than 125 nodes in the network. The difference in the behavior of the curve of the number of colors between the first and the second set of simulations is because in the first set of simulations the nodes are placed deterministically in the network while in the second set of simulations the nodes are placed randomly in the network.

Figure 10 and Figure 11 show the mean goodput of a link for the first set of simulation scenarios and for the second set of simulation scenarios. As expected, the coloring approach achieves a better goodput than the ranking approach. In fact, the coloring approach accomplishes a goodput for a link of 375,048 to 672,694 Kbits/s for the grid topology and 394,102 to 987,515 Kbits/s for the mesh topology and a goodput for a node of 2,635 to 3,531 Mbits/s for

the grid topology and 2,488 to 3,717 Mbits/s for the mesh topology. On the other hand, the ranking approach accomplishes a goodput for a link of 3,915 to 11,037 Kbits/s for the grid topology and 4,705 to 28,2 Kbits/s for the mesh topology and a goodput for a node of 27,519 to 57,945 Kbits/s for the grid topology and 29,713 to 106,146 Kbits/s for the mesh topology. The major difference in goodput between the two approaches can be explained by the fact that the ranking approach spends more time to exchange control information.

It is also noticed that the coloring approach uses the channels more efficiently than the ranking approach. In the coloring approach, the time spent for data transmission represents %68,51 to %75,96 for the grid topology and %63,17 to %76,57 for the mesh topology. On the other hand, in the ranking approach, the time spent for data transmission represents %0,59 to %1,13 for the grid topology and %0,63 to %2,05 for the mesh topology. Therefore, the coloring approach provides a better efficient use of the channels than the ranking approach.

The results at hand show that the coloring approach improves the scalability of the scheduling in the networks. Indeed, the 2-distance vertex coloring of the node allows achieving a scalable solution because the execution of the scheduling algorithm depends on the number of colors in the network. This permits the nodes which have the same color to schedule their outgoing links at the same time. Also, it utilizes the TDMA scheme to send control packets on the control channel which reduces the amount of data control packets sent and the time of execution of the scheduling algorithm. Nonetheless, in the coloring approach, the links need less delay to transmit a packet than in the ranking approach. As a result, the coloring approach presents an advantage for real-time application.

The ranking approach presents a better scheduling because the scheduling algorithm gives priority to nodes that present a low ratio between the number of channels and the number of links to be scheduled while the ranking approach needs a large amount of control packets exchanged leading to poor efficiency utilization of the channels.

VI. CONCLUSIONS

In this paper, we investigated the MAC-scheduling in a CWMN. We proposed an approach to improve the scalability, decrease the amount of control data sent, and diminish the time of execution of the scheduling while decreasing the schedule length. The approach utilizes 2-distance vertex coloring approach of the node to increase the simultaneous activity in the execution of scheduling algorithm in the network. It

also uses the TDMA scheme to avoid contention to access the control channel. We compared our approach to another approach from the existing literature which is referred as the ranking approach. The results show a significant improvement in term of scalability, goodput, efficient utilization of channels, amount of control data sent, and the time of execution of scheduling. The ranking approach achieves a better schedule length but the gap is smaller compared to the advantages shown by the coloring approach. In future works, we plan to extend the proposed work to take the quality of service into consideration.

REFERENCES

- [1] I. F. Akyildiz, X. Wang, and W. Wang, "Wireless mesh networks: a survey," *Computer Networks*, Elsevier, Netherlands, vol. 47, pp. 445-487, Mar. 2005.
- [2] P. Gupta and P. R. Kumar, "The capacity of wireless networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, IEEE, United States of America, vol. 46, pp. 388-404, Mar. 2000.
- [3] J. Mitola Iii and G. Q. Maguire Jr, "Cognitive radio: making software radios more personal," *IEEE Personal Communications*, IEEE, United States of America, vol. 6, pp. 13-18, Aug. 1999.
- [4] S.-L. Wu, C.-Y. Lin, Y.-C. Tseng, and J.-P. Sheu. "A New Multi-Channel MAC protocol with on demand channel assignment for mobile ad-hoc networks," In *Proc. International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks*, Dallas/Richardson, Texas, United States of America, Dec. 2000, pp. 232-237.
- [5] S.-L. Wu, C.-Y. Lin, Y.-C. Tseng, C.-Y. Lin, and J.-P. Sheu. "A Multi-Channel MAC protocol with Power Control for Multihop Mobile Ad-hoc Networks," *The Computer Journal*, Oxford University Press, United Kingdom, Vol. 45, pp. 101-110, 2002.
- [6] W.-C. Hung, K. L. Eddie Law, and A. Leon-Garcia, "A Dynamic Multi-Channel MAC for Ad-Hoc LAN," In *Proc. Biennial Symposium on Communications*, Kingston, Canada, Jun. 2002, pp. 31-35.
- [7] J. Chen, S. Sheu, and C. Yang, "A new multichannel access protocol for IEEE 802.11 ad hoc wireless LANs," In *Proc. International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Vol. 3, Beijing, China, Sep. 2003, pp. 2291-2296.
- [8] A. Tzamaloukas and J.J. Garcia-Luna-Aceves, "Channel-Hopping Multiple Access," In *Proc. IEEE International Conference on Communications*, New Orleans, Louisiana, United States of America Jun. 2000, pp. 415-419.
- [9] A. Tzamaloukas and J.J. Garcia-Luna-Aceves, "Channel-hopping multiple access with packet trains for ad hoc networks," In *Proc. IEEE Mobile Multimedia Communications*, Tokyo, Oct. 2000.
- [10] P. Bahl R. Chandra, and J. Dunagan, "SSCH: Slotted Seeded Channel Hopping for Capacity Improvement in IEEE 802.11 Ad-Hoc Wireless Networks," In *Proc. Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Philadelphia, Pennsylvania, United States of America, Sep. 2004, pp. 216-230.
- [11] H. S. So, W. Walrand, and J. J. Mo, "McMAC: A Parallel Rendezvous Multi-Channel MAC Protocol," In *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Hongkong, China, Mar. 2007, pp. 334-339.

- [12] A. Chia-Chun Hsu, D.S.L. Wei, and C.-C.J. Kuo, "A cognitive MAC protocol using statistical channel allocation for wireless ad-hoc networks," In *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Hongkong, China, Mar. 2007, pp. 105-110.
- [13] J. Jia, Q. Zhang, and X. Shen, "HC-MAC: A hardware-constrained cognitive MAC for efficient spectrum management," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 26, pp 106-117, Jan. 2008.
- [14] L.-C. Wang, A. Chen, and D. S. L. Wei, "A cognitive MAC protocol for QoS provisioning in overlaying ad hoc networks," In *Proc. Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, Las Vegas, Nevada, United States, Jan. 2007, pp. 1139-1143.
- [15] M. Thoppian, S. Venkatesan, R. Prakash, and R. Chandrasekaran, "MAC-layer scheduling in cognitive radio based multi-hop wireless networks," In *Proc. IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, Buffalo-Niagara Falls, New York, United states, Jun. 2006, pp. 191-200.
- [16] Z. Xizheng, "Efficient broadcast scheduling using a fuzzy-hopfield-network based mixed algorithm for ad hoc network," In *Proc. International Conference on Advanced Language Processing and Web Information Technology*, Luoyang, Henan, China, Aug. 2007, pp. 405-408.
- [17] S. Haixiang and W. Lipo, "Broadcast scheduling in wireless multihop networks using a neural-network based hybrid algorithm," *Neural Networks*, Elsevier, United Kingdom, vol. 18, pp. 765-771, Aug. 2005.
- [18] Network Simulator NS-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.

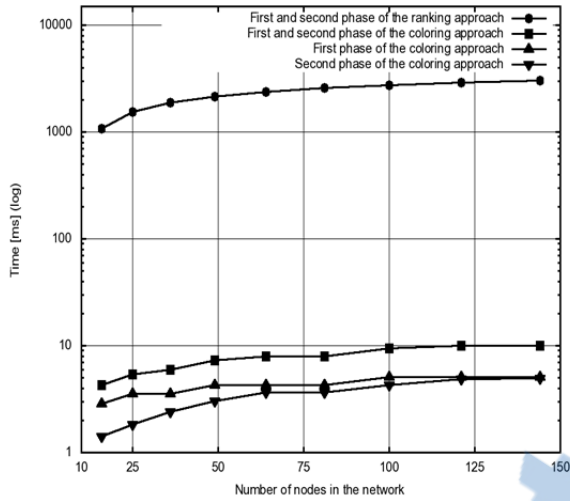


Figure 4. Time spent in a frame for scheduling links (first phase) and establishing the data sub-frame size (second phase) for the coloring and the ranking approach in the grid network

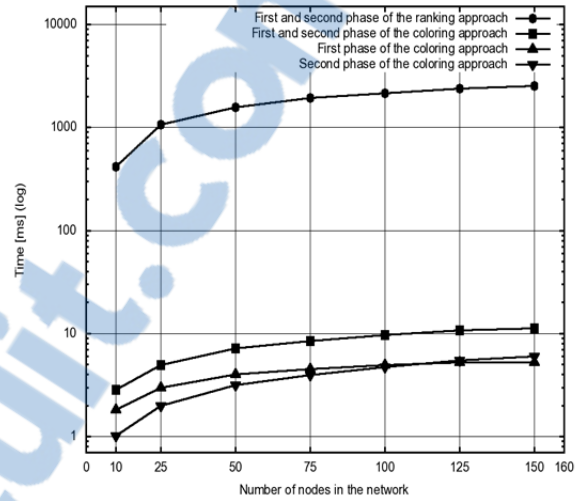


Figure 5. Time spent in a frame for scheduling links (first phase) and establishing the data sub-frame size (second phase) for the coloring and the ranking approach in the mesh network

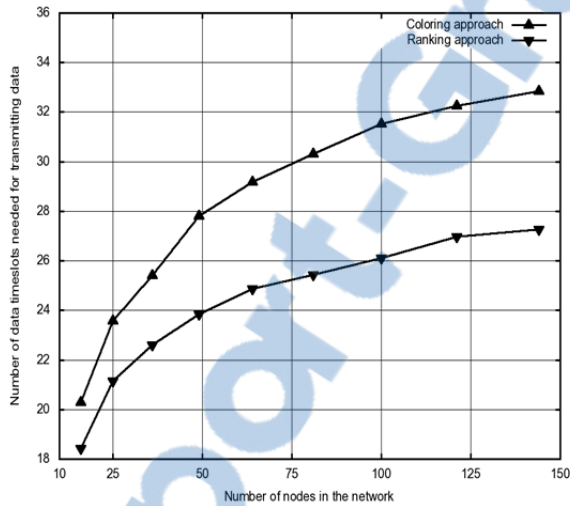


Figure 6. Schedule length of the coloring and the ranking approach in the grid network

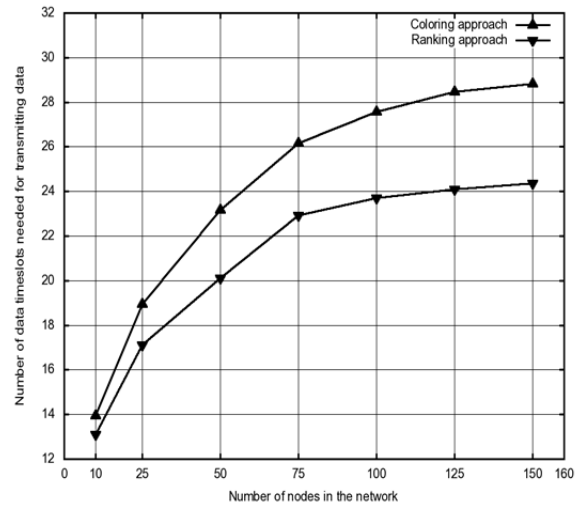


Figure 7. Schedule length of the coloring and the ranking approach in the mesh network

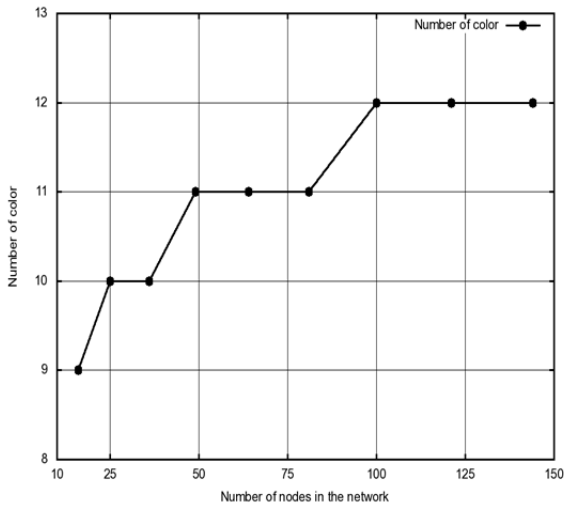


Figure 8. Number of colors needed in the coloring approach in the grid network

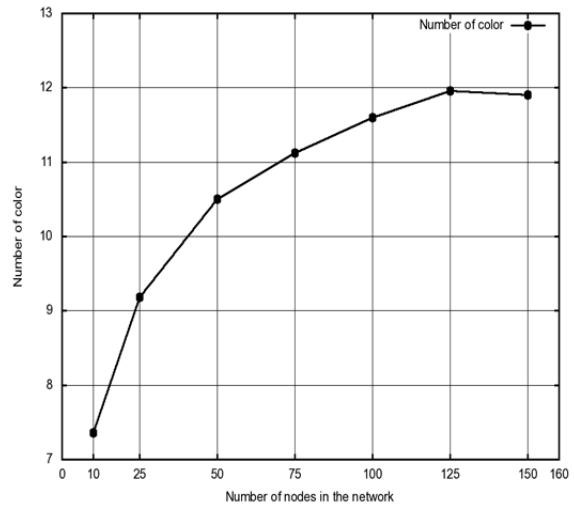


Figure 9. Number of colors needed in the coloring approach in the mesh network

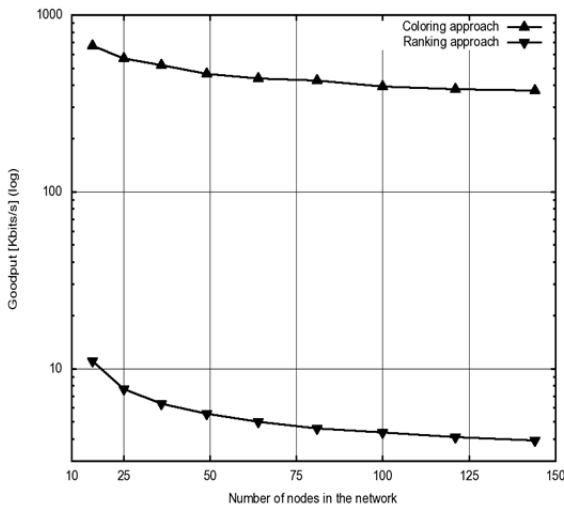


Figure 10. Mean goodput of a link for the coloring and the ranking approach in the grid network

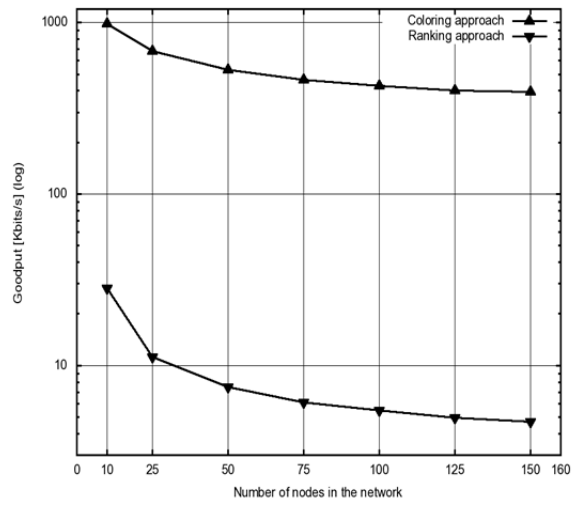


Figure 11. Mean goodput of a link for the coloring and the ranking approach in the mesh network

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Msakni, M., L. D. Dung, et al. (2011). A scalable decentralized MAC scheduling for cognitive wireless mesh network. 7th Advanced International Conference on Telecommunications, AICT 2011, March 20, 2011 - March 25, 2011, St. Maarten, Netherlands, International Academy, Research and Industry Association.
- Haidar, M., M. Msakni, et al. (2009). Power management and bandwidth allocation in a cognitive wireless mesh network. 2009 Seventh Annual Communication Networks and Services Research Conference, 11-13 May 2009, Piscataway, NJ, USA, IEEE.
- Akyildiz, I. F., X. Wang, et al. (2005). "Wireless mesh networks: a survey." Comput. Netw. ISDN Syst. **47**(4): 445-487.
- Atakan, B. et O. B. Akan (2012). "Biological foraging-inspired communication in intermittently connected mobile cognitive radio ad hoc networks." IEEE Transactions on Vehicular Technology **61**(6): 2651-2658.
- Atmaca, S. (2013). "Improving TDMA Channel Utilization in Random Access Cognitive Radio Networks by Exploiting Slotted CSMA." Wireless Personal Communications **71**(4): 2417-2430.
- Bahl, P., R. Chandra, et al. (2004). SSCH: slotted seeded channel hopping for capacity improvement in IEEE 802.11 ad-hoc wireless networks. Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking. Philadelphia, PA, USA, ACM: 216-230.
- Cabric, D., S. M. Mishra, et al. (2004). Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios, Pacific Grove, CA, United States, Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, Piscataway, NJ 08855-1331, United States.
- Chia-Chun Hsu, A., D. S. L. Weit, et al. (2007). A cognitive MAC protocol using statistical channel allocation for wireless ad-hoc networks, Kowloon, China, IEEE.
- C. M. Cordeiro, M. G., D. Cavalcanti, K. Challapali, (2007). "Spectrum Sensing for Dynamic Spectrum Access of TV Bands." IEEE CrownCom.

- Cordeiro, C., K. Challapali, et al. (2006). "IEEE 802.22 - an introduction to the first wireless standard based on cognitive radios." Journal of Communications **1**(1): 38-47.
- Cordeiro, C., K. Challapali, et al. (2005). IEEE 802.22: The first worldwide wireless standard based on cognitive radios, Baltimore, MD, United States, Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, Piscataway, NJ 08855-1331, United States.
- Devanarayana, C. et A. S. Alfa (2014). Proactive channel access in cognitive radio networks based on users' statistics. 2014 1st International Workshop on Cognitive Cellular Systems (CCS), 2-4 Sept. 2014, Piscataway, NJ, USA, IEEE.
- Fang, H., L. Xu, et al. (2013). Dynamic opportunistic spectrum access of multi-channel multi-radio based on game theory in wireless cognitive network. 9th IEEE International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks, MSN 2013, December 11, 2013 - December 13, 2013, Dalian, China, IEEE Computer Society.
- FCC (2003). "ET Docket No 03-222 Notice of proposed rule making and order."
- Gupta, P. et P. R. Kumar (2000). "The capacity of wireless networks." Information Theory, IEEE Transactions on **46**(2): 388-404.
- Haixiang, S. et W. Lipo (2005). "Broadcast scheduling in wireless multihop networks using a neural-network-based hybrid algorithm." Neural Networks **18**(5-6): 765-771.
- Han-Feng, L., C. Shin-Ming, et al. (2014). Cognitive access in multichannel wireless networks using two-dimension Markov chain. 2014 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 4-8 Aug. 2014, Piscataway, NJ, USA, IEEE.
- Hoi, S., W. So, et al. (2007). McMAC: A Parallel Rendezvous Multi-Channel MAC Protocol. Wireless Communications and Networking Conference, 2007.WCNC 2007. IEEE.
- Hu, S., Y.-D. Yao, et al. (2014). "Cognitive medium access control protocols for secondary users sharing a common channel with time division multiple access primary users." Wireless Communications and Mobile Computing **14**(2): 284-296.

- Huang, K.-C. et D. Raychaudhuri (2011). MAC protocol adaptation in cognitive radio networks. 2011 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2011, March 28, 2011 - March 31, 2011, Cancun, Mexico, IEEE Computer Society.
- Hung, W.-C., K. L. E. Law, et al. (2002). A Dynamic MultiChannel MAC for Ad Hoc LAN.
- James C. McKinney, D. R. H. (95). ATSC digital television standard, Advanced Television Systems Committee.
- Jeon, H., S. Kim, et al. (2007). Notification protocol of sensing information in cognitive radio system, Shanghai, China, Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, Piscataway, NJ 08855-1331, United States.
- Jia, J., Q. Zhang, et al. (2008). "HC-MAC: A hardware-constrained cognitive MAC for efficient spectrum management." IEEE Journal on Selected Areas in Communications **26**(1): 106-117.
- Kae Won, C., J. Wha Sook, et al. (2013). "Adaptive and distributed access to spectrum holes in cognitive radio system." Wireless Personal Communications **70**(1): 207-226.
- Mitola, J. et G. Q. Maguire (1999). "Cognitive radio: making software radios more personal." IEEE Personal Communications **6**: 13-18.
- Network Simulator NS-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- Pandit, S. et G. Singh (2013). Self-scheduled MAC-layer protocol for spectrum sharing in cognitive radio communication. 2013 Sixth International Conference on Contemporary Computing (IC3), 8-10 Aug. 2013, Piscataway, NJ, USA, IEEE.
- P. Pawelczak, C. G., R. Venkatesha Prasad et R. Hekmat, (2007). "Cluster-Based Spectrum Sensing Architecture for Opportunistic Spectrum Access Networks." IRCTR-S-004-07 Report.
- Raiss-El-Fenni, M. et M. El Kamili (2014). "Admission control using stochastic learning games in cognitive radio networks." International Journal of Future Generation Communication and Networking **7**(1): 29-42.

- Rongbo, Z., S. Wanneng, et al. (2013). "Enhanced MAC protocol to support multimedia traffic in cognitive wireless mesh networks." Multimedia Tools and Applications **67**(1): 269-288.
- Sengupta, S., S. Brahma, et al. (2007). Enhancements to cognitive radio based IEEE 802.22 air-interface, Glasgow, Scotland, United Kingdom, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Piscataway, NJ 08855-1331, United States.
- Seyoun, L. et L. Tae-Jin (2011). "A Self-Scheduling Multi-Channel Cognitive Radio MAC Protocol Based on Cooperative Communications." IEICE Transactions on Communications **E94-B**(6): 1657-1668.
- Thoppian, M., S. Venkatesan, et al. (2006). MAC-layer scheduling in cognitive radio based multi-hop wireless networks. International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2006. WoWMoM 2006.
- Tzamaloukas, A. et J. J. Garcia-Luna-Aceves (2000). "Channel Hopping Multiple Access with Packet Trains for Ad Hoc Networks." In Proc. IEEE Mobile Multimedia Communications (MoMuC '00).
- Wang, L.-C., A. Chen, et al. (2007). A cognitive MAC protocol for QoS provisioning in overlaying ad hoc networks, Las Vegas, NV, United States, Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, Piscataway, NJ 08855-1331, United States.
- Wu, S.-L., C.-Y. Lin, et al. (2000). A New Multi-Channel MAC Protocol with On-Demand Channel Assignment for Multi-Hop Mobile Ad Hoc Networks. Proceedings of the 2000 International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks, IEEE Computer Society: 232.
- Yoh-han, L. et K. Daeyoung (2012). A slow hopping MAC protocol for coordinator-based cognitive radio network. 2012 9th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 14-17 Jan. 2012, Piscataway, NJ, USA, IEEE.
- Younis, O., D. Shallcross, et al. (2012). TDMA scheduling and channel assignment for cognitive tactical networks. 2012 IEEE Military Communications Conference (MILCOM 2012), 29 Oct.-1 Nov. 2012, Piscataway, NJ, USA, IEEE.

- Yu-Chee, T., W. Shih-Lin, et al. (2001). A multi-channel MAC protocol with power control for multi-hop mobile ad hoc networks. International Conference on Distributed Computing Systems Workshop, 2001.
- Yu, Z., Y. Wen-dong, et al. (2007). Cooperative spectrum sensing technique, Shanghai, China, Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, Piscataway, NJ 08855-1331, United States.
- Zame, W., X. Jie, et al. (2014). "Cooperative Multi-agent Learning and Coordination for Cognitive Radio Networks." IEEE Journal on Selected Areas in Communications **32**(3): 464-477.
- Zhang, X. (2007). Efficient Broadcast Scheduling Using a Fuzzy-Hopfield-Network Based Mixed Algorithm for Ad Hoc Network. Advanced Language Processing and Web Information Technology, 2007. ALPIT 2007. Sixth International Conference on.