



THÈSE

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

Délivré par l'Université Toulouse 2 - Jean Jaurès

Cotutelle internationale: Université de la Manouba

**Présentée et soutenue par
Mohammed AISSAOUI**

Le 20 juin 2023

**NOUVELLE APPROCHE PROTOCOLAIRE DE GESTION
D'INTERFÉRENCES DANS LES RÉSEAUX SANS FIL MULTI-SAUTS**

Ecole doctorale : **EDMITT - Ecole Doctorale Mathématiques, Informatique et
Télécommunications de Toulouse**

Spécialité : **Informatique et Télécommunications**

Unité de recherche :
IRIT : Institut de Recherche en Informatique de Toulouse

Thèse dirigée par
Thierry VAL et Leila AZOUZ SAIDANE

Jury

M. Lassaad LATRACH, Rapporteur
Mme Lamia BEN AZZOUC, Rapporteuse
M. Sofiane OUNI, Examineur
M. Thierry VAL, Directeur de thèse
Mme Leila AZOUZ SAIDANE, Co-directrice de thèse
M. Farouk KAMOUN, Président

À mes chers parents,

À mes chers frère et soeurs,

À toute ma famille et mes amis,

À tous ceux qui ont souhaité ma réussite,

Et à tous ceux qui me tiennent à cœur,

Je dédie ce travail, en guise d'amour et de reconnaissance.

Remerciements

C'est avec un grand plaisir que je réserve ces lignes en signe de gratitude et de reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail. Ce travail, qui a été réalisé au sein du laboratoire CRISTAL pôle RAMSIS, École Nationale des Sciences de l'Informatique (ENSI), Tunisie, et du laboratoire IRIT équipe RMESS, Université Toulouse II - Jean Jaurès, France, m'a permis de rencontrer des personnes qui m'ont apporté beaucoup d'aide et de soutien dans mes recherches et que je souhaite aujourd'hui remercier.

Je souhaite remercier Monsieur **Lassaad Latrach**, Professeur à l'ENSI Université de la Manouba et Madame **Lamia Ben Azzouz**, Maître de conférences à l'ENSIT Université de Tunis d'avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse et d'évaluer mon travail. Je les remercie particulièrement pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et à leurs remarques pertinentes et enrichissantes.

Je tiens à remercier très sincèrement Monsieur **Farouk Kamoun**, Professeur émérites à l'ENSI Université de la Manouba, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de cette thèse et d'accorder du temps pour le jugement de mon travail. Que Monsieur **Sofiane Ouni**, HDR. Dr à l'INSAT Université de Carthage, trouve ici l'expression de mes vifs remerciements pour avoir accepté d'être examinateur et de consacrer un temps précieux à l'évaluation de mon manuscrit de thèse.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance et mes chaleureux remerciements à mes quatre c-encadrants pour avoir accepté de m'accompagner dans cette thèse. Leur disponibilité, leur encouragement et leur patience ont été d'une grande aide tout au long de cette expérience. Leur approche constructive et productive de notre travail commun ainsi que leur soutien indéfectible, aussi bien sur le plan scientifique qu'humain, ont été des éléments essentiels pour la réussite de cette thèse. Un grand merci à :

- Madame **Leila Azouz Saidane**, ma directrice de thèse côté tunisien, pour son travail de suivi diligent, combiné à ses commentaires et suggestions perspicaces, a considérablement enrichi ma recherche et m'a aidé à rester sur la bonne voie. Ses précieuses orientations et ses commentaires constructifs ont joué un rôle essentiel dans l'orientation et la qualité de mon travail et m'ont permis de mener à bien ma

thèse.

- Monsieur **Thierry Val**, mon directeur de thèse côté français, pour sa rigueur inébranlable et la pertinence de ses jugements ont été très constructives et ont joué un rôle crucial dans l'orientation et la qualité de mes recherches. Sa profonde compréhension du sujet, combinée à sa vaste expérience, lui a permis d'offrir des conseils et des points de vue inestimables qui ont considérablement enrichi mon travail.
- Madame **Chiraz HOUAIDIA**, ma co-encadrante de thèse côté tunisien, pour ses conseils pédagogiques et ses commentaires perspicaces tout au long de mon travail. Ses remarques pertinentes et ses commentaires constructifs ont joué un rôle particulièrement important dans l'orientation de mon travail et m'ont aidé à surmonter les difficultés et à atteindre mes objectifs. En outre, je suis profondément reconnaissant de son soutien et de ses encouragements indéfectibles dans les moments difficiles.
- Monsieur **Adrien Van Den Bossche**, mon co-encadrant de thèse côté français, pour ses remarques pertinentes et enrichissantes. Son soutien et ses conseils ont été d'une valeur inestimable pour m'aider à naviguer dans le processus complexe de la réalisation de mes études doctorales. Ses conseils avisés et ses commentaires critiques ont été essentiels pour façonner la qualité et l'orientation de mon travail.

Je remercie M. Thierry et M. Adrien pour leur accueil chaleureux au laboratoire de l'IRIT et en France en général. Leurs conseils et leur soutien m'ont aidé à m'acclimater à un nouvel environnement.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers l'équipe du plate-forme **FIT/Cor-teXlab**, en particulier Monsieur **Leonardo S. Cardoso**, Monsieur **Pascal Girard** et Monsieur **Matthieu Imbert**, pour avoir généreusement mis à ma disposition leur testbed pour mes expérimentations. Leur soutien technique précieux et leur assistance inestimable ont grandement contribué à la réussite de ma recherche.

Je tiens à remercier mes amis et particulièrement **Imene Guerfi**, **Mohamed Said Frikha**, **Hassen-Elbanna Bouyoucef**, **Djamel Haddaoui**, et **Achref Boudour**, pour leurs soutiens et encouragements incessants.

Enfin, j'adresse mes profonds remerciements à ma famille et particulièrement à mes chers parents, **mon frère** et **mes sœurs** pour leur amour et soutien inconditionnels.

Résumé

Les réseaux sans fil multi-sauts, appelés aussi réseaux ad-hoc, sont fréquemment exploités et mis à profit ces dernières décennies grâce à leur capacité à s'affranchir des réseaux filaires traditionnels et à leur grande flexibilité. Néanmoins, du fait que les communications sont relayées de proche en proche par les noeuds eux-mêmes, ceci implique, contrairement aux réseaux à infrastructure traditionnels, que les débits atteignables dans de tels réseaux sont particulièrement limités dès lors que le nombre d'utilisateurs augmente. On considère même parfois qu'une transmission d'une source vers une destination est effective seulement si tous les utilisateurs proches de la destination restent silencieux durant toute la période d'émission. Ainsi, la gestion des interférences radio est devenue l'un des principaux défis à relever pour augmenter la capacité des réseaux sans fil multi-sauts et fiabiliser les transmissions des noeuds clients. Cette volonté de gérer les interférences a suscité, historiquement, plusieurs travaux de recherche visant essentiellement la couche d'accès et dont l'objectif consiste à ordonnancer les transmissions de façon à éviter toute forme d'interférence dans le temps ou dans l'espace fréquentiel, ce qui induit inéluctablement une mauvaise réutilisation spatiale en plus de l'*overhead* introduit pour la coordination des échanges de données. De ce fait, et grâce à différentes techniques avancées de communication numérique, la communauté scientifique s'est efforcée à repenser ces stratégies pour traiter voir exploiter ces interférences en autorisant plusieurs transmissions simultanées et dans la même bande de fréquence. Dans cette thèse, nous nous intéressons à l'une de ces techniques, le *Physical-Layer Network Coding* (PNC), en vue de son intégration réelle dans des réseaux sans fil multi-sauts. Nos premiers travaux se concentrent principalement sur la conception d'une approche dynamique et centralisée de gestion d'accès capable de détecter et d'exploiter les opportunités de PNC dans un réseau en étoile. Motivés par les résultats obtenus par simulation sur cette topologie minimaliste, nous avons ensuite défini un nouveau cadre d'utilisation à cette technique visant à élargir sa sphère d'application et évaluer les gains obtenus dans un contexte réel sur de vrais équipements. Ainsi, nous avons, tout d'abord, proposé et implémenté dans des radio logicielles une nouvelle couche physique dédiée au PNC en utilisant des équipements radio hétérogènes pour ensuite, concevoir et tester sur un *testbed* réel une couche MAC distribuée qui supporte le PNC et qui a prouvé des gains significatifs en débit et en fiabilité en comparaison aux solutions existantes sur un nombre de noeuds plus important.

Mots-clés : Réseaux sans fil multi-sauts, Protocole MAC, TDMA, CSMA, Physical-Layer Network Coding, Two-Way Relay Channel, Software Defined Radio, GNU Radio.

Abstract

Wireless multi-hop networks, also referred to as ad-hoc networks, have been frequently exploited in recent decades due to their ability to get rid of any infrastructure and their great flexibility. However, the fact that communications are relayed hop by hop by the nodes themselves, this implies, unlike traditional infrastructure networks, that the achievable *throughput* in such networks is particularly limited when the number of users increases. It is even considered that a transmission from a source to a destination is effective only if all the users close to the destination remain silent during the entire transmission period. Thus, the radio interference management has become one of the main challenges to increase the capacity of multi-hop wireless networks and to make the client nodes transmissions more reliable. This purpose to manage interference has historically given rise to several research works carried out essentially at the access layer and whose objective is to schedule transmissions in such a way to avoid any form of interference in time or in frequency space, which inevitably leads to poor spatial reuse in addition to a considerable *overhead* introduced for the coordination of data exchanges. As a result, and thanks to various advanced digital communication techniques, the scientific community has endeavored to rethink these strategies to treat or even exploit these interferences by authorizing several simultaneous transmissions and in the same frequency band. In this thesis, we are interested in one of these techniques, the *Physical-Layer Network Coding* (PNC), with a focus on its real integration in multi-hop wireless networks. Our first contribution mainly consists of the design of a dynamic and centralized access management approach capable of detecting and exploiting PNC opportunities in a star network. Motivated by the results obtained by simulation on this minimalist topology, we then defined a new framework for using this technique in a larger and more realistic context made of real equipment. Thus, we first proposed and implemented a new physical layer dedicated to the PNC using heterogeneous radio equipment to then design and test on a real testbed a distributed MAC layer which supports the PNC and which has proven significant gains in throughput and reliability compared to existing solutions.

Keywords : Multi-hop Wireless Networks, MAC protocol, TDMA, Carrier-Sensing Multiple Access, Physical-Layer Network Coding, Two-Way Relay Channel, Software Defined Radio, GNU Radio.

Table des matières

Table des figures	x
Liste des tableaux	xiv
Introduction générale	1
1 La gestion des interférences dans les réseaux sans fil multi-sauts	5
1.1 Introduction	5
1.2 Généralités sur les réseaux sans fil multi-sauts	5
1.2.1 Caractéristiques spécifiques des réseaux sans fil multi-sauts	8
1.2.2 Les limites des réseaux sans fil multi-sauts	9
1.3 La gestion des interférences dans les réseaux sans fil multi-sauts	10
1.3.1 Éviter les interférences : une affaire de contrôle d'accès	11
1.3.2 Traitement des interférences :	22
1.3.3 Exploitation des interférences : Un nouveau paradigme	28
1.4 Conclusion	33
2 État de l'art sur la technique Network Coding dans les réseaux sans fil multi-sauts	34
2.1 Introduction	34
2.2 Le Physical-layer Network Coding : Principe de base	34
2.3 Au delà du XOR PNC : Autres techniques de relayage	37
2.3.1 <i>Decode-And-Forward</i> (DAF)	37
2.3.2 <i>Amplify-And-Forward</i> (AAF)	38

2.3.3	<i>Compute-And-Forward (CAF)</i>	38
2.4	Au delà du TWRC : Autres topologies	39
2.4.1	Le PNC papillon	39
2.4.2	Le système intra-flux	40
2.4.3	Le système Multi-Way Relay Channel (Network) (MWRC ou MWRN)	41
2.5	Le NC dans les réseaux sans fil multi-sauts : Etat de l'art et classification .	43
2.5.1	Classification selon la couche physique	45
2.5.2	Classification selon la couche MAC	55
2.6	Conclusion	61
3	DSNCP : Protocole MAC dynamique et adapté au Network Coding	62
3.1	Introduction	62
3.2	Dynamic Slotted Network Coding Protocol	64
3.2.1	Préliminaires	64
3.2.2	La Période de Contention d'Accès (PCA)	67
3.2.3	La Période de Transmission des Données (PTD)	69
3.2.4	Exemple illustratif	73
3.2.5	Traitement des exceptions	77
3.3	Expérimentation et discussion	79
3.4	Synthèse	86
3.5	Conclusion	87
4	Proposition et implémentation d'une couche physique adaptée au PNC en utilisant des radios logicielles hétérogènes	88
4.1	Introduction	88
4.2	Motivation	89
4.3	Prototype de la couche physique PNC proposée	90
4.4	Implémentation de la technique PNC sous le modèle TWRC en utilisant des SDRs hétérogènes	94
4.4.1	Étude préliminaire	94

4.4.2	Mise en place du <i>testbed</i>	100
4.5	Résultats préliminaires	108
4.6	Synthèse et discussion	112
4.7	Conclusion	113
5	DNCP : Protocole MAC distribué et adapté au PNC	114
5.1	Introduction	114
5.2	Identification des problématiques de départ	115
5.3	Distributed Physical-layer Network Coding MAC Protocol (DNCP)	116
5.3.1	Modélisation du système	117
5.3.2	Processus d'échange de paquets de la transmission PNC	119
5.3.3	Transmission ordinaire multi-saut	121
5.3.4	Paramétrage du NAV	122
5.3.5	Traitement des exceptions	124
5.3.6	Structure des trames	128
5.4	Implémentation et résultats	129
5.4.1	Configuration de l'expérimentation	129
5.4.2	Analyse des résultats	135
5.4.3	Résultats de la topologie <i>TWRC</i>	136
5.4.4	Résultats de la topologie <i>Full</i>	138
5.4.5	Résultats de la topologie <i>Line</i>	140
5.5	Conclusion	141
	Conclusion et Perspectives	143
	Liste des publications	146
	Bibliographie	147

Table des figures

1	La gestion des interférences dans les réseaux sans fil multi-sauts	5
1.1	Réseau ad hoc vs réseau à infrastructure	6
1.2	Architecture typique d'un réseau mobile ad-hoc [1]	7
1.3	Architecture typique de réseaux de capteurs sans fil [2]	7
1.4	Exemple simple de réseaux sans fil maillés [3]	8
1.5	Exemple simple de réseau ad-hoc véhiculaire [4]	8
1.6	Visibilité des noeuds du support partagé [5].	12
1.7	Structure d'un slot de temps et de la trame HRMA [6].	13
1.8	Neutralisation des interférences basée sur l'amplification pour les réseaux à deux sauts [7].	23
1.9	Un système d'alignement des interférences avec trois sources et trois destinations. Chaque source transmet un flux de données à une destination et chaque nœud est équipé de deux antennes [8].	24
1.10	Le schéma du processus de la technique SIC [9].	26
1.11	Système de deux émetteurs partageant un récepteur commun [10].	27
1.12	Système avec antennes omnidirectionnelles (sans <i>beamforming</i>) [11].	29
1.13	Système avec antennes directionnelles (avec <i>beamforming</i>) [11].	29
1.14	Système MIMO virtuel avec diversité coopérative [12].	31
1.15	Système MIMO virtuel avec la technique de détection conjointe de multi-utilisateurs [12].	31
1.16	Application du PNC dans le système TWRC.	32

2	État de l'art sur la technique Network Coding dans les réseaux sans fil multi-sauts	34
2.1	Le système sans interférences.	35
2.2	Le système PNC simple (<i>Simple Network Coding</i> (SNC/NC)).	36
2.3	Les résultats des paquets décodés par les noeuds feuilles <i>A</i> et <i>B</i>	36
2.4	Le système Physical-layer Network Coding	37
2.5	La topologie papillon	40
2.6	Le PNC intra-flux	41
2.7	Le système Multi-Way Relay Channel	42
2.8	Le système sans interférences	42
2.9	Le système Multiple Access Channel Coding	43
2.10	Réseau relais diamant [13].	51
2.11	Système TWRC avec deux noeuds d'aide (<i>helpers</i>).	57
2.12	Les étapes de l'ordonnancement opportuniste proposé dans [14].	58
3	DNCP : Protocole MAC dynamique et adapté au Network Coding	62
3.1	Le système SNC (a) et le système PNC (b).	63
3.2	Réseau général divisé en sous-réseaux de topologies en étoile (PNC Atomes) [15].	64
3.3	Format de la super trame du protocole DSNCP.	66
3.4	Format de la trame $Init_F$	67
3.5	Format de la trame RTS	68
3.6	Format de la trame CTS	68
3.7	Le diagramme de flux DSNCP des noeuds feuilles.	71
3.8	Le diagramme de flux DSNCP de noeud relais.	72
3.9	La topologie de l'exemple illustratif.	73
3.10	Le message $Init_F$ envoyé par le relais.	73
3.11	Les messages RTS reçus par le relais.	74
3.12	Le message CTS_{SNC} envoyé par le relais.	75
3.13	Le message CTS_{PNC} envoyé par le relais.	75

3.14	L'ordonnancement du DSNCP SNC de l'exemple présenté dans la figure 3.9.	76
3.15	L'ordonnancement du DSNCP PNC de l'exemple présenté dans la figure 3.9.	77
3.16	Un exemple de flux de données d'une topologie étoile composée de 8 feuilles et d'un nœud relais	80
3.17	Résultats des performances en fonction de la densité du réseau	82
3.18	Résultats des performances en fonction de la charge du trafic	83
3.19	Les gains en délai et en <i>throughput</i> du DSNCP par rapport aux protocoles TDMA et CSMA/CA.	85
4	Proposition et implémentation d'une couche physique adaptée au PNC en utilisant des radios logicielles hétérogènes	88
4.1	Le système Physical-layer Network Coding (TWRC)	91
4.2	Le prototype des deux nœuds feuilles <i>A</i> et <i>B</i>	92
4.3	Le prototype du nœud relais <i>R</i>	93
4.4	Erreur lors de l'utilisation du HackRF SDR en alternance, une fois comme émetteur et une fois comme récepteur.	95
4.5	Le signal reçu par le HackRF.	96
4.6	Le signal reçu par l'USRP b210.	96
4.7	Le signal reçu par l'ADALM-Pluto.	97
4.8	Les couches intégrées entre les SDRs et la plateforme GNU Radio.	98
4.9	Les SDRs disponibles pour la plateforme GNU Radio	99
4.10	Interface de GNU Radio	101
4.11	Le <i>testbed</i> utilisé.	102
4.12	Les blocs GNU Radio du nœud <i>A</i>	103
4.13	Les blocs GNU Radio du nœud <i>B</i>	103
4.14	Les blocs GNU Radio du relais <i>R</i>	104
4.15	Les blocs GNU Radio du bloc hiérarchique Ofdm Core TX.	106
4.16	Les blocs GNU Radio du bloc hiérarchique Ofdm Core RX.	107
4.17	Signal envoyé par le nœud <i>A</i>	108
4.18	Signal envoyé par le nœud <i>B</i>	108

4.19	Signal reçu par le relais en mode veille	109
4.20	Signal reçu par le relais en mode réception	110
4.21	Signal reçu par le relais en mode réception en utilisant la visualisation de type <i>watterfall</i>	110
4.22	Le message P_1 du nœud A reçu par le nœud relais R	111
4.23	Le message P_2 du nœud B reçu par le nœud relais R	111
4.24	Le message PNC mappé $P_1 XOR P_2$ des deux messages P_1 et P_2	112
5	DNCP : Protocole MAC distribué et adapté au PNC	114
5.1	Le système Physical-layer Network Coding (TWRC)	115
5.2	La topologie considérée du réseau.	118
5.3	Exemple de transmission PNC multi-sauts en utilisant la topologie consi- dérée illustrée par la figure 5.2.	120
5.4	Exemple d'une transmission ordinaire multi-sauts en utilisant la topologie considérée illustrée par la figure 5.2.	122
5.5	Diagramme de flux du nœud source.	126
5.6	Diagramme de flux du relais, de la destination et de la station cachée. . . .	127
5.7	Format des trames utilisées dans DNCP.	129
5.8	La topologie TWRC.	130
5.9	La topologie Full.	130
5.10	La topologie Line.	131
5.11	Le bloc GRC DNCP.	132
5.12	Vérification de l'état de canal.	134
5.13	Résultats de performance pour la topologie <i>TWRC</i>	137
5.14	Résultats de performance pour la topologie <i>Full</i>	139
5.15	Résultats de performance pour la topologie <i>Line</i>	140

Liste des tableaux

1 La gestion des interférences dans les réseaux sans fil multi-sauts	5
1.1 Les points de différence entre les protocoles TDMA et CSMA/CA.	22
2 État de l’art sur la technique Network Coding dans les réseaux sans fil multi-sauts	34
2.1 Performances des techniques de relayage, DAF, AAF, et CAF en fonction du régime SNR.	39
2.2 Les paramètres de la couche physique des techniques de modulation hétérogène.	46
2.3 Les paramètres de la couche physique des techniques de l’état du canal.	49
2.4 Les paramètres de la couche physique des techniques de l’estimation du gain de canal.	50
2.5 Les paramètres de la couche physique des techniques proposées pour différentes topologies du système.	52
2.6 Les paramètres de la couche physique des techniques proposées pour la synchronisation et l’ordonnancement des nœuds feuilles.	53
2.7 Les paramètres de la couche physique du technique proposée pour la sécurité.	53
2.8 Les paramètres de la couche physique des techniques qui proposent une implémentation réelle de la technique PNC.	55
3 DNCP : Protocole MAC dynamique et adapté au Network Coding	62

3.1	Les paramètres d'implémentation des couches physiques de PNC convenant au protocole DSNCP.	66
3.2	L'ordonnancement de la période de transmission des données NC	75
3.3	L'ordonnancement de la période de transmission des données PNC	75
3.4	Les paramètres utilisés pour l'implémentation.	79
4	Proposition et implémentation d'une couche physique adaptée au PNC en utilisant des radios logicielles hétérogènes	88
4.1	Prix des différents SDRs	89
4.2	Plateformes utilisées dans l'état de l'art.	90
4.3	Les paramètres utilisés pour l'exemple.	95
4.4	Les paramètres utilisés pour implémenter la couche physique PNC.	105
5	DNCP : Protocole MAC distribué et adapté au PNC	114
5.1	Description des ports utilisés dans le bloc GRC DNCP	132
5.2	Configuration de la couche MAC	133
5.3	Configuration de la couche PHY	133

Liste des Acronymes

AAF	Amplify-And-Forward.
ACK	ACKnowledgement.
ANC	Analog network coding.
ATC	Answer-to-Cooperate.
AWGN	Additive white Gaussian noise.
BCP	BroadCast Phase.
BER	Bit Error Rate.
BG	Bruit gaussien.
BMA-RR	Bit-Map-Assisted Round-Robin .
BNER	Taux d'erreur binaire.
BPSK	Binary Phase-Shift Keying.
(B,Q,M)PSK	(Binary,Quadrature,M-level) Phase Shift Keying.
BQ-PNC	Bi-quadrature physical-layer network coding.
BS	La station de base.
BSS	Basic Service Set.
CA	Collision Avoidance.
CAF	Compute-And-Forward.
CCNC	Channel Coding Network Coding.
CD-NC	Channel Decoding Network Coding.
CDMA	Code Division Multiple Access.
CFO	Carrier Frequency Offset.
CPM	Continuous Phase Modulation.
CS	Carrier Sensing.
CSI	L'état du canal/Shannel State Information.
CSMA	Carrier Sense Multiple Access.
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance.
CTS	Clear To Send.
D-MPNC	PNC multi-sauts direct.
DAF	Decode-And-Forward.
DCF	Distributed Coordination Function.
DEAF	DNoise-And-Forward.

DNC	Digital Network Coding.
DNCP	Distributed Physical-layer Network Coding MAC Protocol.
DRTS	RTS directionnelle.
DSNCP	Dynamic Slotted Network Coding Protocol.
FANETs	Flying Adhoc NETworks.
FCS	Frame Check Sequence.
FDM	Frequency Division Multiplexing.
FDMA	Frequency Division Multiple Access.
FHSS	Frequency-Hopping Spread Spectrum.
FPGA	Field-Programmable Gate Array.
FTS	Forwarder-to-send.
GPS	Système de positionnement global.
GRC	GNU Radio Companion.
H-PNC	Hierarchical Physical Layer Network Coding.
HR	La réservation de saut.
HRMA	Hop-reservation multiple access.
IC	Interference Cancellation.
ICI	Inter-Carrier Interference.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
IFS	InterFrame Space.
IoT	Internet des Objets.
ISM	Industriel, Scientifique et Médical.
LDF	Lossy-Decode-and-Forward.
LDLC	Low-Density Lattice Codes.
LDPC	Low-density-parity-check.
LEACH	Low-energy adaptive clustering hierarchy.
LLR	LikeLihood Rate.
LO	Local Oscillator.
LP-WAN	Low Power Wide Area Network.
M-PAM	M Pulse-Amplitude Modulation.
MAC	Medium Access Control.
MANETs	Mobile Ad Hoc NETworks.
MAP	Multiple Access Phase.
MARC	Multiple access relay channel.
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output.
MWRC	Multi-Way Relay Channel.
MWRN	Multi-Way Relay Network.
MWS	Maximum Weighted Scheduling.
NAV	Network Allocation Vector.
NC	Network Coding.

NC-CD	Network Coding Channel Decoding.
NOMA	L'accès multiple non orthogonal.
NS2	Network Simulator 2.
NS3	Network Simulator 3.
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing.
OSI	Open Systems Interconnection.
PCA	Période de Contention d'Accès.
PCF	Point Coordination Function.
PHY	Couche Physique.
PNC	Physical-Layer Network Coding.
PTD	Période de transmission des données.
QAM	Quadrature Amplitude Modulation.
RPNC	Realtime Physical-layer Network Coding.
RTS	Request To Send.
S-MPNC	PNC multi-sauts stocké.
SDR	Software Defined Radio.
SER	Symbol Error Rate.
SIC	Successive Interference Cancellation.
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio.
SNC	Simple Network Coding/PNC simple.
SNR	Signal-to-Noise Ratio.
SRP	Paquets reçus avec succès.
STDMA	Self Organized Time Division Multiple Access.
SYN	Synchronisation.
TDMA	Time Division Multiple Access.
TDP	Paquets de données transmis.
TWDRRC	Two-Way Diamond Relay Channel.
TWRC	Two-Way Relay Channel.
UHD	Universal Software Radio Peripherals Hardware Driver.
USAP	Unifying dynamic distributed multichannel TDMA Slot Assignment Protocol.
USD	United States Dollar.
USRP	Universal Software Radio Peripherals.
VANETs	Vehicular Adhoc NETworks.
VCS	Virtual Carrier Sensing.
WLAN	Wireless Local Area Network.
WMNs	Réseaux sans fil maillés .
WPAN	Wireless Personal Area Network.
WSNs	Wireless Sensor Networks.
XOR	eXclusive OR.
5G	Fifth generation.

Introduction générale

Contexte et Problématique

L'essor des technologies sans fil offre aujourd'hui de nouvelles perspectives dans le domaine des télécommunications. Depuis leur émergence dans les années 70, les réseaux sans fil multi-sauts, aussi appelés réseaux adhoc ou encore MANETs (Mobile Ad Hoc NETWORKs), ont gagné un intérêt majeur et une popularité croissante. Ces réseaux, souvent mobiles et potentiellement à grande échelle, sont conçus afin de s'affranchir des réseaux filaires traditionnels, car ils se distinguent par leur capacité à s'organiser de manière autonome et à être déployés en dehors de toute infrastructure câblée fixe. Grâce à ces caractéristiques, ils représentent, de nos jours, un candidat potentiel très sérieux aux réseaux de collecte de l'Internet des Objets (IoT).

Dans ce type de réseaux et en l'absence d'entités de centralisation, la connectivité de bout en bout est assurée au moyen de communication multi-sauts et les échanges de données sont relayées de proche en proche par les nœuds eux-mêmes. Ceci implique, contrairement aux réseaux à infrastructure traditionnels, que les débits atteignables dans de tels réseaux sont particulièrement limités dès lors que le nombre d'utilisateurs augmente. On considère parfois même qu'une transmission d'une source vers une destination est effective seulement si tous les utilisateurs proches de la destination restent silencieux durant toute la période d'émission. On s'assure ainsi que le SNR (Signal-to-Noise Ratio) reçu à la destination, est suffisant pour que celle-ci puisse décoder le message qui lui est destiné.

Ainsi, la gestion des interférences radio est devenue l'un des principaux défis à relever pour augmenter la capacité des réseaux sans fil multi-sauts et fiabiliser les transmissions des nœuds clients surtout devant la demande croissante de débits de données plus élevés et le nombre croissant d'appareils communicants.

Cette volonté d'éviter les interférences, reposant sur l'idée que deux transmissions

voisines ne peuvent pas être établies simultanément et dans la même bande de fréquence, a suscité plusieurs travaux de recherche faisant intervenir les deux couches basses du modèle OSI, à savoir la sous couche MAC et la couche Physique.

En effet, historiquement, la gestion des interférences a été régie essentiellement au niveau MAC par des mécanismes d'ordonnancement et d'accès à un canal partagé encore en vigueur actuellement. Dans ce type de solutions, il s'agit de trouver des algorithmes de division (TDMA, FDMA, CDMA, etc.) [16] [17] [18] ou de concurrence (CSMA) [19] entre les nœuds désirant établir des transmissions à un instant, une bande de fréquence, et une zone géographique donnée. Ces techniques, bien que fiables et efficaces pour empêcher tout risque d'interférences, ne permettent pas une exploitation valorisante des ressources radio, brident les possibilités offertes par les progrès de communication numérique et déploient un *overhead* (en temps et énergie consommée) considérable pour coordonner les différentes transmissions.

Dans un autre volet, l'apport de nouvelles techniques de transmission et les avancées importantes des technologies matérielles, ont suscité l'émergence d'autres solutions dites de traitement des interférences comme les technologies MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) [20] et les solutions basées sur la neutralisation [21] ou l'alignement d'interférence [8]. Ces techniques autorisent un nœud à recevoir plusieurs signaux simultanément tout en conservant sa capacité à décoder l'information ou les informations qui lui est destinée. Celles-ci visent essentiellement la fiabilisation des transmissions en réduisant les erreurs de décodage et l'amélioration de la réutilisation spatiale dans les réseaux sans-fil en augmentant le nombre de transmissions simultanées. Ces techniques, bien qu'elles présentent des gains théoriques significatifs, sont soit limitées par les contraintes matérielles imposées (comme pour l'exemple des systèmes MIMO), soit sont assez complexes à mettre en pratique en particulier dans un milieu distribué en large échelle comme c'est le cas pour les techniques de traitement de signal.

Afin de réconcilier ces deux visions, un nouveau paradigme : le Physical-layer Network Coding (PNC) [22], a émergée. Selon lui, il est désormais possible, grâce à différentes techniques avancées de communication numérique d'exploiter ces interférences, et ce, sans modification particulière du matériel et ne nécessitant pas de coopération trop coûteuse entre les nœuds. Cette technique de transmission, conçue initialement pour le modèle Two-Way Relay Channel (TWRC) autorise, sous certaines conditions, deux transmissions bidirectionnelles simultanées et dans la même bande de fréquence en permettant aux nœuds source et destination de déchiffrer le signal résultat de la « collision ». Ces échanges passent souvent à travers un nœud relais qui code les signaux interférents et orchestre leurs acheminements jusqu'aux destinations. Ceci, bien évidemment, permet d'améliorer

la réutilisation spatiale dans les réseaux sans-fil en augmentant le nombre de transmissions simultanées.

Dans ces travaux de thèse, nous nous intéressons à l'intégration de la technique PNC dans les réseaux sans fil multi-sauts à grande échelle en utilisant un testbed réel, afin de mettre en évidence puis de viser à exploiter les gains prometteurs de cette technique PNC en termes de *throughput* (débit) et de délai, tout en profitant pleinement des ressources disponibles sur le réseau.

Contributions et Organisation du manuscrit

Le présent manuscrit synthétise nos travaux de thèse et est scindé en 5 chapitres décrivant nos principales contributions :

- Dans le **premier chapitre**, après un bref aperçu des réseaux sans fil multi-sauts, nous proposons une vue d'ensemble des techniques actuelles visant la gestion des interférences dans ce type de réseaux. Nous distinguons des solutions ayant pour principe l'évitement des interférences et qui se concentrent sur des protocoles de la couche d'accès centralisés ou distribués. La deuxième catégorie de solutions, exploite les progrès réalisés au niveau des algorithmes de traitement de signal et les capacités matérielles inhérentes pour traiter les interférences en autorisant un nœud à recevoir plusieurs signaux simultanément et décoder seulement le signal qui lui est dédié. Nous étudions, finalement, la troisième catégorie de solutions qui exploitent les interférences avec un focus particulier sur la technique PNC qui constitue le concept central de ces travaux de thèse.
- Le **deuxième chapitre** sera, ainsi, dédié à une étude approfondie de cette technique PNC : son principe de base, les hypothèses de fonctionnement, les domaines d'application et les principaux défis qui s'imposent. Nous proposons, également, un tour d'horizon des principaux travaux de la littérature ayant contribué à l'élaboration et à l'intégration réelle de cette technique dans les réseaux distribués.
- Dans le **troisième chapitre**, nous présentons notre première contribution qui consiste en un protocole d'accès dynamique labellisé *Dynamic Slotted Network Coding Protocol (DSNCP)*, conçu pour détecter efficacement les opportunités de Network Coding et appliquer cette technique sur les topologies en étoile (également appelées PNC Atomes). Nous basons notre conception sur le protocole MAC bien connu TDMA avec des modifications importantes qui apportent un dynamisme et une flexibilité à la politique d'ordonnancement. Les résultats obtenus par simu-

lution sont concluants pour les topologies simples considérées et sous différentes contraintes de densité et de charge de trafic. Les gains en débit obtenus par rapport aux protocoles basiques TDMA et CSMA/CA ont avoisiné les 50% pour certains scénarios. Cependant, ce bilan est plus mitigé pour des topologies plus complexes où on considère une couche physique plus réaliste.

- Dans le **quatrième chapitre**, motivés par les résultats obtenus dans le chapitre précédent et devant être validés réellement, la rareté des travaux d'implémentation de cette technique, nous définissons un nouveau cadre physique pour une intégration réelle de la technique PNC dans les réseaux sans fil multi-sauts. Plus explicitement, nous concevons une couche physique dédiée capable de supporter les scénarios PNC sur des équipements radio hétérogènes. Les composants *Software Defined Radio (SDR)* utilisés ont posé différentes contraintes que nous avons tenu à dégager d'une façon détaillée et pour lesquelles nous avons proposé les solutions appropriées.
- Dans le **cinquième chapitre**, en vue de concrétiser l'utilité de la couche physique conçue dans le chapitre précédent, nous proposons un nouveau protocole d'accès distribué et aléatoire inspiré du standard CSMA/CA. Grâce à un mécanisme *handshake* adapté, les nœuds sont capables de détecter les opportunités de PNC et coordonner, ainsi, leurs transmissions de données tout en évitant les problèmes de stations cachées. Une implémentation réelle couplée à une couche physique dédiée a été suivie d'une évaluation des performances sous différentes topologies et donnant lieu à des résultats prometteurs en termes de délai et *throughput* en se comparant au CSMA/CA conventionnel.
- Le présent manuscrit est clôturé par une **conclusion** et plusieurs perspectives à explorer en continuité de cette thèse.

La gestion des interférences dans les réseaux sans fil multi-sauts

1.1 Introduction

Ce premier chapitre aborde les réseaux sans fil multi-sauts en explorant leurs caractéristiques générales et leurs limites spécifiques. En particulier, nous nous intéressons au problème des interférences considéré comme étant un défi majeur dans ce type de réseaux qui a un impact direct sur les performances voulues. L'objectif est, donc, de fournir une vue d'ensemble des techniques de gestion des interférences dans les réseaux sans fil multi-sauts et de dresser une liste représentative des principales contributions existantes dans ce sens.

1.2 Généralités sur les réseaux sans fil multi-sauts

Imaginé dans les années 1970, les réseaux dits ad-hoc, réseaux sans fil multi-sauts ou encore MANETs (Mobile Ad Hoc NETWORKS), sont des réseaux sans fil, mobiles et potentiellement à grande échelle conçus afin de s'affranchir des réseaux filaires traditionnels. Ils se distinguent par leur capacité à s'organiser de manière autonome et à être déployés en dehors de toute infrastructure [3]. En particulier, en l'absence des entités de centralisation des réseaux traditionnels de type stations de base, les fonctions routage des paquets ou de relayage des trames sont assurées par les nœuds eux-mêmes.

Comme illustré sur la figure 1.1, quand un réseau à infrastructure est disponible, les

noeuds communiquent entre eux à travers une station de base à proximité. Mais, dans le cas d'un réseau ad hoc sans infrastructure, les communications seront relayées de proche en proche de la source jusqu'à la destination selon la portée des noeuds et la distance les séparant.

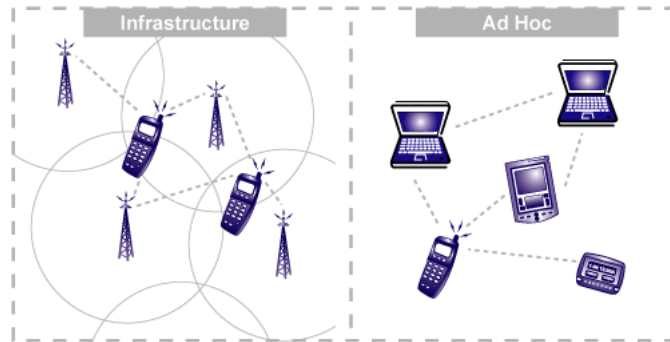


FIGURE 1.1 – Réseau ad hoc vs réseau à infrastructure

Depuis leur apparition et grâce au développement rapide des technologies sans fil, de l'Internet des Objets, et de la croissance explosive d'Internet, les réseaux sans fil multi-sauts connaissent une évolution importante leur donnant un intérêt particulier dans de nombreuses situations. En plus de pallier la destruction des infrastructures lors de catastrophes naturelles, ils se révèlent particulièrement efficaces pour les rassemblements temporaires (concert de musique, conférence, visite guidée, etc.). Dans un terrain de guerre également, ce type de réseaux facilite la communication entre soldats lors de leurs interventions militaires [23] [24].

Les applications de ces réseaux sans fil multi-sauts sont nombreuses au point qu'on constate l'émergence de variantes dédiées telles que les réseaux VANETs (Vehicular Adhoc NETWORKS) faisant référence aux réseaux de véhicules, les FANETs (Flying Adhoc NETWORKS) qui sont spécifiques aux drones, les WSN (Wireless Sensor Networks) dédiés aux communications entre capteurs, les LP-WAN dédiés à l'IoT, etc. Chacun de ces réseaux présente des caractéristiques spécifiques adaptées au contexte mais l'architecture de communication est la même dans le sens où les noeuds collaborent pour acheminer un trafic de données entre une source et une destination.

Certaines variantes de ce type de réseaux sont détaillées comme suit [25] :

- Les réseaux mobiles ad-hoc (MANETs) sont des réseaux sans fil auto-organisés qui peuvent être utilisés dans des environnements où il n'y a pas d'infrastructure de réseau existante ou lorsque la mise en place d'une infrastructure est difficile ou coûteuse [26] [1] [27]. Les noeuds dans un MANET se connectent directement les uns aux autres et peuvent se déplacer librement, sans l'aide d'un point d'accès

central. La figure 1.2 montre un exemple d'architecture typique pour les MANETs.

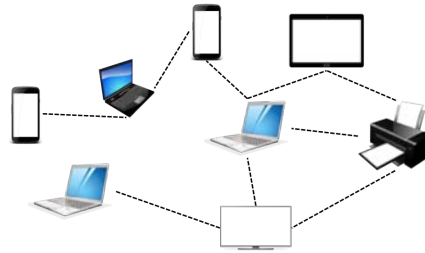


FIGURE 1.2 – Architecture typique d'un réseau mobile ad-hoc [1]

- Les réseaux de capteurs sans fil (WSNs) sont des réseaux sans fil qui utilisent des capteurs pour surveiller et collecter des données [2] dans des environnements tels que les zones industrielles, les sites de surveillance, les terrains militaires, etc. L'architecture typique de ces WSNs est illustré par la figure 1.3. Les nœuds peuvent être statiques ou mobiles, et sont équipés de capteurs pour collecter des données telles que la température, la pression, l'humidité, la luminosité, etc.

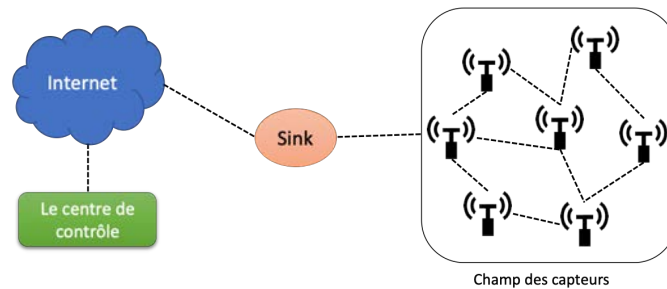


FIGURE 1.3 – Architecture typique de réseaux de capteurs sans fil [2]

- Les réseaux sans fil maillés (WMNs), souvent appelés Mesh Networks [28] [3] [29] et sont utilisés pour fournir une connectivité réseau dans des zones géographiques étendues [3] [25]. Les nœuds dans un WMN sont connectés entre eux pour former un maillage leur permettant de communiquer directement ou via d'autres nœuds intermédiaires. La figure 1.4 montre un exemple de réseau WMN.

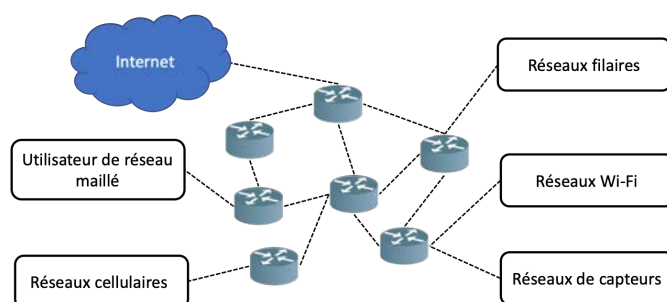


FIGURE 1.4 – Exemple simple de réseaux sans fil maillés [3]

- Les réseaux ad-hoc véhiculaires (VANETs) sont utilisés pour permettre la communication entre les véhicules et les infrastructures de la route [30]. Les nœuds dans un VANET peuvent être des véhicules, des capteurs de route, des feux de signalisation, etc [30]. Un exemple de réseau VANET est illustré par la figure 1.5.

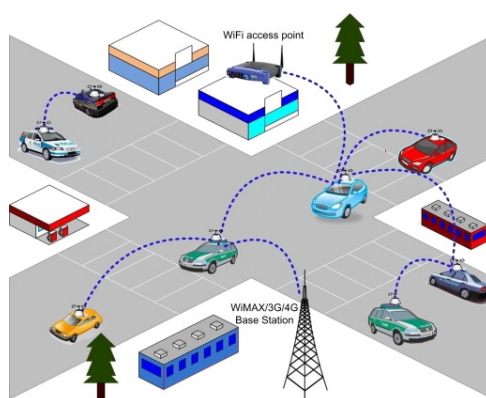


FIGURE 1.5 – Exemple simple de réseau ad-hoc véhiculaire [4]

1.2.1 Caractéristiques spécifiques des réseaux sans fil multi-sauts

Les réseaux sans fil multi-sauts présentent de nombreux avantages qui renforcent leur compétitivité face aux solutions de déploiement utilisant des réseaux filaires traditionnels. Parmi ces avantages, nous citons les principaux :

- **Déploiement rapide et simplifié** : la caractéristique d'auto-configuration permet un déploiement facile et rapide des réseaux sans fil multi-sauts du moment où on s'affranchit du besoin de câblage ou de connexion à une prise murale.
- **Le coût réduit de déploiement** : en l'absence de câblage, l'installation des réseaux sans fil multi-sauts est beaucoup moins coûteuse que les réseaux filaires traditionnels. De plus, leur capacité à fonctionner de façon autonome minimise toute forme d'intervention.

- **Grande évolutivité de la couverture** : un réseau sans fil multi-saut peut être déployé dans des zones non accessibles ou zones blanches car l'aspect multi-saut permet d'étendre la couverture du réseau sans avoir besoin d'ajouter de nouveaux points d'accès. L'insertion d'un nouveau nœud, et donc, l'extension du réseau, est facilitée et ne nécessite pas ou peu de reconfiguration manuelle du réseau.
- **Tolérance aux pannes** : si un hôte du réseau n'est plus joignable, il est souvent possible d'accéder aux informations du réseau en empruntant une route différente. Ainsi, cet aspect multi-chemins permet de résister aux défaillances de certains nœuds ou des liens radio qui, par nature, évoluent beaucoup en fonction des conditions de propagation radio.
- **Interopérabilité** : les réseaux sans fil multi-saut prennent en charge plusieurs types d'accès au réseau et sont souvent compatibles avec une variété de configurations matérielles et logicielles.

1.2.2 Les limites des réseaux sans fil multi-sauts

Comme mentionné précédemment, les réseaux sans fil multi-sauts présentent des caractéristiques spécifiques leur donnant souplesse et flexibilité, une forte tolérance aux pannes et une qualité de service satisfaisante. Cependant, ces performances s'obtiennent au prix de la complexification de la gestion du réseau et soulèvent plusieurs limites et enjeux liés essentiellement à l'aspect sans fil dans un milieu dynamique. Nous citons à titre d'exemple certains défis ou limites :

- L'affaiblissement du canal dû aux obstacles et l'effet multi-trajets,
- La dégradation du débit et l'augmentation du délai de transit dû au caractère multi-sauts,
- La réutilisation des fréquences en raison de la limitation de la bande passante et du spectre,
- L'interférence entre les dispositifs sans fil due à la nature de diffusion de la communication sans fil ce qui réduit considérablement la fiabilité des transmissions,
- La dynamique et l'instabilité des conditions du réseau due à la mobilité, aux interférences et à la variation de la puissance du signal avec la distance [1],
- L'insécurité des données qui circulent à travers plusieurs nœuds du réseau d'où la nécessité de mettre en place, outre le mécanisme d'authentification, d'un protocole de sécurité fiable,
- Le passage à l'échelle ou scalabilité qui limite les performances du réseau par un facteur d'au moins $O(1/\sqrt{n})$ à mesure que le nombre de nœuds n augmente [31].

De tels inconvénients, communs à tous les types de réseaux sans fil multi-sauts, ont été pris en compte lors de la conception des applications ou des protocoles comme étant des contraintes.

Néanmoins, malgré une littérature pléthorique sur ces réseaux sans fil multi-sauts, il convient de reconnaître que leur utilisation dans le domaine des communications civiles reste marginale et ce malgré les nombreux cas d'utilisations possibles. Ceci est dû, essentiellement, à la dégradation significative des performances du réseau, notamment en débit, lorsque le nombre de noeuds augmente. Ce constat est expliqué souvent par la nature même du support sans fil partagé par plusieurs noeuds en même temps et qui induit à des collisions ou, communément appelé ici, interférences.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à cette problématique qui affecte le plus les deux couches basses du modèle OSI à savoir la couche Physique (PHY) et la couche liaison de données (particulièrement la sous couche MAC), tout en ayant des répercussions sur la couche de routage au dessus.

Dans ce qui suit, nous commençons par une vue d'ensemble des techniques de gestion des interférences dans les réseaux sans fil multi-sauts afin de dégager les axes potentiellement attractifs pour y définir nos contributions.

1.3 La gestion des interférences dans les réseaux sans fil multi-sauts

L'interférence est un problème courant dans les systèmes de communication sans fil, et elle induit souvent à un impact drastique sur les performances du système, le *débit* en particulier. En effet, dans l'un des travaux fondamentaux de la discipline [32], les auteurs Gupta et Kumar ont montré, par exemple, que dans un réseau ad-hoc quelconque, le débit offert à chaque utilisateur décroît inévitablement quand le nombre de noeuds augmente et il serait judicieux alors de limiter l'utilisation de ces réseaux à des scénarios de petite taille afin de conserver un débit par utilisateur raisonnable. Ce constat vient du fait qu'une transmission d'une source vers une destination n'est effective que si tous les utilisateurs proches de la destination restent silencieux durant toute la période d'émission. On s'assure ainsi que le SNR (Signal-to-Noise Ratio) reçu à la destination, est suffisant (supérieur à un certain seuil) pour que celle-ci puisse correctement décoder le message qui lui est destiné. Le SNR peut être calculé en utilisant la formule suivante :

$$SNR = \frac{P_{Signal}(S, D)}{\sum P_{Signal}(i, j) + BG} \quad (1.1)$$

$P_{Signal}(S, D)$ représente la puissance du signal reçu par le nœud destinataire D à partir du signal transmis par le nœud source S , BG est le bruit gaussien, et $\sum P_{Signal}(i, j)$ est la puissance de l'ensemble des signaux transmis par d'autres nœuds en même temps que le nœud source S .

Cette volonté d'éviter les interférences, reposant sur l'idée que deux transmissions voisines ne peuvent pas être établies simultanément et dans la même bande de fréquence, a d'ailleurs défini les contours des principaux mécanismes d'ordonnement et d'accès à un canal partagé (couche MAC) encore en vigueur actuellement.

Dans cette section, nous allons examiner les techniques utilisées pour gérer ces interférences et nous distinguons trois grandes familles de solutions, chacune répondant à un objectif précis : éviter, traiter ou exploiter les interférences. Dans la première famille de solutions, on propose généralement des mécanismes d'ordonnement empêchant les interférences de se produire. Les solutions de la deuxième famille ont pour objectif de traiter les interférences afin d'augmenter la réutilisation spatiale. Tandis que les propositions de la troisième catégorie autorisent des transmissions voisines, simultanées et sur la même bande de fréquence et exploitent ainsi ce partage en temps et en fréquence pour fiabiliser les transmissions.

1.3.1 Éviter les interférences : une affaire de contrôle d'accès

Généralement considéré comme l'une des principales causes de perte de trames et d'énergie, le phénomène d'interférence est géré par la communauté scientifique à travers deux visions distinctes : une vision physique, basée sur la puissance du signal perçue par rapport à un bruit avoisinant et dans laquelle on ordonne les transmissions de sorte que le SNR (Signal-to-Noise Ratio) d'une transmission en cours soit supérieur à un seuil donné dont la valeur dépend principalement des caractéristiques de la couche physique et des performances attendues [33]. La vision protocolaire, d'un autre côté, est fondée sur la distance entre les nœuds pour définir une portée de transmission et une portée d'interférences comme illustrée sur la figure 1.6.

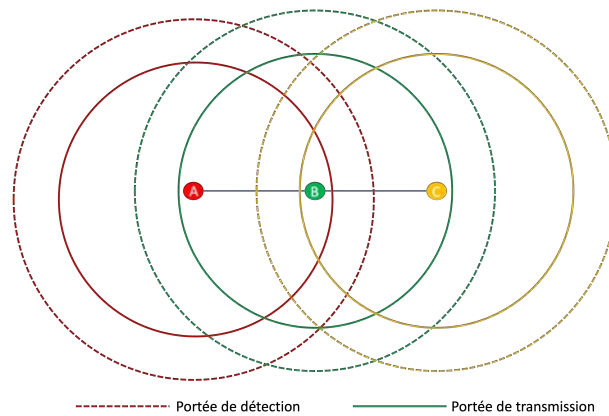


FIGURE 1.6 – Visibilité des noeuds du support partagé [5].

Selon cette modélisation, pour réussir une transmission en cours, on ordonnance les communications de sorte que tous les voisins proches à une destination demeurent silencieux pendant cette transmission en cours. Cet ordonnancement est à l'origine de la couche MAC et est souvent réalisé selon une approche centralisée ou plus rarement distribuée initialement.

A Évitement des interférences selon un point de vue physique

Le modèle physique est un modèle bien établi de la gestion des interférences dans les réseaux sans fil multi-sauts. Il repose sur l'idée que les caractéristiques physiques du canal sans fil peuvent être exploitées pour atténuer les effets des interférences. Cela peut être réalisé par une variété de techniques, telles que le saut de fréquence, le contrôle de puissance, la séparation spatiale et la modulation adaptative, qui sont conçues pour minimiser la superposition entre les signaux transmis par différents noeuds du réseau.

Ces techniques peuvent être utilisées seules ou en combinaison, selon les besoins et les objectifs spécifiques du réseau. Dans cette section, nous passons en revue les principaux mécanismes de cette catégorie utilisés pour l'évitement des interférences dans les réseaux sans fil multi-sauts.

Le saut de fréquence (*frequency hopping*) : Le saut de fréquence consiste à changer dynamiquement la fréquence à laquelle les noeuds du réseau communiquent afin d'éviter les interférences [34] [35] [36]. Cette technique peut être efficace pour réduire les interférences car elle permet aux noeuds de communiquer sur une fréquence qui n'est pas utilisée par d'autres noeuds à ce moment-là [37]. L'une des techniques les plus connues est le Hop-Reservation Multiple Access (HRMA) [6]. HRMA est un protocole MAC efficace basé sur

les radios FHSS (*Frequency-Hopping Spread Spectrum*) dans la bande ISM (Industriel, Scientifique et Médical) [38]. Le HRMA ne nécessite pas de détection de la porteuse, il utilise une séquence de saut de fréquence commune et permet à une paire de nœuds de réserver un saut de fréquence (par l'utilisation d'un échange RTS-CTS) pour une communication fiable sans interférence avec d'autres nœuds. L'une des fréquences disponibles (N_f fréquences) dans le réseau est réservée spécifiquement à la synchronisation.

Les $(N_f - 1)$ fréquences restantes sont divisées $((N_f - 1)/2)$ en paires de fréquences. Pour chaque paire, la première fréquence est utilisée pour la réservation du saut (HR), le RTS (*Request To Send*), le CTS (*Clear To Send*) et les paquets de données, tandis que la deuxième fréquence est utilisée pour les paquets ACK (*ACKnowledgement*). Le HRMA peut être traité comme un schéma TDMA (*Time-Division Multiple Access*), dans lequel chaque slot de temps est affecté à une fréquence spécifique et est subdivisé en quatre périodes : synchronisation, HR, RTS et CTS. La figure 1.7 montre un exemple de trame HRMA. Pendant la période de synchronisation de chaque intervalle de temps, tous les nœuds inactifs se synchronisent entre eux. Pendant les trois autres périodes, ils sautent ensemble sur les sauts de fréquence communs qui ont été attribués aux créneaux horaires [38].

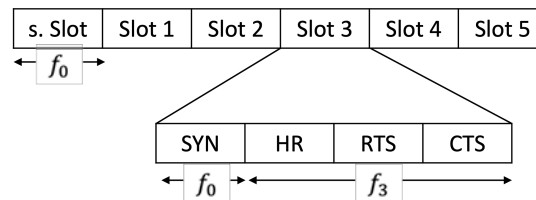


FIGURE 1.7 – Structure d'un slot de temps et de la trame HRMA [6].

Un nœud émetteur envoie d'abord un paquet RTS au récepteur dans la période RTS du slot de temps. Le récepteur envoie un paquet CTS à l'émetteur pendant la période CTS de ce même slot de temps. L'émetteur envoie alors les données sur la même fréquence (à ce moment-là, les autres nœuds inactifs se synchronisent), puis saute à la fréquence d'accusé de réception sur laquelle le récepteur envoie un ACK. Si les données sont volumineuses et nécessitent plusieurs intervalles de temps, l'expéditeur l'indique dans l'en-tête du paquet de données. Le récepteur envoie ensuite un paquet HR dans la période HR du prochain intervalle de temps, afin de prolonger la réservation de la fréquence actuelle pour l'émetteur et le récepteur. Cela indique aux autres nœuds de sauter cette fréquence dans la séquence de saut [38].

Les auteurs affirment que le HRMA permet d'obtenir un débit nettement plus élevé que le Slotted ALOHA dans les canaux FHSS. Il utilise des radios semi-duplex à saut de

fréquence lent qui sont disponibles dans la bande ISM. Il nécessite toutefois une synchronisation entre les nœuds, ce qui n'est pas approprié pour les réseaux multi-sauts à grande échelle [38].

Le contrôle de la puissance : Le contrôle de puissance consiste à ajuster la puissance de transmission des nœuds du réseau afin de réduire les interférences avec les nœuds assez éloignés [39] [40]. Cette technique limitera également la portée du nœud émetteur et doit donc être correctement ajustée pour ne pas compromettre toutes les transmissions possibles.

À titre d'exemple, les auteurs de [41] ont proposé une technique décentralisée de contrôle de la puissance d'émission pour les utilisateurs secondaires dans un contexte de réseaux cognitifs¹, basée sur la théorie des jeux, afin de minimiser les interférences avec les utilisateurs primaires du système sur la base de certains seuils d'interférence préconçus appelés température d'interférence². Les auteurs ont souligné la nécessité pour les utilisateurs secondaires de réguler leur puissance d'émission et leurs débits de données afin d'améliorer la qualité de la transmission des données et la densité d'utilisateurs dans le réseau d'utilisateurs primaires [42].

La séparation spatiale : La séparation spatiale est une technique de gestion des interférences dans les réseaux sans fil multi-sauts qui consiste à séparer physiquement les nœuds du réseau afin de réduire les interférences entre eux [43]. Cette technique est très utilisée dans le domaine des réseaux cellulaires. Pour minimiser l'impact des interférences dans les réseaux cellulaires, les auteurs de [44] proposent un algorithme distribué pour allouer les ressources appropriées. Les auteurs ont d'abord modélisé les distributions spatiales des équipements des utilisateurs et des stations de base dans les réseaux cellulaires hétérogènes en utilisant les ressources disponibles et les caractéristiques des équipements, et ont finalement proposé un algorithme d'allocation des ressources dans lequel la qualité de service des communications est garantie [43]. Sur la base du même processus, et après la distribution spatiale, les auteurs de [45], utilisent un contrôle de puissance conjoint avec un schéma de sélection de mode pour minimiser les interférences, dans lequel le contrôle

1. Un nouveau paradigme est apparu récemment dans la conception de systèmes de réseaux sans fil **sans licence** (ou **secondaires**), fondé sur l'idée d'un partage dynamique du spectre dans le spectre sous licence (ou primaire) [42].

2. **La température d'interférence** est une notion utilisée dans les systèmes de communication sans fil pour quantifier le niveau d'interférence qui peut être toléré par un récepteur sans entraîner de dégradation significative de la qualité du signal reçu. La température d'interférence est définie comme le niveau maximum d'interférence externe qui peut être présent dans la bande de fréquence concernée tout en maintenant un rapport signal/interférence(SNR) acceptable au niveau du récepteur [41].

de puissance est utilisé pour ajuster dynamiquement la zone limitée par les interférences et la sélection de mode est utilisée pour maximiser l'efficacité spectrale.

La modulation adaptative : La modulation adaptative est une technique de gestion des interférences dans les réseaux sans fil multi-sauts qui consiste à ajuster le schéma de modulation utilisé par les nœuds du réseau en fonction des conditions d'interférence actuelles [46] de sorte à réduire le taux d'erreur et ajouter une certaine robustesse. Cette adaptation se fait selon une estimation physique du canal (affaiblissement du signal, ombrage, évanouissement des ondes, etc.) ou selon la qualité de la transmission [47] (rapport du signal sur bruit (SNR), taux d'erreur binaire (BER), etc.).

La modulation adaptative pourrait être implémentée comme suit : dans un réseau cellulaire, lorsqu'un utilisateur est proche de la station de base (BS), un ordre de modulation plus élevé et un taux de codage plus élevé lui sont généralement attribués, mais l'ordre de modulation et le taux de codage diminuent lorsqu'un utilisateur est éloigné de la BS [48]. Le signal transmis dépend de la variance des stations de base qui interfèrent, de l'évanouissement, et du bruit qui affectent la qualité du signal reçu afin d'obtenir la meilleure valeur pour la capacité du système, la fiabilité de la couverture et le débit de données, de sorte que le signal transmis est modifié par un processus appelé adaptation de la liaison [49] [50] [48].

B Évitement des interférences par une approche protocolaire

Contrairement à l'approche physique, qui est basée sur l'exploitation des caractéristiques physiques du canal sans fil, les solutions protocolaires se concentrent sur la conception et la mise en œuvre de protocoles de communication appropriés qui peuvent atténuer les effets des interférences. **La technique d'ordonnement** est la technique la plus connue de ce modèle. En programmant soigneusement les transmissions des nœuds, il est possible de réduire la probabilité d'interférence entre les nœuds, améliorant ainsi les performances globales du réseau.

Les techniques d'ordonnement sont connues sous le nom de protocoles MAC (contrôle d'accès au support, *Medium Access Control* en anglais).

Cette technique est généralement divisée en deux catégories : l'ordonnement centralisé (protocoles MAC centralisés) bien que peu réaliste mais certaines solutions permettent d'approcher un ordonnancement optimal dans les réseaux ad-hoc, et l'ordonnement distribué (protocoles MAC distribués) qui est plus utilisé en pratique et pour lequel la connaissance d'informations locales est suffisante.

B.1 L'ordonnancement centralisé

L'ordonnancement centralisé est fondé sur une connaissance globale du réseau et dans laquelle une entité centrale, telle qu'une station de base ou un nœud coordinateur, est responsable de l'ordonnancement des transmissions des nœuds du réseau [51] en temps ou en fréquence.

Plusieurs protocoles MAC ont été proposés dans la littérature, nous mentionnons :

- L'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA, *Time Division Multiple Access*) [16] : La bande de fréquence est la même pour tous les nœuds du réseau et le temps est divisé en créneaux. Chaque nœud envoie ses données dans un slot de temps et il n'y aura pas de transmissions simultanées dans ce cas.
- Le *Maximum Weighted Scheduling* (MWS) [52], où un poids est attribué à chaque nœud en fonction des conditions du canal et des exigences de transmission. Le poids d'un nœud est utilisé pour déterminer l'ordre dans lequel il est autorisé à transmettre des données, les nœuds ayant un poids plus élevé étant prioritaires.
- L'accès multiple par répartition en fréquence (FDMA, *Frequency Division Multiple Access*) [53] : Où les utilisateurs multiples accèdent simultanément au canal en utilisant différentes sous bandes de fréquence.
- L'accès multiple par répartition en code (CDMA, *Code Division Multiple Access*) [53] : Où l'accès à des canaux multiples est réalisé sur la base de séquences de signatures prédéfinies appelées codes. Ces codes sont utilisés par les sources pour moduler le signal transmis et ainsi minimiser les interférences avec les nœuds concurrents et permettre plus de transmissions simultanées.

Dans ce travail, nous limitons notre champ d'étude sur les solutions basées sur le TDMA qui est utilisé dans les réseaux sans fil pour atténuer les interférences et améliorer la capacité du réseau [16]. Le principe de base étant de diviser le temps en créneaux temporels (slots de temps), puis d'attribuer à chaque nœud du réseau un slot de temps spécifique pour la transmission. En veillant à ce que deux nœuds ne transmettent pas en même temps, le TDMA garantit un accès au canal sans collision et élimine, ainsi, efficacement les interférences causées par les transmissions simultanées. L'attribution des slots de temps aux nœuds du réseau peut être fixe de façon prédéfinie ou dynamique à la demande en fonction des conditions du réseau. Cette approche dynamique est utile dans les situations où le trafic du réseau est variable et imprévisible mais s'obtient généralement au prix d'un temps de calcul exponentiel et une complexité non négligeable [54].

Dans l'état de l'art, de nombreuses solutions et protocoles MAC basés sur le TDMA ont

été proposés pour différents domaines, nous mentionnons ci-dessous quelques-uns d'entre eux :

- **Pour les réseaux de capteurs sans fil (WSNs) :** Un protocole MAC économe en énergie a été proposé sous le nom de LEACH ”*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*” [55]. Avec LEACH, une tête de cluster est élue en fonction de l'énergie des nœuds du cluster. La tête du cluster divise le canal en slots de temps égalisés et attribue uniformément ces slots de temps aux nœuds membres. La tête de cluster collecte les informations des capteurs et les transmet à la station de base, chaque capteur envoie ses données à la tête de cluster dans son propre slot de temps. LEACH est efficace en termes d'énergie, mais il n'est pas adapté aux charges de trafic variables, car il planifie uniformément les slots de temps entre les nœuds du cluster. Un protocole amélioré a été proposé dans [56] appelé BMA-RR (*Bit-Map-Assisted Round-Robin*) et qui réduit la consommation d'énergie lorsque la charge de trafic est faible, réduit la latence et augmente le débit lorsque la charge de trafic est élevée. De nombreux protocoles MAC basés sur TDMA ont été proposés dans le domaine WSN, nous référons le lecteur à [57, 58, 59, 60, 61].
- **Pour les réseaux ad hoc véhiculaires (VANETs) :** STDMA (*Self Organized Time Division Multiple Access*) est le protocole MAC basé sur TDMA le plus connu dans ce domaine [62]. STDMA est un protocole d'accès qui affecte dynamiquement les slots de temps aux nœuds du système sans passer par un nœud central susceptible de gérer la synchronisation entre les nœuds comme c'est le cas du TDMA traditionnel. Cette dynamique a permis de résoudre le problème de l'extensibilité dans les réseaux VANET. Comparé aux protocoles MAC distribués tels que CSMA, STDMA a montré des résultats prometteurs en termes d'évolutivité et de fiabilité [63]. Différents protocoles sont basés sur le STDMA dans l'état de l'art [64, 62, 65].
- **Pour les réseaux mobiles ad hoc (MANETs) :** Dans les réseaux mobiles, la topologie est dynamique, par conséquent, un protocole MAC dynamique est requis. Ainsi, les auteurs de [66] et [67] proposent un protocole MAC dynamique basé sur le TDMA appelé USAP. Selon ce protocole, on attribue ou libère des slots de temps lorsque des nœuds rejoignent ou quittent le réseau. Cette technique améliore les performances du système, mais le protocole USAP souffre de délais potentiels dans le processus d'affectation des nouveaux nœuds, car il exige la validation des nœuds voisins du nouveau nœud lors de l'affectation des slots de temps [68].

L'aspect centralisé rend le TDMA relativement facile à mettre en œuvre et à gérer du moment où on garantit la synchronisation de tous les nœuds du réseau avec la station

de base. Cependant, cela signifie également que le réseau est fortement dépendant de cette station de base et que si celle-ci tombe en panne, c'est tout le réseau qui se trouve défectueux.

De plus, la centralisation du protocole s'adapte difficilement à l'augmentation du nombre de noeuds du réseau et rend, ainsi, cette technique peu efficace dans les réseaux larges et dynamiques.

En outre, lorsque le trafic du réseau est très dynamique et imprévisible, l'attribution des slots de temps aux noeuds du réseau devient hasardeuse et peut ne pas s'adapter aux conditions changeantes du réseau. Cela peut entraîner un gaspillage de bande passante et de ressources si les slots de temps sont affectés à des noeuds qui ne sont pas actifs ou qui ont un faible trafic à émettre.

B.2 L'ordonnement distribué

L'aspect dynamique, mobile et instable des réseaux sans fil multi-sauts fait que cet ordonnancement centralisé soit rarement utilisé en pratique. La communauté scientifique s'est donc orientée vers un ordonnancement distribué qui s'établit de manière collaborative entre les membres du réseau.

La littérature sur les protocoles MAC distribués est vaste, avec de nombreux protocoles proposés pour répondre à différents scénarios de réseaux. Parmi les protocoles MAC distribués les plus utilisés et communément connus, nous pouvons citer :

- ALOHA[69] : Ce protocole a été conçu à l'origine pour les réseaux satellitaires, mais il peut également être utilisé dans les réseaux sans fil en général [70]. ALOHA permet aux noeuds de transmettre des données lorsqu'ils en disposent, sans attendre un canal vide. Lorsqu'un noeud veut émettre, il envoie ses données au récepteur sans vérifier si le canal est libre. Si deux noeuds essaient de transmettre en même temps, une collision se produit et les données sont perdues. Après une collision, les noeuds attendent un temps aléatoire avant de réessayer, afin d'éviter une nouvelle collision avec le même noeud. ALOHA est un protocole simple, ce qui le rend facile à implémenter et à déployer dans divers scénarios de mise en réseau. Cependant, il est peu efficace, car les collisions peuvent être fréquentes, ce qui entraîne un gaspillage de la bande passante du canal.
- Un autre protocole possible est le protocole *Token Ring* (anneau à jeton) [71]. L'anneau à jeton a été conçu à l'origine pour les réseaux câblés mais peut également être adapté aux réseaux sans fil [72]. Avec ce protocole, les appareils sont connectés

dans un anneau logique et une trame spéciale, appelée jeton, est transmise autour de l'anneau pour contrôler l'accès au canal. Lorsqu'un nœud souhaite transmettre des données, il doit attendre l'arrivée du jeton, qui indique qu'il a la permission de transmettre. Le protocole anneau à jeton offre un accès équitable au canal, car chaque appareil a la garantie de pouvoir transmettre lorsqu'il possède le jeton. Cependant, le protocole anneau à jeton est moins efficace que les autres protocoles MAC, car le jeton doit circuler en permanence sur l'anneau, même si aucun nœud n'a de données à transmettre.

- CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) [73] [74] [75], Ce protocole est le plus utilisé dans les réseaux sans fil. Il utilise des techniques d'évitement des collisions, telles que l'attente d'une durée aléatoire avant la transmission, afin de réduire la probabilité de collisions.

Dans notre travail, nous nous concentrons sur le CSMA/CA, qui est un protocole largement utilisé dans les réseaux sans fil et qui a montré son efficacité dans la réduction des collisions et l'amélioration du débit du réseau [76] [77].

Le protocole CSMA/CA est une technique MAC utilisée pour améliorer l'efficacité des réseaux sans fil en empêchant les interférences et en assurant un accès ordonné au support partagé [75]. Le protocole repose sur deux mécanismes fondamentaux : la détection de la porteuse (carrier sensing) et l'évitement des interférences (collision avoidance) [78].

Le *Carrier Sensing* (CS) désigne le processus par lequel les nœuds du réseau écoutent le canal avant de transmettre. Ce processus permet de s'assurer que le canal n'est pas en cours d'utilisation avant qu'un nœud ne commence à transmettre ses propres données. Afin de déterminer si le canal est utilisé ou non, le nœud attend une période de temps appelée InterFrame Space (IFS) pour permettre aux transmissions en cours de se terminer [75]. Si, à l'issue de cette période d'écoute, le canal est libre, le nœud commence la transmission de ses données. Sinon, il retarde sa transmission. Ce processus garantit qu'un seul nœud transmet à la fois, ce qui réduit la probabilité d'interférences et améliore l'efficacité globale du réseau.

Le *Collision Avoidance* (CA) est le mécanisme utilisé pour empêcher plusieurs nœuds de transmettre en même temps, ce qui provoquerait une interférence et entraînerait la perte de données. Ce mécanisme comprend un algorithme de *backoff* aléatoire, ainsi que des trames de contrôle *Request to Send* (RTS) et *Clear to Send* (CTS) [75]. L'algorithme de *backoff* aléatoire est utilisé pour introduire un délai entre les tentatives, et ce délai est choisi aléatoirement dans un intervalle prédéfini. L'algorithme de *backoff* aléatoire permet de garantir que tous les nœuds ont une chance équitable d'accéder au canal, ce qui réduit

la probabilité d'interférences et augmente l'efficacité globale du réseau.

Les trames de contrôle RTS et CTS sont utilisées pour réduire le temps qu'un nœud doit passer à écouter les transmissions en cours avant de pouvoir commencer à transmettre ses propres données [79]. La trame RTS est utilisée par un émetteur pour demander la permission de commencer à transmettre, et la trame CTS est utilisée par le récepteur pour accorder cette permission. Cela réduit le temps qu'un nœud doit passer à écouter les transmissions en cours, ce qui augmente l'efficacité globale du réseau [79]. Le mécanisme RTS/CTS permet également de réduire la probabilité du problème des nœuds cachés dans le réseau, qui se produit lorsqu'un nœud veut transmettre des données, mais qu'il ne sait pas qu'un autre nœud essaie également de transmettre des données au même moment [80].

La *Distributed Coordination Function* (DCF, la fonction de coordination distribuée) est une implémentation spécifique du CSMA/CA utilisée dans les réseaux sans fil IEEE 802.11 [81]. La fonction de coordination distribuée utilise un algorithme binaire exponentiel de rappel, ce qui signifie que le délai entre les tentatives de rappel double à chaque interférence suivante jusqu'à ce qu'un délai maximal soit atteint. L'objectif principal du DCF est d'assurer un partage équitable et efficace du support en utilisant le mécanisme RTS/CTS pour réduire le temps qu'un nœud doit passer à écouter les transmissions en cours, et en utilisant l'algorithme *backoff* aléatoire pour introduire un délai entre les tentatives.

En plus de ce qui précède, pour augmenter encore la fiabilité et l'équité du protocole, le DCF utilise également un mécanisme supplémentaire appelé la trame "Acknowledge (ACK)". Cette trame est envoyée par le récepteur à l'expéditeur pour confirmer que le paquet a été reçu avec succès. L'expéditeur renvoie le paquet si la trame ACK n'est pas reçue dans un certain laps de temps. Ce mécanisme garantit que les paquets sont bien délivrés et réduit la probabilité de perte de paquets.

En raison de ses performances élevées et de son efficacité énergétique, CSMA/CA est largement utilisé dans les réseaux sans fil [77]. Différents protocoles et normes MAC basés sur le CSMA/CA sont proposés dans la littérature, nous citons :

- **Protocole *p-persistent CSMA/CA*** : Le protocole *p-persistent CSMA/CA* a été proposé pour la première fois dans [82]. Comme il s'agit d'un protocole d'accès multiple sample et efficace, il a été largement utilisé dans divers réseaux tels que les réseaux mobiles ad hoc (MANET) [83] les réseaux véhiculaires [84] et les réseaux de contrôle d'usine [85]. Le protocole *p-persistent CSMA/CA* est un protocole simple et efficace pour les petits réseaux WLAN, mais il n'est pas adapté aux réseaux denses, car il a un faible débit et souffre de retards. En effet, lorsque plusieurs

nœuds tentent de transmettre des données simultanément, ils peuvent subir un taux de collision élevé, ce qui réduit les performances globales du réseau [85].

- **IEEE 802.11 Distributed Coordination Function (IEEE 802.11 DCF)** [86] : La norme IEEE 802.11 DCF est la plus utilisée récemment dans les réseaux locaux sans fil, principalement en raison de sa simplicité et de sa robustesse [74]. Cette norme utilise le DCF que nous avons décrit précédemment. De nombreuses améliorations ont été proposées dans l'état de l'art. Les auteurs de [87] et [88] ont modifié le protocole MAC de l'IEEE802.11 pour qu'il fonctionne dans des réseaux hétérogènes composés de nœuds de forte puissance de transmission et de nœuds de faible puissance de transmission. Ils étendent le mécanisme RTS/CTS en ajoutant un message supplémentaire qui est une diffusion du message CTS à d'autres nœuds que le transmetteur et le récepteur. Il existe également différents travaux qui améliorent le débit et le délai du protocole IEEE 802.11 DCF en séparant les messages de contrôle et de transmission des données par l'utilisation de canaux multiples. En plus d'améliorer le débit et le délai, de nombreux travaux tels que [89, 90, 91] réduisent la consommation d'énergie des nœuds mobiles.
- **IEEE 802.15.4 MAC** [92] : Cette normalisation a été proposée en raison de la croissance rapide des réseaux de capteurs sans fil (WSNs) et des réseaux personnels sans fil (WPANs). De nombreuses améliorations ont été proposées pour le protocole IEEE 802.15.4 MAC. Par exemple, le travail dans [93] a été proposé pour réduire la consommation d'énergie en utilisant le protocole IEEE 802.15.4 MAC dans les WSN. En outre, comme le protocole MAC de l'IEEE 802.15.4 MAC souffre d'un faible débit [94], de nombreux travaux ont été proposés pour améliorer le débit de ce protocole [95] [96] [97].

Le protocole CSMA/CA est utilisé dans une grande variété d'environnements, notamment les réseaux locaux sans fil (WLAN) [98], les réseaux personnels sans fil (WPAN) [99] et les réseaux de capteurs sans fil (WSN) [100] [101], ce qui en fait un protocole polyvalent et largement utilisé dans les réseaux sans fil. En outre, le CSMA/CA peut réduire le nombre de pertes de données dues aux interférences. Cependant, il est important de noter que le CSMA/CA présente certaines limites. Il n'est pas bien adapté aux réseaux ayant des exigences de débit élevées ou lorsque la transmission de données en temps réel est nécessaire [19]. En outre, il peut ne pas être adapté aux réseaux où un nombre important de nœuds sont éloignés les uns des autres [102]. Par conséquent, il est important d'évaluer les exigences et les limites du CSMA/CA avant de décider de le mettre en œuvre dans un réseau sans fil spécifique. Cependant, l'implémentation DCF du CSMA/CA, qui est normalisée par l'IEEE 802.11, améliore le protocole en incorporant

l'algorithme de *backoff* binaire exponentiel, les trames RTS/CTS, ACK et le mécanisme de fenêtre de contestation (*Contention Window*), ce qui permet de réduire la probabilité d'interférences et d'augmenter la fiabilité, la stabilité et l'équité du réseau [81].

En présentant le TDMA qui représente les protocoles MAC centralisés et le CSMA/CA qui représente les protocoles distribués, et du fait que nous basons nos travaux sur ces deux protocoles MAC, il est intéressant de comparer les deux protocoles MAC TDMA et CSMA/CA. Le tableau 1.1 résume les principaux points de différence entre le TDMA et le CSMA/CA.

TABLEAU 1.1 – Les points de différence entre les protocoles TDMA et CSMA/CA.

la métrique de comparaison	TDMA	CSMA/CA
Utilisation de la bande passante	Maximale	Faible
L'équité	Bonne	Bonne
Délai de transmission	Élevés	Faibles
Consommation d'énergie	Faible	Élevée
Adaptabilité au trafic	Non	Oui
Scalabilité	Non	Oui
Frais de communication	Faible	Élevés
Synchronisation	Exigée	Pas toujours nécessaire

1.3.2 Traitement des interférences :

Les techniques exposées dans la section précédente sont fondées sur le principe d'évitement d'interférences et dérivent leurs efficacités du fait qu'elles empêchent les transmissions simultanées et garantissent ainsi des transmissions fiables sans perte.

En parallèle, pour mieux exploiter les ressources du réseau, d'autres techniques de traitement des interférences ont été proposées afin de permettre et d'augmenter le nombre de transmissions simultanées de paquets différents tout en réduisant le risque de collisions. Nous présentons ici les trois techniques les plus courantes dans l'état de l'art et nous évoquons leur intégration dans les réseaux sans-fil multi-sauts.

A Neutralisation des interférences

La neutralisation des interférences, connue aussi sous le nom anglais "*orthogonalize and forward*" repose sur le principe de l'interférence destructive, qui stipule que deux ondes de même amplitude et de même fréquence qui sont déphasées se neutralisent mutuellement. Cette technique vise, ainsi, à encoder les données transmises de manière à ce que les signaux s'annulent eux-mêmes dans l'air au niveau des noeuds non-destinataires

des paquets correspondants [103]. En appliquant un signal égal en amplitude et en fréquence mais déphasé par rapport au signal d'interférence, la technique de neutralisation des interférences annule efficacement le signal d'interférence et permet à la destination de ne recevoir que le signal qui lui est destiné et de retrouver l'information associée grâce aux techniques classiques de décodage [104, 7, 105, 21, 106][103] [107].

Pour illustrer de manière simple la neutralisation d'interférence, nous nous appuyons sur l'exemple présenté dans [7]. Un réseau général à deux sauts est présenté dans la figure 1.8, qui se compose de trois couches : N sources (S), N destinations (D) et L nœuds de relais (R).

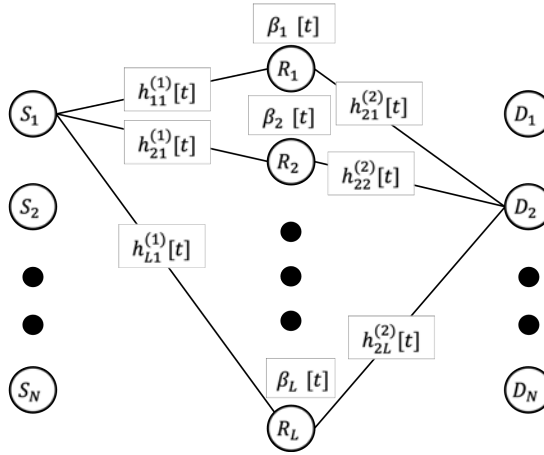


FIGURE 1.8 – Neutralisation des interférences basée sur l'amplification pour les réseaux à deux sauts [7].

Supposons que le relais i amplifie le signal reçu $SR_i^{(1)}[t]$ avec un facteur d'amplification $\beta_i[t]$ et le transmet aux destinataires, comme le montre la figure 1.8. Le signal amplifié résultant peut être présenté comme suit :

$$SAMP_i^{(2)}[t] = \beta_i[t]SR_i^{(1)}[t]. \quad (1.2)$$

Alors, le signal de la source S_1 reçu au niveau de la destination D_2 est neutralisée si nous choisissons les coefficients $\beta_i[t]$ de manière à ce que l'équation suivante soit satisfaite :

$$\sum_{i=1}^L h_{2i}^{(2)}[t]\beta_i[t]h_{i1}^{(1)}[t] = 0 \quad (1.3)$$

Nous pouvons remarquer qu'il s'agit d'une équation linéaire par rapport aux coefficients $\beta_i[t]$. Il est clair qu'il ne suffit pas de neutraliser les interférences entre la source S_1 et la destination S_2 uniquement. Nous voulons plutôt neutraliser complètement toutes

les interférences de chaque source vers chaque destination. Pour ce faire, toutes les combinaisons possibles $N(N - 1)$ contraintes linéaires de l'équation ci-dessus sont requises [7].

Comme le montrent [21], [108] et [109], la technique de neutralisation améliore le débit dans les grands réseaux sans fil multi-sauts. Cependant, il y a de nombreux défis à prendre en compte, notamment le choix des nœuds relais, l'estimation de l'état des canaux et la planification des nœuds sources qui nécessite une synchronisation, ces défis rendent la technique de neutralisation très difficile à appliquer dans les systèmes distribués pratiques [110].

B Alignement des interférences

L'alignement des interférences est une technique qui vise à aligner les signaux d'interférence de manière à pouvoir les séparer du signal souhaité [7]. Elle repose sur l'idée de créer un sous-espace orthogonal au sous-espace du signal souhaité, dans lequel les signaux d'interférence sont confinés. En alignant les signaux d'interférence dans ce sous-espace, il est possible de les séparer du signal souhaité [8].

Nous utilisons l'exemple présenté dans [8] pour présenter le principe de base de l'alignement des interférences. Comme le montre la figure 1.9, dans cet exemple, nous avons trois nœuds sources et trois nœuds de destination, chaque nœud est équipé avec deux antennes. Chaque émetteur (S_i) envoie un flux de données à son récepteur correspondant (D_i).

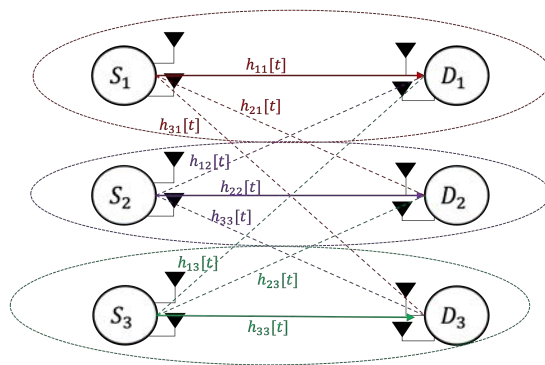


FIGURE 1.9 – Un système d'alignement des interférences avec trois sources et trois destinations. Chaque source transmet un flux de données à une destination et chaque nœud est équipé de deux antennes [8].

Prenons l'exemple de la destination D_1 , le signal $y^{(1)}$ reçu par ses deux antennes peut être exprimé comme suit :

$$y^{(1)} = h_{11}[t]V_1X_1 + h_{12}[t]V_2X_2 + h_{13}[t]V_3X_3 + BG_1 \quad (1.4)$$

Dans lequel h_{ij} est la matrice du canal (l'état du lien) entre le $i^{\text{ème}}$ émetteur (S_i) et le $j^{\text{ème}}$ récepteur (D_j), V_i est le vecteur de précodage unitaire du $i^{\text{ème}}$ émetteur (S_i), X_i est le flux de données transmis par le $i^{\text{ème}}$ source (S_i) et BG_i est le vecteur de bruit gaussien (AWGN) au niveau du $i^{\text{ème}}$ destination (D_i).

Lorsque la technique d'alignement des interférences est appliquée, on suppose que $h_{11}[t]V_1 = [ab]T$, $h_{12}[t]V_2 = \beta[cd]T$ et $h_{13}[t]V_3 = \gamma[cd]T$, en raison de l'alignement des interférences au niveau du premier récepteur D_1 . Lorsque le bruit gaussien BG_1 est ignoré, le signal reçu aux deux antennes du premier récepteur D_1 peut être exprimé comme suit :

$$y_1^{(1)}[t] = aX_1 + c(\beta X_2 + \gamma X_3) \quad (1.5)$$

$$y_2^{(1)}[t] = bX_1 + d(\beta X_2 + \gamma X_3) \quad (1.6)$$

Dans le système linéaire ci-dessus, il y a deux équations linéaires 1.5 et 1.6 avec trois variables, X_1 , X_2 , et X_3 . Lorsque l'alignement des interférences n'est pas appliqué, le problème ne peut être résolu, car il y a plus de variables que d'équations. En revanche, lorsque l'alignement des interférences est effectué, les variables indésirables X_2 et X_3 sont alignées, et nous pouvons exprimer $X_4 = \beta X_2 + \gamma X_3$. Par conséquent, le système linéaire de 1.5 et 1.6 peut être réécrit comme suit :

$$y_1^{(1)}[t] = aX_1 + cX_4 \quad (1.7)$$

$$y_2^{(1)}[t] = bX_1 + dX_4 \quad (1.8)$$

Finalement, il y a maintenant deux variables, X_1 et X_4 , dans ces deux équations, de sorte que le flux transmis X_1 peut être récupéré par le récepteur D_1 .

Récemment, la technique d'alignement des interférences est largement utilisée dans l'état de l'art pour permettre plus de transmissions simultanées et améliorer les performances du système [7] [8] [111]. La plupart des approches proposées sont analysées théoriquement ou implémentées par des simulations sur ordinateur [112]. Ceci est dû aux différents défis présents dans ce domaine, à titre d'exemple nous citons : Dans l'exemple présenté ci-dessus, nous avons ignoré le bruit gaussien pour obtenir le signal désiré X_1 . Cependant, dans les systèmes pratiques, le bruit gaussien ne peut pas être ignoré [8]. De plus, cette technique souffre principalement de la connaissance préalable d'informa-

tions précises sur l'état du canal (CSI) afin d'aligner les signaux d'interférence. Cela peut être difficile à obtenir dans la pratique, en particulier dans les cas où l'état du canal est dynamique et/ou instable. En outre, cette technique peut également être relativement complexe à mettre en œuvre dans la pratique, en particulier dans les cas où de multiples signaux (un grand nombre) d'interférence sont présents.

C Annulation des interférences

L'annulation des interférences (Interference Cancellation - IC) est une technique qui vise à améliorer la qualité d'un signal en supprimant ou en réduisant les effets des interférences provenant d'autres sources [113]. Elle consiste à recevoir, au niveau de la destination, plusieurs signaux en collision, et de pouvoir retirer la contribution du signal interférant afin de décoder seulement le signal utile. L'annulation des interférences diffère de la neutralisation des interférences et de l'alignement dans la mesure où tout le traitement est effectué par la destination. Pour ce faire, on estime les signaux d'interférence au niveau du récepteur et on les soustrait du signal reçu pour maintenir au final uniquement le signal utile qui lui est destiné.

Plusieurs approches sont proposées dans la littérature [10, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122]. L'approche la plus connue et la plus représentative de la technique d'annulation des interférences est l'annulation des interférences successive (SIC, *Successive Interference Cancellation* en anglais).

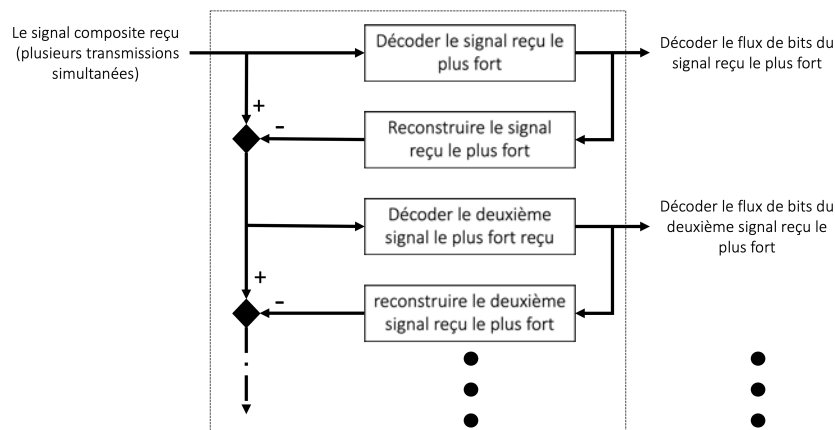


FIGURE 1.10 – Le schéma du processus de la technique SIC [9].

Ainsi, la technique SIC permet de décoder correctement un signal en présence d'autres transmissions. Comme le montre le schéma du processus SIC illustré par la figure 1.10, le récepteur commence à décoder le signal le plus fort du signal reçu combiné, puis le signal

décodé est soustrait et le processus est répété sur le signal résiduel jusqu'à ce que le signal d'intérêt soit décodé ou qu'aucun décodage ne soit plus possible.

Cette technique permet donc de recevoir un signal correctement si d'autres signaux plus forts sont préalablement décodés. Ainsi, pour décoder avec succès un signal, le rapport signal/interférence plus bruit (SINR, *Signal to Interference plus Noise Ratio* en anglais) doit être pris en considération. Dans les lignes qui suivent, nous prenons à l'appui l'exemple présenté dans [123] afin d'illustrer les contraintes du rapport SINR avec la technique SIC.

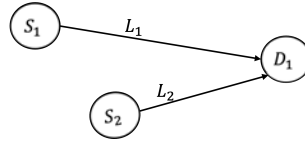


FIGURE 1.11 – Système de deux émetteurs partageant un récepteur commun [10].

Considérons le système présenté par la figure 1.11, où deux liaisons l_1 et l_2 sont adjacentes, leurs débits de données correspondants sont respectivement DR_{l_1} et DR_{l_2} . $PS_{D_1}^{S_1}$ et $PS_{D_1}^{S_2}$ représentent la puissance du signal reçu à la destination D_1 provenant de S_1 et S_2 , respectivement. Supposons également que $PS_{D_1}^{S_2} > PS_{D_1}^{S_1}$. Dans ce cas, D_1 va tenter de décoder le signal reçu de S_2 en premier. Comme nous l'avons présenté précédemment par l'équation 1.1, ce signal peut être décodé si :

$$SINR_{S_2, D_1}^{S_2}(DR_{l_2}) = \frac{PS_{D_1}^{S_2}}{PS_{D_1}^{S_1} + BG} \geq Seuil_{l_2} \quad (1.9)$$

$Seuil_{l_2}$ représente le seuil minimal d'acceptation du signal de la liaison L_2 . Si le signal de S_2 est décodé avec succès par D_1 , D_1 le soustrait du signal combiné ($PS_{D_1}^{S_2} + PS_{D_1}^{S_1} + BG$) et essaie de décoder le signal provenant de S_1 comme suit :

$$SINR_{S_1, D_1}^{S_1}(DR_{l_1}) = \frac{PS_{D_1}^{S_1}}{BG} \geq Seuil_{l_1} \quad (1.10)$$

La technique SIC est largement proposée et utilisée dans différentes technologies et systèmes, notamment la 5G [124] [125] [126], WSNs [127] [128] [129], etc.

Cependant, la technique SIC exige que les nœuds sources soient synchronisés afin d'envoyer leurs signaux au même moment. De plus, le niveau de la puissance de transmission des différents nœuds sources doit être ajusté pour répondre aux exigences de la destination (SINR) afin de pouvoir décoder et extraire les différents signaux. Ces exigences rendent la technique SIC difficile à implémenter dans la pratique.

1.3.3 Exploitation des interférences : Un nouveau paradigme

Devant les faiblesses des stratégies d'évitement d'interférences et les prérequis significatifs des mécanismes de traitement d'interférences, la communauté scientifique s'est tournée récemment vers un nouveau paradigme qui tire profit des progrès réalisés au niveau de la couche physique et permet à plusieurs utilisateurs d'un même domaine d'interférence de transmettre simultanément leurs paquets.

Dans cette section, nous proposerons un tour d'horizon des principales techniques qui autorisent la réception de plusieurs signaux par un même noeud dans l'objectif de favoriser la réutilisation spatiale et d'augmenter le nombre de transmissions simultanées par slot de temps pour ainsi booster le débit résultant. Nous discuterons principalement l'aspect MIMO (Multiple Input Multiple Output) et les solutions s'y référant ainsi que la technique Physical-layer Network Coding (PNC). Nous nous intéressons à l'intégration de ces deux techniques dans les réseaux sans fil multi-sauts et leur utilisation pour optimiser les performances du réseau.

A MIMO (Multiple Input Multiple Output)

MIMO est une technique de communication sans fil qui utilise des antennes multiples au niveau de l'émetteur et du récepteur pour augmenter la capacité et la fiabilité des systèmes de communication sans fil [130]. Deux grandes catégories de techniques permettent d'y parvenir : la MIMO physique et la MIMO virtuelle.

A.1 MIMO physique

Dans cette catégorie, l'émetteur et/ou le récepteur sont dotés de plusieurs antennes radio leur permettant d'exploiter la diversité spatiale du canal sans fil pour améliorer les performances en émettant et en recevant des signaux multiples [131]. Le *beamforming* (la formation de faisceau) en est un exemple courant dans lequel l'émetteur utilise plusieurs antennes pour concentrer le signal dans une direction spécifique, réduisant ainsi les interférences provenant d'autres sources [132].

L'utilisation d'antennes à formation de faisceau dans les réseaux sans fil multi-sauts a fait l'objet d'une attention croissante de la part de la communauté des chercheurs en raison de leurs avantages potentiels et de leurs nombreux avantages par rapport aux antennes omnidirectionnelles traditionnelles [133]. Étant donné qu'une antenne directionnelle est capable d'émettre de l'énergie dans la direction du récepteur prévu, cette transmission

n'interfère pas avec les nœuds voisins résidant dans d'autres directions. En outre, la réception directionnelle et la capacité des antennes à formation de faisceau sophistiquées à supprimer complètement les signaux provenant de directions interférentes peuvent réduire de manière significative les interférences. Cela augmente la réutilisation spatiale du canal sans fil car plusieurs transmissions simultanées peuvent avoir lieu dans le même voisinage, ce qui promet une amélioration significative de la capacité du réseau sans fil [11].

Dans le cas d'une antenne omnidirectionnelle (antennes traditionnelles), une communication unique $S_1 \rightarrow D_1$ (Source 1, Destination 1) exclut toutes les autres communications qui impliquent les voisins de S_1 ou de D_1 , comme le montre la figure 1.12, alors qu'en utilisant des antennes à formation de faisceau, les cinq paires de communications peuvent avoir lieu simultanément, comme le montre la figure 1.13. L'augmentation de la capacité du réseau lors de l'utilisation d'antennes à formation de faisceau est étayée par des analyses théoriques [134], [135], des simulations [136] et des résultats expérimentaux [137] [11].

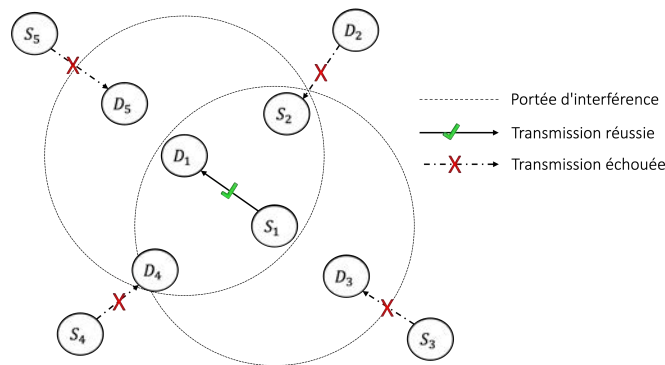


FIGURE 1.12 – Système avec antennes omnidirectionnelles (sans *beamforming*) [11].

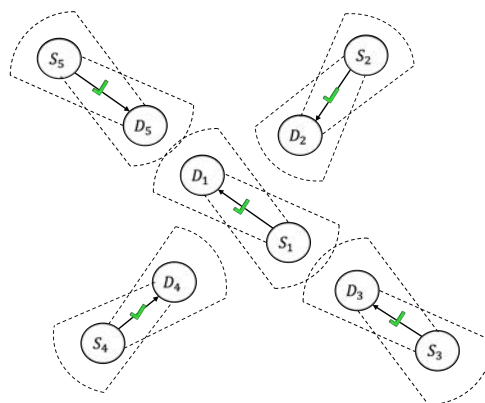


FIGURE 1.13 – Système avec antennes directionnelles (avec *beamforming*) [11].

Afin de bénéficier de la technique de formation de faisceaux, les auteurs de [138]

proposent les premières modifications de l'IEEE 802.11 DCF pour les réseaux ad hoc avec des antennes directionnelles. Ils supposent que les paquets peuvent être transmis de manière directionnelle ou omnidirectionnelle, mais que la réception des paquets ne peut se faire que de manière omnidirectionnelle. Ils proposent le protocole D-MAC dans lequel le RTS est envoyé de manière directionnelle (DRTS) vers le destinataire prévu afin d'éviter un temps d'attente inutile si l'une des autres directions est bloquée. L'hypothèse de base est que chaque nœud connaît les informations de localisation de chacun de ses voisins au moyen du système de positionnement global (GPS) et que chaque nœud transmet en fonction de la direction dérivée des informations de localisation physique. Pour éviter les collisions au niveau du récepteur, un CTS omnidirectionnel est envoyé, suivi d'un échange directionnel de données et de ACK. Les résultats montrent une amélioration des performances due à l'augmentation du nombre de transmissions simultanées dans le réseau. Les résultats obtenus avec ce protocole D-MAC ont motivé de nombreuses recherches dans ce domaine [11].

A.2 MIMO virtuel

L'adoption de la technique MIMO augmente la fiabilité et la capacité de transmission des réseaux sans fil. Cependant, différents facteurs tels que la puissance, le coût et la taille, ainsi que la limitation du poids, font que les nœuds du réseau ne peuvent pas avoir plusieurs antennes, ce qui rend difficile l'utilisation des avantages de la technique MIMO [139]. Pour surmonter ces problèmes, une autre technique dite MIMO virtuelle, connue sous le nom de communication coopérative, qui engendre cette diversité d'une manière meilleure et rentable, a été proposée [140] [141].

Le MIMO virtuel désigne une certaine catégorie de techniques de traitement spatio temporel dans lesquelles les schémas de transmission MIMO classiques sont développés en utilisant une certaine forme de coopération cohérente entre les nœuds radio distribués [142]. L'application la plus connue de la MIMO virtuelle est la diversité coopérative [143]. Comme le montre la figure 1.14, dans ce système, tous les nœuds ont une seule antenne, qu'il s'agisse des nœuds mobiles (M), des nœuds relais (R) ou de la station de base (BS) [12]. En utilisant la diversité coopérative, plusieurs nœuds mobiles sont synchronisés à distance et interagissent de manière cohérente pour prendre en charge les protocoles de communication avancés [12].

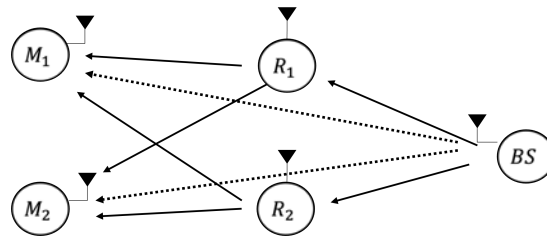


FIGURE 1.14 – Système MIMO virtuel avec diversité coopérative [12].

Le principe de la MIMO virtuelle est qu'à l'émission, à la réception ou des deux côtés de la liaison, le traitement spatio-temporel est utilisé afin d'augmenter la capacité du système. Des gains significatifs en termes d'efficacité spectrale sont prévus de cette manière, de manière similaire aux systèmes MIMO classiques [144] [145] [12].

Le MIMO virtuel est également utilisé dans les systèmes de communication cellulaire pour détecter conjointement plusieurs utilisateurs à la station de base afin de remplacer la détection spatio-temporelle de plusieurs utilisateurs utilisée par le canal d'accès multiple traditionnel dans les systèmes multi-antennes basés sur l'OFDM [139]. Comme le montre la figure 1.15, dans ce système, tous les nœuds ont une seule antenne, qu'il s'agisse de nœuds mobiles (M) ou de nœuds relais (R), à l'exception de la station de base (BS) qui, elle, est dotée de plusieurs antennes.

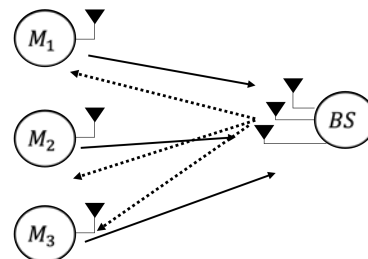


FIGURE 1.15 – Système MIMO virtuel avec la technique de détection conjointe de multi-utilisateurs [12].

Plusieurs travaux ont été réalisés dans ce sens [146], [147], [148], et [149].

En utilisant le MIMO virtuel, les performances du système seront améliorées et sa capacité augmentée. Cependant, la synchronisation nécessaire pour le MIMO virtuel afin de coordonner les transmissions simultanées reste une tâche difficile à réaliser dans les réseaux distribués [150].

B Physical-layer Network Coding (PNC)

Comme nous l'avons présenté précédemment, toutes les méthodes existantes évitent les interférences ou utilisent des antennes multiples avec différentes techniques pour extraire le signal désiré des signaux interférants. De plus, toutes les méthodes présentées utilisent un calibrage différent au niveau du nœud source pour distinguer les signaux interférants au niveau du nœud destinataire (différents codes, différents niveaux de puissance, différents canaux, etc.).

La question que nous posons ici : **Est-il possible d'extraire des données à partir des signaux interférant ayant le même niveau de puissance, le même codage au niveau des nœuds sources, la même modulation et en utilisant une seule antenne et le même canal ??**

Afin de répondre à cette question, une technique appelée Physical-layer Network Coding (PNC) est proposée. Le PNC, introduit pour la première fois en 2006 [151], fait l'objet, durant la dernière décennie, d'une variété de travaux de recherche réguliers et prometteurs. C'est une technique qui, au lieu de les éviter, permet aux collisions d'avoir lieu et déploie des opérations de codage-décodage adéquats pour extraire les données correctes du signal reçu au niveau de la destination [152] [153].

Elle a été appliquée, au début, à un scénario d'utilisation spécifique, connu sous le nom du TWRC (Two Way Relay Channel) et dans lequel, deux nœuds A et B échangent leurs données respectives P_1 et P_2 simultanément via un nœud relai R (en utilisant le même niveau de puissance, le même codage au niveau des nœuds sources, la même modulation, le même canal, et une seule antenne pour transmettre et recevoir), comme illustré sur la figure 1.16.

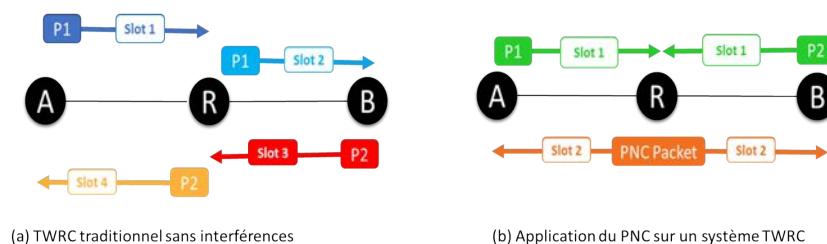


FIGURE 1.16 – Application du PNC dans le système TWRC.

Ainsi, dans le premier slot de temps, les deux nœuds A et B (nœuds feuilles) envoient simultanément leurs données au relai, qui code (en utilisant des techniques PNC, par exemple le XOR (*eXclusive OR*)) les signaux interférants reçus en une seule donnée PNC. Dans le deuxième slot de temps, le nœud relai R transmet les données PNC codées aux

nœuds feuilles A et B . Chaque nœud feuille extrait les données qui lui sont destinées en soustrayant ses propres données des données PNC reçues par la même opération de codage utilisée par le relai. Cette technique produit donc un débit de deux paquets par deux slots de temps, avec une amélioration de 100% par rapport aux systèmes traditionnels.

Concept central de cette thèse, nous consacrons le chapitre suivant à un état de l'art élaboré et approfondi sur le PNC en soulevant les défis auxquels il convient de répondre en vue de son intégration dans de grands réseaux sans-fil multi-sauts. Nous aborderons les fondements théoriques du Network Coding, y compris ses principes mathématiques et ses concepts clés. Nous examinerons ensuite la mise en œuvre du Network Coding dans les réseaux sans fil, en explorant les différents types de schémas de Network Coding, leurs avantages et inconvénients, ainsi que leur impact sur les performances du réseau. De plus, en explorant les applications potentielles du Network Coding dans divers scénarios, nous présenterons également les dernières recherches et évolutions dans le domaine du Network Coding, y compris les nouvelles techniques et leur mise en œuvre pratique, afin de fournir une compréhension complète du sujet.

1.4 Conclusion

Ce chapitre a fourni une vue générale des réseaux sans fil multi-sauts, en soulignant leurs caractéristiques spécifiques et leurs limites. Nous avons également abordé le problème crucial de la gestion des interférences dans ces types de réseaux, en discutant des différentes techniques utilisées pour éviter, traiter et exploiter les interférences.

Ces travaux de recherche étant concentrés sur l'utilisation de la technique PNC dans les réseaux sans fil multi-sauts, nous fournirons, dans le chapitre suivant, une explication détaillée et un état de l'art approfondi de cette technique. En choisissant la PNC, nous souhaitons contribuer à la littérature existante en étudiant son efficacité dans la gestion des interférences dans les réseaux sans fil multi-sauts.

État de l'art sur la technique Network Coding dans les réseaux sans fil multi-sauts

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons en profondeur la technique PNC avec un focus particulier sur les techniques des couches physique et MAC. Le chapitre commence par une description détaillée de ce nouveau paradigme : ses fondements mathématiques, sa fonction de codage et les scénarios d'applications. Nous faisons le tour, ensuite, des différentes contributions proposées dans la littérature et visant la couche physique afin de supporter le PNC. Ce premier état de l'art débouche sur une nouvelle taxonomie des conceptions physiques existantes. En outre, nous passerons en revue les principales solutions MAC exploitant le PNC ce qui nous permettra de nous positionner par rapport aux travaux existants et définir les contours de nos contributions.

2.2 Le Physical-layer Network Coding : Principe de base

La technique *Physical-Layer Network Coding* (PNC) a été proposée pour la première fois en 2006 par [22] et est considérée comme étant un sous-ensemble relativement récent

de la théorie de l'information de réseau né à partir des années 2000 [154].

Il implique la combinaison de plusieurs flux de données au niveau des nœuds intermédiaires du réseau, ce qui permet d'utiliser plus efficacement les ressources disponibles du réseau et d'améliorer les performances de transfert des données.

Ce nouveau paradigme PNC a été conçu pour pallier aux limites des techniques qui évitent ou traitent les scénarios d'interférences comme décrit dans le chapitre précédent. En effet, bien que les techniques de neutralisation et d'alignement d'interférence permettent de s'affranchir des contraintes matérielles et relâcher en partie les hypothèses faites sur un matériel spécifique, celles-ci souffrent d'un *overhead* significatif lors des opérations d'encodage à la source avant chaque transmission. Ces techniques, aussi, nécessitent un échange supplémentaire de données pour prendre connaissance du trafic avoisinant ce qui injecte davantage d'*overhead* et des délais susceptibles de réduire les performances globales du réseau. Les techniques fondées sur l'aspect MIMO, en particulier le *beamforming*, autorisent des transmissions simultanées mais impose, pour cela, des équipements multi-radios excluant les équipements mono-antennes encore largement utilisés ce qui réduit le champ d'usage dans les réseaux sans fil multi-sauts. Le PNC a été proposé, donc, en vue d'exploiter les interférences sans imposer des contraintes particulières sur l'équipement matériel utilisé et sans traitement préalable au niveau de la source.

La technique PNC, initialement conçue dans le cadre d'un scénario Two-Way Relay Channel (TWRC), consiste à autoriser des transmissions mutuelles et simultanées entre une source et une destination en passant par un nœud relai ce qui devrait augmenter le débit résultant.

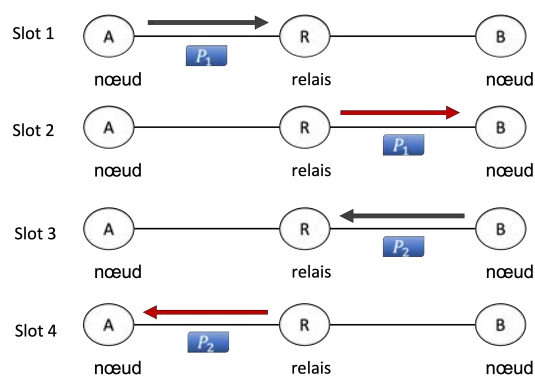


FIGURE 2.1 – Le système sans interférences.

Comme illustré sur la figure 2.1, les nœuds A et B veulent transmettre leurs paquets respectifs P_1 et P_2 . En supposant la non disponibilité d'un lien direct entre eux, leurs transmissions seront acheminées à travers le nœud relai R . Dans un contexte sans inter-

férences et avec la contrainte du semi-duplex, ces transmissions ne peuvent pas coexister et nécessitent ainsi 4 slots de temps : $A \rightarrow R$, $R \rightarrow B$, $B \rightarrow R$, $R \rightarrow A$. Cet échange produit un débit de 2 paquets par 4 slots de temps donc 0.5 paquet/slot. Une première intégration du NC dans ce scénario, donnera un échange sur 3 slots de temps, comme illustré sur la figure 2.2.

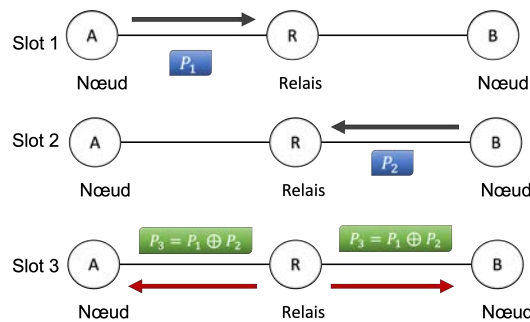


FIGURE 2.2 – Le système PNC simple (*Simple Network Coding* (SNC/NC)).

Dans les deux premiers slots, les noeuds A et B envoient successivement leurs paquets P_1 et P_2 vers le relai R qui effectuera un encodage (par exemple la fonction XOR \oplus) et obtient un paquet $P_3 = P_1 \oplus P_2$. Ce paquet combiné ou codé sera relayé vers les noeuds d'extrémités dans le 3^{ème} slot de temps. Ceux-ci, ayant mémorisé initialement leurs paquets respectifs, devraient pouvoir retrouver le paquet qui leur est destiné en faisant un XOR avec le paquet reçu P_3 comme le montre la figure 2.3. Ce système est appelé système PNC simple (*Simple Network Coding* (SNC/NC)).

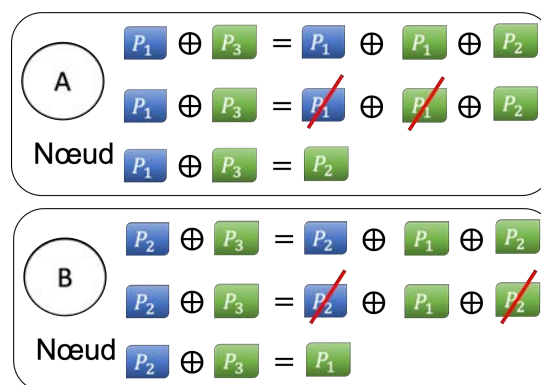


FIGURE 2.3 – Les résultats des paquets décodés par les noeuds feuilles A et B .

Une autre variante de la technique NC, améliore davantage les performances obtenues en proposant un échange sur deux slots de temps seulement comme indiqué sur la figure 2.4 : dans le 1^{er} slot ou *Multiple Access Phase* (MAP), les noeuds d'extrémités A et B

envoient simultanément leurs paquets respectifs P_1 et P_2 au noeud relai R qui, par un traitement de signal adapté (dans la couche physique), combine les deux paquets reçus et diffuse le paquet codé P_3 dans le 2^{ème} slot ou *BroadCast Phase* (BCP). Ainsi, le débit est doublé par comparaison à une transmission sans interférences. Dans cette variante, la technique de codage NC (*XOR*) est appliquée dans la couche physique ce qui explique son nom *Physical-layer Network Coding*

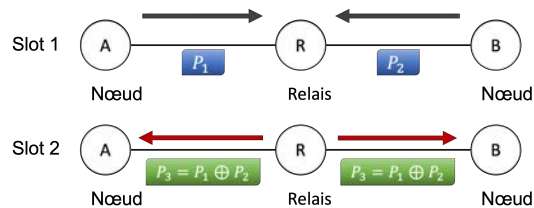


FIGURE 2.4 – Le système Physical-layer Network Coding

2.3 Au delà du XOR PNC : Autres techniques de relayage

Les méthodes de relayage de la technique PNC dépendent de la manière dont le noeud relais traite les signaux superposés reçus dans le premier slot de temps. Outre le schéma de codage par l'opérateur \oplus (ou exclusif) qui est considéré le schéma le plus facile, d'autres variantes plus complexes et offrant plus de scénarios d'utilisation ont été proposées. Nous pouvons citer :

2.3.1 *Decode-And-Forward* (DAF)

En utilisant cette technique, le relais décode les deux signaux transmis (données) par les noeuds feuilles A et B , dans le premier slot de temps. Les signaux récupérés sont ensuite ré-encodés et transmis aux noeuds feuilles A et B dans le deuxième slot de temps.

Il existe de nombreuses façons de décoder chaque signal seul à partir des signaux superposés, comme nous l'avons présenté dans le chapitre précédent. Un exemple pour décoder chaque signal seul est d'utiliser la technique SIC présentée dans la section C, conjointement avec la technique PNC. La technique DAF a été étudiée dans [155] pour les systèmes semi-duplex et dans [156] pour les systèmes full-duplex mais est efficace seulement lorsque le relais est confronté à un faible nombre de messages interférants [157].

2.3.2 *Amplify-And-Forward (AAF)*

Dans la technique AAF [158], une simple interface analogique à analogique est employée où les signaux superposés entrants des nœuds feuilles A et B vers le nœud relais R dans le premier slot de temps sont ajustés en puissance et amplifiés en fonction de la contrainte de puissance d'émission du nœud relais R , puis transmis aux nœuds feuilles A et B , dans le deuxième slot de temps. Comme les nœuds feuilles A et B connaissent leurs propres signaux transmis, ils peuvent les soustraire du signal superposé envoyé par le nœud relais R avant de décoder le signal résultant.

Dans le système AAF, aucun décodage ni recodage du signal n'est effectué au niveau du relais.

L'*Analog network coding* (ANC) [159] est l'approche la plus connue qui utilise la technique AAF. C'est un schéma PNC qui fonctionne au niveau du signal et représente une implémentation plus simple que les schémas basés sur le DAF. Il permet à un nœud du réseau de contribuer à la transmission même s'il ne peut pas décoder le signal. Cette technique est simple et efficace et à faible SNR pour les échanges du premier slot temps de la TWRC. Ainsi, l'ANC peut conduire à de meilleures performances que le XOR PNC [160], mais l'effet du bruit accumulé reste un défi à traiter [157].

Afin d'améliorer la technique ANC, les auteurs de [161] ont envisagé un schéma d'estimation du canal en deux phases dans lequel le relais participe également à l'estimation du canal (et pas seulement les nœuds feuilles). L'idée est que le relais réduise le bruit (débruitage) de l'estimation du canal sur la liaison ascendante (premier slot de temps du scénario TWRC) avant de transmettre le signal, de sorte que l'estimation du canal aux nœuds finaux puisse être plus précise. Ce schéma de codage est référé sous le nom *DEnoise-And-Forward* (DEAF).

2.3.3 *Compute-And-Forward (CAF)*

La technique CAF a été introduite pour la première fois dans [162], et dans [163], les auteurs ont implémenté la technique CAF avec la technique PNC sur un scénario réel. La technique CAF diffère de la technique AAF par le traitement effectué au niveau du relais pour éliminer le bruit et remoduler le signal envoyé par ce nœud dans le deuxième slot de temps du scénario TWRC. En utilisant la technique CAF, les traitements sont directement effectués sur les symboles du signal modulé [110].

Dans cette technique de relayage, utilisant les *lattice codes* [164] comme les codes LDLC

(Low-Density Lattice Codes) [165], chaque nœud feuille code ses données à l'aide d'un *lattice code* différent, puis les signaux des nœuds feuilles sont transmis simultanément au nœud relais.

Le nœud relais, au lieu de récupérer les signaux individuels (comme dans la technique DAF), il tente de récupérer et de transmettre une combinaison linéaire des signaux transmis aux nœuds feuilles A et B . En recevant un nombre suffisant de combinaisons linéaires, les nœuds feuilles sont capables de récupérer les signaux individuels en résolvant simplement ces combinaisons linéaires.

La technique CAF permet plus de transmissions simultanées en comparaison avec la technique XOR PNC, cependant le processus de réencodage et de décodage au niveau du nœud relais et des nœuds feuilles, respectivement, est très complexe [166].

Comme le montrent [167] et [168], les techniques de relayage présentées, DAF, AAF, et CAF ont des performances différentes dans différents régimes de SNR, nous proposons, ainsi, le tableau 2.1 qui présente les performances de chaque technique en fonction du régime SNR adopté.

TABLEAU 2.1 – Performances des techniques de relayage, DAF, AAF, et CAF en fonction du régime SNR.

Technique	SNR faible	SNR élevé
DAF	Bonnes	Bonnes
AAF	Mauvaises	Bonnes
CAF	Mauvaises	Bonnes

2.4 Au delà du TWRC : Autres topologies

Bien que la majorité des travaux évoquant le PNC se contente d'étudier cette technique dans le cadre d'un réseau TWRC, d'autres visent à exploiter ce concept dans différentes situations où la communication n'est pas forcément bi-directionnelle. Nous distinguons trois variantes que nous détaillons ci-après.

2.4.1 Le PNC papillon

Introduit dans [169] et [170], ce modèle étend le TWRC simple sur plusieurs sources, plusieurs destinations et éventuellement, plusieurs relais (le relais R peut être remplacé par plusieurs relais intermédiaires) comme indiqué sur la figure 2.5 :

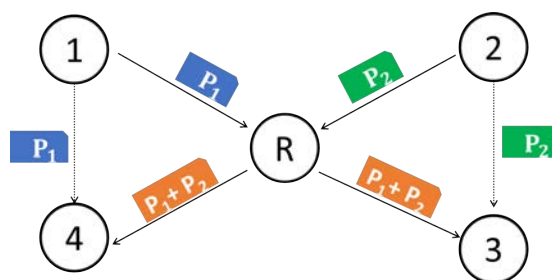


FIGURE 2.5 – La topologie papillon

Selon, cette modélisation, les deux nœuds sources 1 et 2 ont respectivement les messages P_1 et P_2 à transmettre, respectivement, aux deux nœuds destination 3 et 4. Dans un contexte sans interférence, 4 slots de temps sont nécessaires pour livrer correctement les deux messages ($1 \rightarrow R$, $R \rightarrow 3$, $2 \rightarrow R$, $R \rightarrow 4$). Par le biais du PNC et en profitant de l'écoute opportuniste dans un milieu sans fil, on aura besoin d'un premier slot de temps pour permettre aux nœuds 1 et 2 d'envoyer simultanément leurs messages vers le relai R qui, à son tour, code les messages reçus et transmet la combinaison obtenue $P_3 = P_1 \oplus P_2$ dans un deuxième slot de temps. Bien que le paquet P_1 (resp. P_2) ne lui soit pas destiné, le nœud 4 (resp. 3) écoute et enregistre le signal transmis par 1 (resp. 2) (écoute opportuniste). Ainsi, au moment de recevoir le paquet P_3 relayé par R dans le deuxième slot, les destinations des deux flux ont assez d'information pour décoder la combinaison linéaire et extraire le paquet qui leur est réellement destiné. Cet exemple, décrit dans la figure 2.5, représente un scénario basique et a été étendu dans plusieurs travaux pour supporter plusieurs relais en cascade [171].

Comme le montre [172], le schéma papillon est presque deux fois plus performant que la TWRC, ce qui s'explique par le fait que le schéma Butterfly offre plus de possibilités d'effectuer des transmissions PNC, ce qui entraîne une augmentation du débit. Cependant, il est très difficile à implémenter dans la pratique, car il nécessite une connaissance complète en temps réel (état des nœuds) de la topologie (au moins pour les nœuds qui participent au scénario papillon). Par conséquent, et en raison de la complexité du papillon, nous avons basé nos travaux sur le schéma TWRC.

2.4.2 Le système intra-flux

Bien que le modèle papillon n'exige pas un trafic bidirectionnel comme dans le schéma TWRC, il est, cependant, inefficace lorsque les flux suivent la même direction. Pour tirer profit du PNC dans de telles situations, une solution a été introduite dans [159] et dans laquelle, on ne nécessite pas d'avoir des flux dans des directions opposées [172]. En effet,

en considérant le scénario illustré sur la figure 2.6 où le noeud 1 a des paquets successifs à transmettre vers la destination 4 en passant par les relais 2 et 3 dans l'ordre. Dans un contexte sans interférence et en faisant l'hypothèse d'éviter les transmissions simultanées, le noeud 1 aura besoin de 3 slots de temps pour acheminer un seul paquet vers le noeud 4 ($1 \rightarrow 2, 2 \rightarrow 3, 3 \rightarrow 4$). Cependant, en exploitant le PNC, dans le troisième slot de temps, les noeuds 1 et 3 peuvent transmettre ensemble et respectivement les paquets P_2 et P_1 . Le noeud 2 reçoit un paquet codé physiquement de P_1 et P_2 et, ayant gardé P_1 dans son tampon, il peut décoder et récupérer le paquet P_2 (par exemple en utilisant le XOR). Avec cela, dans une topologie en chaîne, le débit est de 0,5 paquet par slot, par rapport à 0,33 (1 paquet tous les 3 slot) avec les transmissions traditionnelles sans interférence.

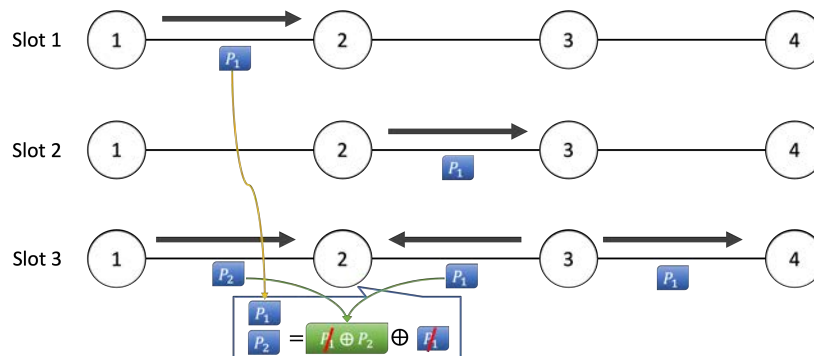


FIGURE 2.6 – Le PNC intra-flux

Dans une topologie en chaîne et dans le cas d'un flux de données omnidirectionnel, l'intra-flux est plus performant que les schémas TWRC et papillon, comme le montre [172]. Ceci s'explique par le fait qu'il n'y a pas de scénarios possibles de TWRC et papillon. Cependant, la synchronisation des nœuds du scénario intra-flux est un défi dans les systèmes pratiques, de même que, comme pour le système papillon, une connaissance complète de la topologie est requise. Pour ces raisons, nous avons choisi d'éviter ce schéma et de baser notre travail uniquement sur le TWRC.

2.4.3 Le système Multi-Way Relay Channel (Network) (MWRC ou MWRN)

Dans ce modèle, il y a plusieurs nœuds qui envoient leurs données à un même nœud destination simultanément via un relais. Ce cas de figure convient, généralement, aux liaisons *uplink* dans lesquels, des objets connectés (des capteurs par exemple), remontent leurs données vers un nœud de récolte (sink) via un *gateway* comme le montre la Figure 2.7 suivante :

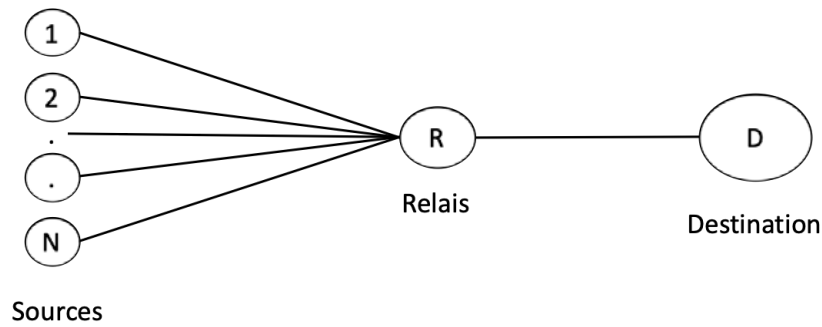


FIGURE 2.7 – Le système Multi-Way Relay Channel

Dans cette topologie, le flux est unidirectionnel et nécessite $2N$ slots de temps pour pouvoir servir N émetteurs correctement et sans interférences, comme décrit sur la figure 2.8. En effet, chaque noeud émetteur aura besoin d'un premier slot de temps pour faire parvenir son paquet au relais puis d'un deuxième slot de temps pour relayer ce paquet vers la destination.

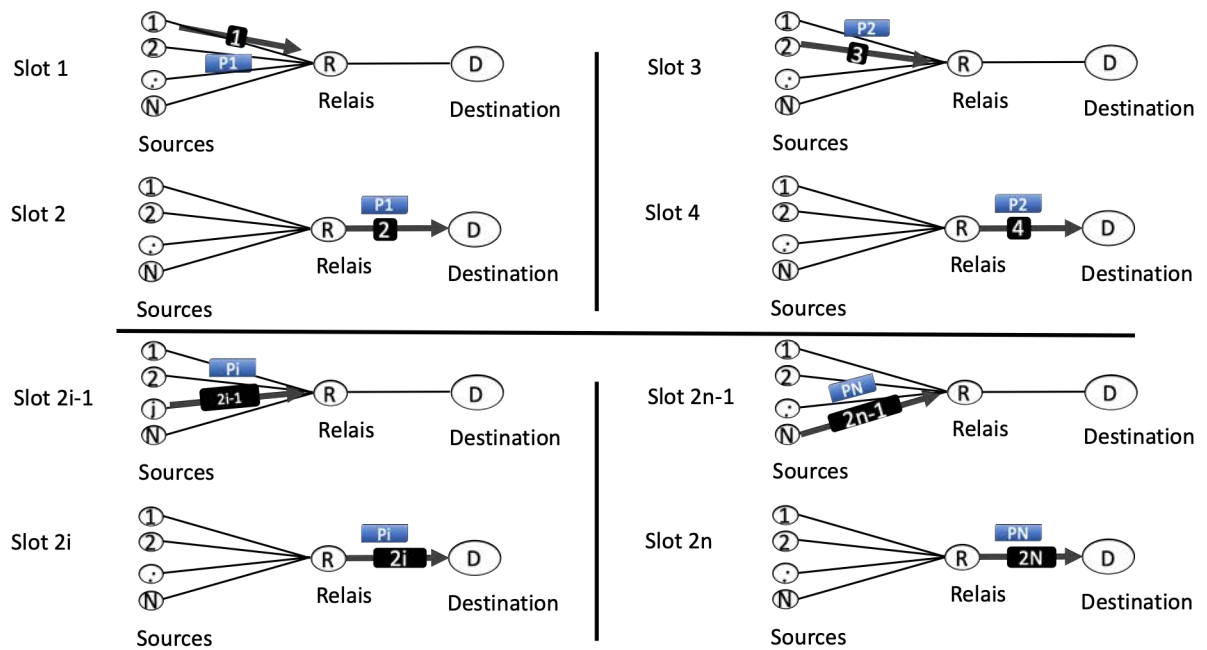


FIGURE 2.8 – Le système sans interférences

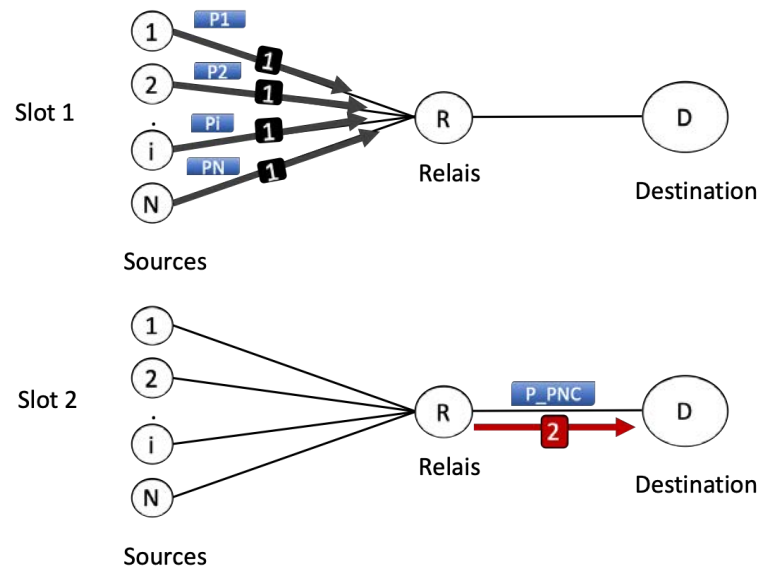


FIGURE 2.9 – Le système Multiple Access Channel Coding

Par application, du PNC, comme le montre la Figure 2.9, les N nœuds émetteurs encodent leurs paquets en utilisant des techniques de PNC bien connues comme la technique Compute-And-Forward présentée dans la section 2.3.3 [173, 174, 175] et transmettent, simultanément, leurs paquets vers le relais en un seul slot de temps. Dans le deuxième slot, le relais envoie les données codées (P_1 jusqu'à P_N) dans un seul paquet vers le nœud destinataire. Le nœud destinataire décode le paquet PNC en utilisant les mêmes techniques utilisées pour l'encodage au niveau des sources. Cette technique produit, ainsi, un débit de N paquets par 2 slots. Cependant, ces résultats sont restés théoriques et n'ont pas fait leurs preuves dans un contexte pratique car le mécanisme d'encodage/décodage d'un nombre de paquets supérieur à 2 est difficilement implantable sur de vrais équipements radio.

2.5 Le NC dans les réseaux sans fil multi-sauts : Etat de l'art et classification

Motivés par les gains obtenus sur de petites topologies, certains travaux ont cherché à intégrer le Physical-layer Network Coding dans des réseaux sans-fil multi-sauts pour traiter différents problèmes des couches supérieures (Réseau, Transport et Application).

COPE et MORE sont deux protocoles *cross-layer* entre la couche *MAC* et la couche réseau et qui intègrent tous les deux le PNC afin d'augmenter le *throughput* résultant.

COPE [22] [176] se base sur une écoute opportuniste des paquets avoisinants en cours de transmission pour pouvoir détecter des opportunités éventuelles de codage avec les paquets natifs et appliquer ainsi le NC sur le prochain saut jusqu'à la destination. Outre cette écoute opportuniste, un codage opportuniste a été aussi envisagé et selon lequel, un nœud émetteur devrait maximiser le nombre de paquets natifs livrés dans une seule transmission, tout en s'assurant que chaque saut souhaité ait suffisamment d'informations pour décoder son paquet natif [177] et ce grâce à un échange primaire de l'état de la file d'attente entre les nœuds voisins.

MORE, proposé dans [178], est un protocole de routage opportuniste se basant sur la topologie intra-flux précédemment introduite. Il sélectionne, pour une source de données, et avant chaque transmission, des candidats potentiels servant de relais. Ensuite, les paquets de données seront regroupés en lots et des paquets codés seront générés en fonction des paquets de données de ce lot. Les paquets codés seront transmis avec l'ordre de l'index de lot, selon lequel la transmission du prochain lot de paquets codés commence une fois que tous les paquets codés du lot précédent ont atteint la destination. Le nœud source continue de transmettre le lot en cours via des nœuds candidats jusqu'à ce que le nœud de destination puisse décoder tous les paquets [179]. L'un des défis de ce mécanisme est de savoir comment éviter les transmissions redondantes et fiabiliser ainsi les échanges. Couplé à un mécanisme de crédit et à une prise en charge des transmissions *multi-cast*, MORE arrive à atteindre des gains prometteurs en *throughput*.

L'inconvénient principal de MORE est que la transmission du $n^{\text{ème}}$ lot de paquets sera suspendue jusqu'à ce que le lot $n - 1$ soit acquitté par application du modèle *stop and wait* ce qui introduit des délais d'attente supplémentaires et limite ainsi son efficacité dans un réseau à grande échelle.

La technique de NC a été également introduite pour gérer le stockage distribué sur le cloud. NC-Cloud, proposé dans [180], est une forme de stockage NC qui fonctionne de manière similaire à un schéma de *Linear Network Coding*. Plusieurs travaux traitent de ce concept ou incluent des implémentations susceptibles d'améliorer les performances de NC dans les réseaux de stockage cloud et distribués [180].

De même, le Network Coding a naturellement ajouté une mesure de sécurité contre les attaques malveillantes du moment où le nœud interceptant un paquet codé, en raison d'une dépendance linéaire, devrait posséder les $n - 1$ éléments de ce paquet pour pouvoir le décoder. Ainsi, si un attaquant souhaite lire des données sur un réseau avec NC mis en œuvre, il aurait besoin d'intercepter également tous les paquets natifs précédents. Cet avantage natif du NC a été exploité dans plusieurs travaux de recherche [181].

Au vu des travaux de recherche évoquant le NC (ou le PNC), nous avons établi une classification représentative de ces contributions qui pourrait orienter le chercheur vers les contraintes, les hypothèses, le domaine d'utilisation et l'impact de cette technique sur les couches supérieures.

Sur la base d'un large éventail de travaux récents et innovants tirés de la littérature, nous avons relevé quelques points cruciaux qui ont été visés de manière succincte en tant que défis. Ainsi, nous proposons dans cette section une taxonomie de ces contributions selon la couche qui intègre cette technique de PNC. Étant donné, que dans le cadre de notre travail de thèse, nous nous limitons à l'étude du PNC dans les couches physiques et MAC, nous proposons, donc, dans cette section une première classification des travaux visant essentiellement la couche physique tout en se limitant au modèle TWRC classique adopté dans la majorité des travaux et, une seconde classification concernant les travaux élaborés au niveau de la couche MAC et qui portent essentiellement sur l'usage du PNC dans l'ordonnement des transmissions.

2.5.1 Classification selon la couche physique

A Modulation hétérogène

Dans les systèmes à canal asymétrique, où les deux nœuds d'extrémité prennent en charge différents ordres de modulation en fonction de leur état de canal, la modulation d'ordre inférieur est utilisée pour garantir un *Bit Error Rate* (BER) acceptable. Par conséquent, la liaison qui a la meilleure qualité de canal et prend en charge la modulation d'ordre supérieur n'est pas entièrement utilisée. Pour surmonter cette lacune, les auteurs de [182] et [183] proposent une nouvelle solution de transition appelée Hierarchical Physical Layer Network Coding (H-PNC) pour utiliser pleinement le canal de modulation d'ordre supérieur. H-PNC organise les transmissions en deux étapes : l'étape d'accès multiple (MA) et l'étape de diffusion (BC). Dans l'étape *MA*, le nœud source avec le meilleur canal vers le relais peut superposer le symbole ciblant le relais sur le symbole ciblant l'autre nœud source. Dans l'étape *BC*, le relais peut superposer le symbole ciblant le nœud source avec le meilleur canal sur le symbole de diffusion. Ainsi, un échange de données bidirectionnel supplémentaire est réalisé au-delà du PNC traditionnel.

Cette méthode souffre de signaux superposés avec des conditions de modulation et de canal différentes (la plupart des travaux supposent la même modulation et une condition de canal déjà connue). Par conséquent, le travail le plus récent dans [184] présente une solution pratique appelée *SigMix*. Cette solution améliore les performances de décodage

et décode le signal superposé en présence de conditions de canal dynamiques (inconnues) ou hétérogènes (modulations différentes) et d'imperfections matérielles dans les systèmes IoT.

Le tableau 2.2 résume les paramètres de la couche physique des techniques PNC présentées dans cette section.

Ci-après, les abréviations utilisées pour les modulations :

- (B,Q,M)PSK : (Binary, Quadrature, M-level) Phase Shift Keying.
- M-PAM : M Pulse-Amplitude Modulation.
- CPM : Continuous Phase Modulation.
- QAM : Quadrature Amplitude Modulation.

TABLEAU 2.2 – Les paramètres de la couche physique des techniques de modulation hétérogène.

Méthode	Mappage PNC	État du canal		Codage du canal		Ordonnancement des paquets et des symboles		Nombre de relais		Modulation
		Symétrique	Asymétrique	Conjoint	Disjoint	Synchrone	Asynchrone	Un seul	Multiple	
[182]	XOR		✓						✓	QPSK-BPSK
[183]	XOR		✓	✓					✓	QPSK-BPSK
[184]	Addition		✓				✓		✓	BPSK

B État du canal

Étant donné que les performances PNC se dégradent considérablement lorsque les gains du canal des émetteurs dans la phase d'accès multiple sont asymétriques, les auteurs de [185] décident de combiner la technique Successive Interference Cancellation (SIC) avec le PNC pour exploiter les interférences et obtenir un impressionnant gain de performances.

Le travail proposé dans [186], présente un *framework* appelé Complex Linear Physical-Layer Network, pour trouver le mappage PNC optimal (une distance euclidienne minimale entre les points de constellation mappés sur différents symboles NC) dans le canal asymétrique complexe où la puissance de transmission des nœuds sources est inégale et où un décalage de phase dans les signaux reçus s'introduit forcément.

Le travail [187] est le premier papier qui étudie les performances de PNC sous des canaux à évanouissements asymétriques et produit un BER élevé. Pour améliorer les performances du canal asymétrique PNC, les auteurs de [187] proposent un nouveau schéma PNC appelé *Bi-Quadrature Physical-layer Network Coding* (BQ-PNC) pour une topologie TWRC avec évanouissement Rayleigh et selon lequel les utilisateurs finaux utilisent une porteuse en modulation quadrature (QPSK) et le relais mappe les messages reçus à l'aide d'une combinaison en quadrature. Le schéma proposé donne un BER inférieur par rapport aux méthodes précédentes.

La technique Digital Network Coding (DNC), proposée dans [188], nécessite que le nœud relais soit capable de décoder les messages individuels reçus contrairement au PNC, où les messages individuels reçus ne sont pas décodés mais plutôt transférés directement vers la version XORée sans aucun décodage. Par conséquent, avec la DNC, le relais utilise le SIC pour décoder les messages reçus, puis diffuse la version XORée des deux flux binaires vers les deux sources, dans lesquelles on peut s'attendre à une tolérance au bruit encore plus élevée avec un traitement plus compliqué au niveau du nœud relais. Le papier présente un nouveau schéma hybride basé sur la sélection opportuniste de PNC ou DNC et étudie l'optimisation de la puissance dans les scénarios symétriques et asymétriques conduits analytiquement dans ce papier.

Dans des scénarios pratiques, des conditions de canal parfaites sont difficiles à atteindre. Cependant, en simulation, la plupart des chercheurs considèrent des conditions de canal symétriques idéales, en supposant que les nœuds sources sont parfaitement synchronisés et ont la même longueur de données. Pour des scénarios plus réalistes, peu de travaux envisagent une PNC asymétrique. Les auteurs de [189] proposent une méthode appelée *Combined Denoise-and-forward and Superposition Coded Physical-layer Network Coding*. Il s'agit d'un algorithme de décodage pour longueur de données asymétrique utilisant SIC ou LikeLikelihood Rate (LLR). Le schéma proposé surpasse la littérature dans les scénarios de longueur de données asymétriques et fournit un meilleur BER et un meilleur débit. En plus de cela, l'algorithme LLR surpasse l'algorithme SIC dans la longueur de données asymétrique.

Les travaux les plus récents sur PNC non-binaire (avec une modulation plus élevée) appliquent le processus de network coding avant le décodage de canal sur le signal d'interférence reçu (NC-CD). Ce processus provoque une énorme perte d'informations utiles pour le processus de codage de canal [190]. Pour surmonter cette lacune, les auteurs de [190] proposent d'appliquer le processus de décodage de canal avant le network coding (CD-NC) en proposant un nouvel algorithme de décodage de canal pour PNC non-binaire utilisant les codes non binaires *Low-Density-Parity-Check* (LDPC).

Les solutions PNC existantes ne considèrent que les codes canaux à taux de codage constant. Pour obtenir plus de flexibilité, les auteurs de [191] proposent un schéma de codage de canal compatible avec les débits, en utilisant les codes *Two-Edge-Type-Low-Density-Parity Check*. Ce travail présente un schéma de poinçonnage nommé choix des emplacements et des symboles pour les codes de canal dans les systèmes *Two-Way Relay*. Le schéma proposé surpasse les méthodes existantes en termes de performances de correction d'erreurs sur une large gamme de taux.

Contrairement aux systèmes traditionnels où la perte de paquet dans un lien entre la source et la destination signifie la perte du seul paquet en question, dans le système PNC, la perte d'un paquet implique, généralement, la perte de plusieurs paquets inclus dans le processus de codage (en particulier si le paquet est un paquet codé/combiné à partir de plusieurs sources). Ainsi, en vue d'augmenter les performances de codage du canal de liaison à liaison, les auteurs de [192] intègrent la concaténation en série Continuous Phase Modulation (CPM) avec le symbol-interleaves dans PNC. La méthode proposée surpasse les approches précédentes en termes de BER et offre plus de fiabilité au système PNC.

Contrairement à la fonction de relayage par Decode-And-Forward (DAF), dans la technique Lossy-Decode-and-Forward (LDF), la séquence reçue au niveau des nœuds relais est décodée, réencodée et toujours transmise dans le saut suivant, que le décodage soit réussi ou non. En effet, l'objectif de LDF n'est pas la conception détaillée des liaisons, mais l'obtention d'un gain de diversité et d'une extension de la couverture. Cette technique de relais LDF peut améliorer considérablement la fiabilité de la transmission et fournir une plus grande couverture de communication que la technique DAF traditionnelle. Les auteurs de [193] fournissent un *tutorial* complet sur la technique LDF. Cinq scénarios sont étudiés : le réseau à trois nœuds, le réseau multi-relais à source unique, le *Multiple Access Relay Channel* (MARC), le TWRC et le réseau multi-relais multi-source.

Le papier [194] présente une comparaison entre les techniques de relais Compute-And-Forward (CAF) et DAF dans un canal à bruit gaussien et à évanouissement Rayleigh dans un contexte PNC. Pour la technique CAF, on utilise la compression de la source en utilisant la quantification lattice et la quantification vectorielle optimale. Les algorithmes d'estimation des moindres carrés et des moindres carrés moyens sont utilisés pour l'estimation du canal afin d'améliorer les performances du système CAF. Les résultats de la simulation ont montré que les techniques de relais CAF surpassent les techniques DAF en termes de taux de somme. Cela signifie que le CAF est une technique prometteuse pour les futurs systèmes PNC.

Le tableau 2.3 résume les paramètres de la couche physique des techniques PNC proposées dans le domaine de l'état du canal.

TABLEAU 2.3 – Les paramètres de la couche physique des techniques de l'état du canal.

Méthode	Mappage PNC	État du canal		Codage du canal		Ordonnement des paquets et des symboles		Nombre de relais		Modulation
		Symétrique	Asymétrique	Conjoint	Disjoint	Synchrone	Asynchrone	Un seul	Multiple	
[186]	Linéaire complexe		✓			✓		✓		M-PAM
[185]	XOR		✓			✓		✓		Non définie
[195]	XOR		✓			✓		✓		Non définie
[187]	XOR		✓				✓	✓		QPSK–BPSK
[188]	XOR		✓	✓		✓		✓		Non définie
[189]	Juste <i>denoise</i>		✓		✓	✓		✓		BPSK
[190]	modulo-M arithmetie	✓			✓	✓		✓		M-PAM
[191]	XOR	✓		✓		✓		✓		BPSK
[192]	XOR	✓		✓		✓		✓		M-CPM
[193]	XOR	✓		✓		✓		✓	✓	Non définie
[194]	XOR	✓				✓			✓	BPSK

C Estimation du gain de canal

Généralement, lorsque les informations de canal sont manquantes ou mal estimées, les performances des procédés de codage de canal se dégradent et la complexité devient importante. Pour surmonter cette lacune, les auteurs de [196] proposent un nouveau schéma de NC conjointement couplé à un codage de Canal appelé Joint Channel Coding Lattice Coding. En outre, un schéma de décodage appelé Lattice Decoding Joint Channel Coding Network Coding utilise les codes LDPC. Le schéma proposé est moins complexe que les méthodes précédentes mais plus performant que les méthodes CCNC traditionnelles où l'information sur l'état du canal est inconnue ou mal estimée. Par conséquent, ce procédé peut être un bon choix pour une implémentation pratique.

En théorie, le PNC surpasse les systèmes traditionnels lorsque les conditions du canal sont parfaites. Dans les scénarios pratiques où l'état du canal est imparfait ou instable, les auteurs de [197] ont montré que la PNC n'améliore pas toujours le débit du réseau. Pour surmonter ce problème, ils ont proposé que le relais détecte les données NC à partir du signal superposé par le schéma PNC ou les données à source unique par un schéma de détection à nœud unique, qui offre un meilleur débit de bout en bout pour la réalisation actuelle du canal.

Les performances de la détection non-cohérente (le détecteur n'a accès qu'à l'amplitude et ne tient pas compte de la phase du signal) dans les systèmes PNC pourraient être diminuées puisque l'amplitude est affectée par les phases relatives des émetteurs, ce qui dégrade les performances du système. Pour traiter ce problème, les auteurs de [198] proposent un détecteur non-cohérent pour les paquets courts composé de deux éléments : un estimateur de gains de canal et un détecteur au-dessus de l'estimateur de canal. L'estimateur de canal utilise un algorithme de propagation de croyance (*belief*) pour estimer les gains du canal sans préambule à partir des symboles reçus (les gains du canal et la phase relative sont inconnus). Le détecteur estime ensuite la phase relative et détecte les

données reçues. Le schéma proposé a presque les mêmes performances qu’un détecteur avec des gains de canal parfaits et une connaissance de la phase relative dans des canaux asymétriques.

Le tableau 2.4 résume les paramètres de la couche physique des techniques PNC proposées pour l’estimation du gain de canal.

TABLEAU 2.4 – Les paramètres de la couche physique des techniques de l’estimation du gain de canal.

Méthode	Mappage PNC	État du canal		Codage du canal		Ordonnancement des paquets et des symboles		Nombre de relais		Modulation
		Symétrique	Asymétrique	Conjoint	Disjoint	Synchrone	Asynchrone	Un seul	Multiple	
[196]	Addition modulaire	✓		✓		✓		✓		PAM + QAM
[197]	XOR		✓			✓		✓		BPSK
[199]	XOR	✓		✓	✓	✓		✓		BPSK
[198]	XOR	✓	✓			✓	✓	✓		M-PSK

D Topologie du système

Pour améliorer le débit dans les grands réseaux, les auteurs de [15] proposent de décomposer le réseau en blocs appelés atomes PNC. Neuf atomes PNC sont identifiés dans cet article. Les résultats ont montré que l’utilisation de l’atome PNC proposé plutôt que l’ordonnancement traditionnel multi-sauts (non-NC) peut améliorer le débit de 100 % et 40 % par rapport à la décomposition basée uniquement sur le PNC TWRC en considérant, respectivement, une topologie en étoile symétrique et asymétrique. Les auteurs de [200] proposent des "N-way Relay Channels" pour extraire le signal codé du réseau de N signaux interférents. La méthode proposée améliore le débit dans l’atome d’étoile bidirectionnelle à 25% et diminue le temps d’occupation du relais dans l’atome d’étoile asymétrique de 4 slots de temps à 2 slots de temps. L’inconvénient de cette méthode est sa complexité : Plus le nombre N de signaux interférents augmente, plus la complexité devient importante.

Dans le scénario simple TWRC de PNC, nous avons un relais, le choix de la technique à utiliser par le relais est simple, il suffit de choisir la technique parfaite qui correspond au système conçu parmi les techniques connues : DAF, Amplify-and-Forward (AAF), *Compress(denoise)-and-Forward*, ou CAF. Alors que, dans un scénario avec plusieurs relais, le choix de la technique à utiliser dans chaque relais devient plus difficile car il faut trouver la combinaison qui maximise les performances du système. De là, pour montrer l’impact et explorer la meilleure combinaison de la technique de relais utilisée, les auteurs de [13] proposent d’étudier la topologie "full-duplex Gaussian Two-Way Diamond Relay Channel (TWDRC)" (Réseau relais diamant), comme le montre la figure 2.10, où deux nœuds échangent leurs données avec l’aide de deux relais. Les auteurs, comparent, sur cette base, trois schémas de relais dans lesquels le premier relais exécute CAF, le deuxième relais

exécute soit le DAF, AAF ou CAF en se basant sur les codes lattice. Les schémas de relais proposés sont comparés numériquement pour donner un aperçu de chaque combinaison de techniques de relais.

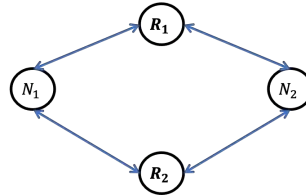


FIGURE 2.10 – Réseau relais diamant [13].

Le système PNC dans les réseaux multi-sauts souffre de différents problèmes reliés majoritairement aux effets de la propagation des erreurs et l'interférence mutuelle avec les autres nœuds émetteurs dont leurs données ne vérifient pas les conditions d'une opportunité TWRC. Ces problèmes ne sont pas bien étudiés dans les travaux précédemment cités. Pour combler cette lacune, les auteurs de [201] proposent deux conceptions de PNC multi-sauts, le PNC multi-sauts direct (D-MPNC) et le PNC multi-sauts stocké (S-MPNC). D-MPNC a les mêmes opérations de relais que dans le PNC traditionnel avec un seul relais. Cependant, le S-MPNC stocke les données reçues dans un premier temps, et tous les nœuds sources et relais peuvent les manipuler selon les opportunités TWRC présentes à un instant donné. Le S-MPNC surpasse le D-MPNC en termes de BER de bout en bout, tandis que le D-MPNC est le plus simple à mettre en œuvre. L'utilisation de S-MPNC ou de D-MPNC dépend des besoins du système PNC.

Il a été vérifié dans le travail [151] que l'utilisation de le PNC dans les réseaux multi-sauts n'est pas toujours le choix idéal. Par exemple, la TWRC n'est pas utile si le flux est dans une seule direction. Pour utiliser le PNC dans une seule direction de flux et augmenter le débit, les auteurs de [202] proposent le schéma PNC codé à la source. Ce schéma combine le PNC avec un NC au niveau des bits et l'utilisation de deux nœuds relais. Le schéma proposé a été simulé et testé à l'aide du banc d'essai Universal Software Radio Peripherals (USRP). Les résultats ont montré que le schéma proposé surpasse le PNC TWRC dans les réseaux à grande échelle et améliore le débit de plus de 30%.

Lorsque le nombre de paires partageant le même relais augmente, l'efficacité et les performances du système PNC diminuent. Pour traiter ce problème, les auteurs de [203] proposent d'utiliser l'accès multiple non orthogonal (NOMA) et le PNC de manière coopérative dans une politique de radio cognitive. Un nouveau protocole de transmission et un nouvel algorithme d'allocation de puissance sont proposés pour bénéficier de la méthode SIC. Ce schéma coopératif surpasse les schémas d'accès multiple orthogonal avec PNC en

ce qui concerne l'efficacité spectrale.

Les méthodes proposées précédemment sont conçues pour fonctionner avec un nombre connu de relais. Avec un nombre arbitraire de relais, ces méthodes ne fonctionnent pas correctement. Pour résoudre ce problème, les auteurs de [204] proposent un schéma de transmission basé sur les techniques de DAF et NC. Les résultats ont montré que le schéma proposé est plus performant que les méthodes existantes en termes de débit de transmission moyen et de BER de bout en bout.

Le tableau 2.5 résume les paramètres de la couche physique des techniques PNC proposées pour les différentes topologie du système.

TABLEAU 2.5 – Les paramètres de la couche physique des techniques proposées pour différentes topologies du système.

Méthode	Mappage PNC	État du canal		Codage du canal		Ordonnancement des paquets et des symboles		Nombre de relais		Modulation
		Symétrique	Asymétrique	Conjoint	Disjoint	Synchrone	Asynchrone	Un seul	Multiple	
[200]	XOR		✓			✓		✓		BPSK
[13]	Addition modulaire	✓			✓	✓			✓	Non définie
[202]	XOR	✓				✓			✓	BPSK
[203]	XOR	✓	✓			✓		✓		Non définie
[201]	XOR	✓				✓		✓		BPSK
[204]	XOR	✓			✓	✓			✓	BPSK

E Synchronisation et ordonnancement

Les algorithmes d'ordonnancement optimal en PNC souffrent toujours d'une complexité élevée, notamment dans le cas d'un ordonnancement distribué, puisqu'une synchronisation au niveau des symboles est nécessaire. Pour faire face à ce problème, les auteurs de [205] proposent le premier algorithme d'ordonnancement distribué à faible complexité. L'algorithme proposé est semi-décentralisé et s'exécute en temps constant. L'algorithme proposé garantit un débit élevé (environ 35%) par rapport aux algorithmes classiques d'ordonnancement sans interférence.

Le désalignement des symboles dans les scénarios pratiques de PNC a un impact significatif sur les performances du système. Pour faire face à ce problème, différents schémas sont proposés [206] [207]. Tous les travaux précédents se concentrent soit sur l'estimation du désalignement des symboles, soit sur l'algorithme de décodage PNC. Dans [208], les auteurs proposent la première estimation conjointe du désalignement des symboles et le décodage PNC dans le PNC asynchrone basé sur l'impulsion *root-raised-cosine*. Les simulations prouvent que le schéma proposé conjointement surpasse les méthodes précédentes en termes de taux d'erreur de symbole (SER). Pour traiter le décalage résiduel du gain du canal et les asynchronies et augmenter les performances des schémas précédents, les auteurs de [209] proposent d'utiliser la technique de calcul *Over-the-air*.

Le tableau 2.6 résume les paramètres de la couche physique des techniques PNC proposées pour la synchronisation et l'ordonnement des nœuds feuilles (A et B dans le TWRC).

TABLEAU 2.6 – Les paramètres de la couche physique des techniques proposées pour la synchronisation et l'ordonnement des nœuds feuilles.

Méthode	Mappage PNC	État du canal		Codage du canal		Ordonnement des paquets et des symboles		Nombre de relais		Modulation
		Symétrique	Asymétrique	Conjoint	Disjoint	Synchrone	Asynchrone	Un seul	Multiple	
[205]	XOR	✓				✓		✓		BPSK
[208]	XOR	✓			✓		✓	✓		BPSK, QPSK

F Sécurité

Les techniques de codage de canal dans PNC sont également utilisées pour transmettre des données sécurisées via des relais non fiables. Cette sécurité bien que native du principe même du PNC, est obtenue, en général, au prix d'une complexité élevée. Les auteurs dans [210] présentent une méthode pratique pour construire le code qui transmet de manière sécurisée le XOR des nœuds finaux via des relais non fiables en utilisant une combinaison simple de code linéaire et de fonction de hachage à deux universels.

Le tableau 2.7 résume les paramètres de la couche physique du technique PNC proposée pour la sécurité.

TABLEAU 2.7 – Les paramètres de la couche physique du technique proposée pour la sécurité.

Méthode	Mappage PNC	État du canal		Codage du canal		Ordonnement des paquets et des symboles		Nombre de relais		Modulation
		Symétrique	Asymétrique	Conjoint	Disjoint	Synchrone	Asynchrone	Un seul	Multiple	
[210]	XOR	✓		✓		✓		✓		BPSK

G Implémentation réelle

Dans la pratique actuellement, l'évaluation des réseaux sans fil avec la technique PNC se fait principalement par analyse théorique ou par des simulations logicielles. Ces approches manquent de fidélité et de flexibilité nécessaires à l'évaluation précise et réaliste d'un réseau sans fil [153]. Les simulations logicielles, principalement ns-2/3 [211] [212], utilisent généralement une modélisation simpliste de la couche physique qui néglige et ignore divers effets tels que la non-linéarité, le filtrage et l'intermodulation par le matériel. Cependant, avec la prolifération croissante des radios commerciales définies par radios logiciel (*Software Defined Radios*, SDR), il est devenu possible de déployer un système multi-sauts et multi-canaux et de valider le gain de débit de la technique PNC dans un contexte réel et en temps réel.

Dans ce volet, divers efforts ont été déployés pour développer des solutions SDR au niveau du matériel ou des solutions isolées au niveau du protocole. Toutefois, le principal problème était la complexité du traitement au niveau du nœud relais en raison des transmissions simultanées des nœuds périphériques. En effet, les techniques de décodage utilisées pour la technique PNC au niveau du nœud relais supposent généralement une synchronisation parfaite des deux signaux reçus à partir des nœuds terminaux (par exemple, les transmissions des utilisateurs commencent et se terminent simultanément, une translation de fréquence parfaite, etc.)

En outre, le nœud relais doit effectuer une estimation du canal de chaque signal avant toute réception.

L'une des premières implémentations réelles de la technique NC a été proposée dans [159], où les auteurs ont développé un codage de réseau analogique (Analog Network Coding, ANC) simplifié. L'idée de base de l'ANC est que le nœud relais amplifie simplement et retransmet ensuite les signaux superposés reçus sans codage. L'implémentation proposée était basée sur une plateforme SDR formée par le Universal Software Radio Peripheral (USRP) [213] avec des cartes *RFX2400* comme matériel, et le logiciel libre GNU Radio [214] comme logiciel de traitement du signal. Le principal inconvénient de cette implémentation est la propagation des erreurs, car le relais amplifie le bruit en même temps que le signal lorsqu'il le transmet aux nœuds périphériques.

Dans [215], les auteurs proposent et implémentent une technique de PNC en temps réel basée sur le TWRC, appelée RPNC. Cette technique offre une coordination plus étroite des deux nœuds feuilles, un décodage PNC en temps réel au niveau du relais et un schéma de retransmission compatible PNC pour assurer la fiabilité de la livraison des paquets. Pour améliorer le système PNC proposé, dans [216], les auteurs améliorent le RPNC pour qu'il prenne en charge des applications TCP/IP réelles. Cette amélioration permet d'utiliser l'implémentation du RPNC proposé dans des applications réelles.

Contrairement aux travaux de [215] qui ne fonctionnent que de manière hors ligne, la première implémentation PNC en temps réel a été rapportée dans [217], basée sur USRP N210 avec des cartes *XCVR2450*. Les auteurs, dans cette proposition, ont utilisé le multiplexage par répartition en fréquence (*Frequency Division Multiplexing*, FDM) pour séparer les signaux des nœuds feuilles vers le relais de ceux de la direction opposée. Pour surmonter certains défis techniques, comme la synchronisation et l'estimation des canaux, les auteurs ont utilisé le multiplexage par répartition en fréquence orthogonale (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, OFDM) avec des balises. Les contrôles d'erreur des couches PHY et MAC ont également été introduits pour garantir une plus grande

fiabilité. Cependant, cette implémentation nécessite un changement du format de trame et un compromis entre les puissances utilisées par nœuds d'extrémité de part et d'autre du relais.

Les implémentations proposées dans [218] et [219] utilisent une antenne pour transmettre et recevoir en mode semi-duplex. Par conséquent, les auteurs ajoutent une couche de coordination ou une couche MAC statique pour coordonner les transmissions des nœuds feuilles et du relais.

Les auteurs de [220] ont utilisé le full-duplex et le MIMO (Multiple Input Multiple Output) pour les transmissions et les réceptions afin d'éviter la commutation entre le mode de transmission et de réception lors de l'utilisation d'une seule antenne dans chaque matériel SDR.

Récemment, dans [221] et [222], les auteurs proposent un système PNC TWRC full-duplex, où chaque nœud SDR (relais ou nœud feuilles) peut émettre et recevoir en même temps en utilisant deux antennes. L'implémentation proposée utilise le bladeRF [223] comme matériel et la plateforme logicielle GNU Radio pour envoyer et recevoir du contenu multimédia.

Comme nous pouvons le constater dans l'état de l'art, les propositions d'implémentation des systèmes PNC basés sur la TWRC sont rares par rapport aux différentes propositions relayées par l'analyse mathématique ou l'évaluation par simulation.

Le tableau 2.8 résume les paramètres de la couche physique des techniques qui proposent une implémentation réelle de la technique PNC.

TABLEAU 2.8 – Les paramètres de la couche physique des techniques qui proposent une implémentation réelle de la technique PNC.

Méthode	Mappage PNC	État du canal		Codage du canal		Ordonnancement des paquets et des symboles		Nombre de relais		Modulation
		Symétrique	Asymétrique	Conjoint	Disjoint	Synchrone	Asynchrone	Un seul	Multiple	
[159]	XOR	✓			✓		✓	✓		MSK
[215]	XOR	✓			✓	✓		✓		BFSK
[217]	XOR	✓			✓	✓	✓	✓		BFSK
[218]	XOR	✓			✓		✓	✓		QAM-4
[219]	XOR	✓			✓		✓	✓		QAM-4
[216]	XOR	✓			✓	✓		✓		BFSK
[220]	XOR	✓			✓	✓		✓		QPSK
[221]	XOR	✓			✓	✓		✓		M-PSK
[222]	XOR	✓			✓	✓		✓		M-PSK

2.5.2 Classification selon la couche MAC

Pour exploiter pleinement des gains en débit apportés par la technique du PNC, des mécanismes d'ordonnancement au niveau MAC sont nécessaires pour créer et/ou détecter

les scénarios NC/PNC et organiser les transmissions sur cette base [151] [224] [152].

Ces mécanismes d'ordonnancement peuvent être répartis en mécanismes centralisés ou distribués selon le type de coordination. Nous adoptons, ainsi, cette répartition pour donner la liste exhaustive possible des principaux travaux de la littérature visant cette problématique.

A Les protocoles MAC centralisés

En ce qui concerne les solutions MAC centralisées, la plupart sont basées sur le protocole TDMA MAC bien connu : [225], [226], [227], [228] et [229].

Dans [225], les auteurs proposent un protocole MAC basé sur le TDMA appelé *GinMAC* pour la collecte de données dans les réseaux de capteurs sans fil utilisant le NC. *GinMAC* est proposé pour améliorer le débit, réduire le délai et éviter le problème de sur écoute dans les réseaux de capteurs sans fil. Ces travaux donnent de bons résultats par rapport aux systèmes TDMA traditionnels sans NC. Cependant, étant donné que l'ordonnancement des slots de temps est pré-alloué de manière statique et que les flux de données sont considérés comme connus au moment du déploiement, il n'est pas compatible ou adapté aux applications réelles où les flux de données sont dynamiques, et l'ordre des transmissions est incontrôlable par le protocole *GinMAC*, ce qui affecte le débit et le délai du système.

Dans [226], une implémentation réelle du scénario TWRC utilisant la technique NC dans le Software-Defined Radio (SDR) est présentée. Les auteurs proposent un nouveau protocole MAC basé sur un protocole MAC TDMA statique pour construire les scénarios TWRC et utiliser la technique NC. La politique du protocole MAC proposé consiste à utiliser des tampons dans le nœud relais et à stocker les paquets reçus des nœuds sources. Lorsque le relais reçoit des paquets d'un nœud source, il attend de recevoir des paquets de l'autre nœud (le temps d'attente n'est pas spécifié dans ce travail). La seule condition est que la taille de la mémoire tampon soit suffisamment grande pour obtenir un taux de perte de paquets acceptable), les codent en paquets NC et les diffusent aux nœuds sources. Pour éviter le problème de retard, il est nécessaire de supposer que les nœuds sources ont toujours des données à envoyer et que les tampons du relais ne sont pas vides ; sinon, le système souffrira du retard et sera inacceptable. Comme le protocole MAC proposé n'est conçu que pour trois nœuds et qu'il présente des problèmes de retard, il n'est pas pratique pour les systèmes à nœuds multiples et à flux dynamiques.

Dans [227] et [228], les auteurs proposent une version modifiée du protocole MAC TDMA pour utiliser la technique NC dans les systèmes de *Power Line Communication*.

Les protocoles MAC proposés programment statiquement les transmissions de données pour créer des opportunités de TWRC. Le relais détecte le scénario TWRC et applique la technique NC en fonction des paquets reçus. Contrairement à la proposition de [226], les travaux de [227], et [228] sont proposés pour des scénarios de TWRC multiples, c'est-à-dire un nœud relais avec N nœuds sources ; cependant, ils présentent les mêmes problèmes de retard puisqu'ils utilisent une méthode d'ordonnancement statique. Elles ne sont donc pas pratiques pour les systèmes réels.

Dans [229], un protocole MAC NC coopératif, appelé *TW-NCCR* et basé sur le standard TDMA pour construire les scénarios TWRC, a été présenté. À côté des trois nœuds du scénario TWRC, le protocole TW-NCCR utilise également des nœuds d'aide (*helpers*(H_i)) qui contribuent à améliorer la fiabilité du système en retransmettant les données reçues des deux nœuds sources ou du relais, comme le montre la figure 2.11.

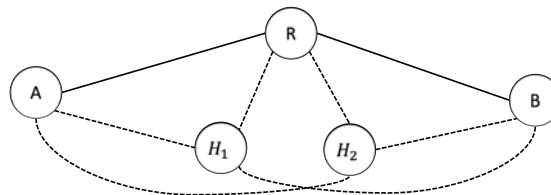


FIGURE 2.11 – Système TWRC avec deux nœuds d'aide (*helpers*).

Le TW-NCCR est divisé en deux parties, 3 slots de temps pour le scénario TWRC et N slots de temps pour les N nœuds d'aides. Le principal inconvénient de ce travail est sa faisabilité uniquement dans le cas de transmissions symétriques car les nœuds d'aides ne génèrent pas de paquets pendant les deux premiers slots de temps, ces deux slots de temps sont réservés aux nœuds feuilles A et B, les nœuds aides ne transmettent que les paquets reçus avec succès dans les $(3 + N)$ slots de temps. De plus, les auteurs ont fait des hypothèses difficiles de longueur de tampon infinie et de transmissions sans erreur.

B Les protocoles MAC distribués

La plupart des protocoles MAC distribués proposés ([14], [230], [231], [232], [153], [233] et [169]) sont basés sur la norme IEEE 802.11 (RTS/CTS) avec le standard Distributed Coordination Function (DCF) [234].

Dans [14], les auteurs proposent un ordonnancement opportuniste et distribué basé sur la norme DCF RTS/CTS IEEE 802.11 où un nœud A envoie une trame *RTS* au nœud nœud relais R , comme le montre la figure 2.12.

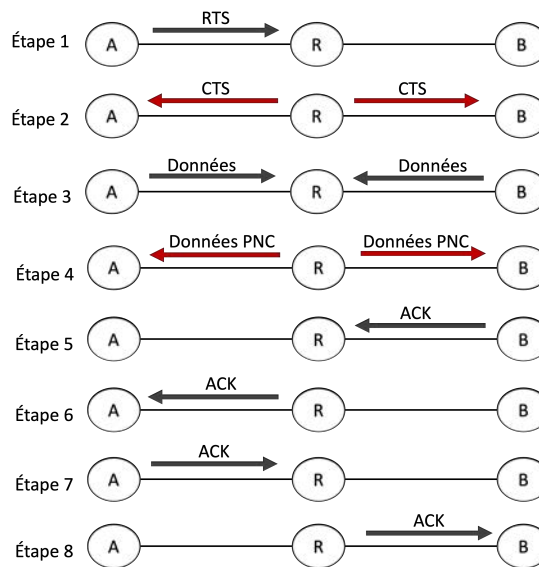


FIGURE 2.12 – Les étapes de l’ordonnancement opportuniste proposé dans [14].

Ce dernier, lorsqu’il reçoit la trame *RTS* de *A*, renvoie une trame *CTS* accusant réception de la transmission du nœud *A* et, en même temps, invitant le nœud *B* à profiter de cette opportunité et à créer un scénario TWRC en transmettant ses données au nœud *A* (s’il existe) simultanément. Ainsi, la trame *CTS* fonctionne comme un signal de contrôle pour le nœud *A* et le nœud *B* afin de synchroniser leurs transmissions au niveau du symbole. Dans ce travail, le relais ne peut pas faire la différence entre les transmissions ordinaires et les transmissions PNC, il applique donc toujours les mêmes étapes d’amplification et de retransmission, y compris les délais supplémentaires pour les *RTS/CTS* entre le nœud relais et le nœud *B* dans le cas de données ordinaires, ce qui donne toujours un modèle de trafic à 8 slots de temps. De plus, la synchronisation des deux nœuds sources est effectuée en utilisant le message *CTS*, mais en réalité, cela ne sera correct que si les deux nœuds sources sont déjà synchronisés avec le nœud relais. D’autre part, l’information sur la route à deux sauts que chaque paquet doit suivre est obtenue en échangeant des tables de routage entre les nœuds voisins, ce qui implique une surcharge supplémentaire.

Pour résoudre les problèmes du travail proposé dans [14], où le nœud relais ne peut pas différencier les données ordinaires des données PNC, les auteurs dans [169] proposent que le deuxième nœud de la TWRC envoie un message spécifique *Answer-to-Cooperate* (*ATC*) au relais uniquement en cas d’opportunité TWRC. Ce message *ATC* permet au relais de savoir que la prochaine transmission est une transmission PNC. Il reçoit un message *CTS* ordinaire le cas échéant.

Les auteurs de [230] proposent un protocole MAC PNC pour les réseaux locaux ad

hoc sans fil afin de choisir dynamiquement les nœuds de relais parmi un ensemble de candidats relais coopératifs en fonction de l'information sur l'état du canal des nœuds impliqués dans les transmissions simultanées des différentes paires de communication. Le protocole MAC proposé est considéré comme un réseau ad hoc à un saut avec plusieurs nœuds (un réseau entièrement connecté). Comme le travail proposé dans [14], ce travail présente un problème de synchronisation lorsque les nœuds sont déjà considérés comme synchronisés. De plus, ces travaux sont développés pour un réseau ad hoc à un saut, ce qui limite leur utilisation dans les réseaux multi-sauts réels.

Contrairement aux travaux de [14], et [230], où les nœuds sources initient les transmissions en envoyant un message *RTS*, dans le protocole distribué NC/PNC MAC proposé dans [231], les auteurs adoptent une nouvelle politique permettant au nœud relais d'initier les transmissions en envoyant un message *RTS* aux deux nœuds du scénario TWRC. Pour ce faire, les auteurs supposent que le nœud relais est déjà connu et qu'il a une connaissance en temps réel de l'état des files d'attente des nœud voisins à un saut (connaissance complète des files d'attente MAC). De plus, les nœuds connaissent la topologie du réseau dans un rayon d'au moins deux sauts, ce qui constitue des hypothèses difficiles et rend le travail peu pratique dans une implémentation réelle. En outre, les transmissions NC/PNC sont toujours prioritaires par rapport aux transmissions ordinaires. Ainsi, dans certains cas où des possibilités de NC/PNC existent, les transmissions ordinaires ne pourraient jamais avoir lieu.

Pour surmonter le problème de la connaissance en temps réel de l'hypothèse du nœud voisin, les auteurs de [15] proposent une solution pour détecter les atomes PNC (différents scénarios de PNC sur le réseau en étoile) dans la topologie en étoile basée sur le mode Point Coordination Function (PCF) de la norme IEEE 802.11. Le protocole MAC proposé est divisé en deux étapes : Dans la première étape, le point de coordination (le relais) recueille les informations des nœuds feuilles (*edge nodes*) et détecte les atomes PNC en utilisant le mécanisme d'interrogation de base du mode PCF (dans cette phase, les nœuds feuilles accèdent de manière aléatoire au canal et envoient la demande de transmission au nœud relais, c'est la raison pour laquelle nous classons cette méthode dans cette section). Dans la deuxième étape, ce relais affecte chaque nœud feuilles à son slot de temps.

Dans [232], les auteurs proposent un protocole MAC PNC coopératif distribué pour prendre en charge le trafic bidirectionnel dans les réseaux à accès aléatoire à un saut. Le protocole MAC proposé choisit un nœud d'aide (*helper*) de manière optimale pour jouer le rôle de nœud relais. Comme dans [230], le nœud d'aide choisi initie les transmissions PNC comme suit : d'abord, le nœud source envoie un message RTS au nœud de destination, ce dernier répond par un message CTS, le nœud source attend pendant

un certain temps pour recevoir une trame *forwarder-to-send* (FTS) qui indique s'il y a une opportunité PNC ou non. S'il existe une opportunité PNC, les deux nœuds (source et destination) envoient leurs données simultanément au nœud d'aide. Ensuite, le nœud d'aide transmet les données PNC reçues aux nœuds source et de destination. Ce travail présente également des problèmes de synchronisation, tout comme [230]. Pour améliorer encore les performances du système, une version améliorée du travail proposé dans [232] est proposée dans [233] où plusieurs nœuds relais sont choisis au lieu d'un seul nœud relais.

Pour résumer l'état de l'art, les principales lacunes des travaux antérieurs sont décrites dans les points suivants :

Les lacunes des méthodes centralisées :

- **Le délai :** Dans les protocoles MAC basés sur TDMA, en particulier dans les réseaux denses, les systèmes souffrent de délais dus à l'allocation statique des slots de temps aux nœuds du système [235] [147].
- **L'adaptabilité et la flexibilité avec les flux de données dynamiques et en temps réel :** Les protocoles MAC statiques basés sur le TDMA ne sont pas adaptés aux flux de données dynamiques et en temps réel car l'ordre des transmissions est déjà établi, ce qui retarde les données en temps réel et crée des slots de temps vides si les nœuds n'envoient pas de données [225] [226] [227].
- **Passage à l'échelle :** En raison de la centralisation et de la nature statique des protocoles MAC basés sur le TDMA, il est difficile de les mettre en œuvre dans les réseaux denses [225] [226] [227] [228] [229].

Les lacunes des méthodes distribuées :

- **La synchronisation des nœuds feuilles avec le nœud relais :** Pendant la phase d'accès multiple de la transmission du PNC, il est impératif que les deux nœuds feuilles A et B du scénario TWRC soient synchronisés [236] [237] [152] [216]. Cette synchronisation est cruciale pour la réussite de la transmission du PNC, car elle garantit que les nœuds feuilles A et B émettent simultanément. Par conséquent, le nœud relais peut efficacement recevoir et mapper les données reçues en données PNC. Le processus de synchronisation des deux nœuds feuilles avec le nœud relais nécessite de multiples échanges de messages entre chaque nœud périphérique et le nœud relais. Le nombre de messages à échanger dépend du système et des protocoles utilisés. Cependant, au moins deux échanges de messages sont nécessaires entre deux nœuds pour assurer leur synchronisation [238, 239, 153, 240, 216, 220, 241].

- **La connaissance complète en temps réel de la topologie et de l'état des voisins :** Afin d'organiser et de planifier les transmissions des nœuds, ceux-ci doivent connaître le type de transmission à venir, qu'il s'agisse d'une transmission ordinaire ou d'une transmission PNC. Par conséquent, les nœuds du réseau doivent connaître en temps réel l'état des autres nœuds (informations sur les données à envoyer), au moins dans un rayon de deux sauts. Pour ce faire, les travaux de la littérature sont divisés en trois catégories : les travaux qui traitent la connaissance en temps réel avec l'échange de messages [153] [169] [15], les travaux qui utilisent une topologie spécifique et généralement maillée [230] [232] [233], et les travaux qui posent des hypothèses fortes sur cette connaissance préalable sans vraiment les justifier [14] [231].
- **L'effet des stations cachées :** Les travaux précédents n'ont pas pris en compte l'effet des stations cachées des trois nœuds du réseau TWRC. Par conséquent, ces protocoles MAC ne peuvent pas être déployés dans des réseaux à grande échelle.

2.6 Conclusion

Ce chapitre a fourni une vue globale de la technique PNC, en mettant l'accent sur son déploiement dans les couches physique et MAC. La taxonomie des différentes conceptions physiques existantes que nous proposons fournit un guide systématique et complet pour classer les différentes techniques de PNC en fonction de leur paramétrage physique.

Notre étude des protocoles MAC proposés pour la technique PNC a révélé deux catégories principales : les protocoles MAC centralisés et les protocoles MAC distribués, chacun ayant ses propres forces et faiblesses. Nous avons listé et cité les différentes lacunes de chaque catégorie afin de fournir une compréhension complète des limites des protocoles MAC existants pour la technique PNC.

Pour remédier à ces limitations et tirer parti des points forts des protocoles MAC centralisés et distribués, nous proposons de nouvelles approches capables d'offrir des performances améliorées pour les systèmes PNC.

En outre, nous avons proposé une couche physique qui prend en charge la technique PNC en utilisant des dispositifs réels ce qui nous permettra de valider et d'évaluer nos contributions en pratique.

DSNCP : Protocole MAC dynamique et adapté au Network Coding

3.1 Introduction

Dans les réseaux sans fil multi-sauts, la détection des scénarios TWRC et l'utilisation de la technique NC ou PNC relèvent de la couche MAC et dépendent de la manière dont les terminaux sans fil accèdent au canal. En général, les mécanismes d'accès aléatoire, tels que *Carrier Sense Multiple Access* (CSMA), ont été largement adoptés dans les réseaux locaux sans fil (WLAN) et les réseaux ad hoc sans fil, mais ces mécanismes génèrent souvent une grande complexité vis-à-vis des exigences de synchronisation du *Network Coding*. En effet, pour mettre en œuvre la technique NC dans les réseaux sans fil distribués dans la pratique, tous les nœuds du réseau doivent avoir ou être synchronisés avec la même horloge, en particulier avec la PNC où une synchronisation au niveau des symboles est requise [22]. Pour cette raison, la plupart des travaux relatifs à PNC dans la littérature supposent une couche MAC basée sur le *Time Division Multiple Access* (TDMA) [159, 225, 215, 217, 218, 219, 226, 216, 220, 227, 229, 221, 222, 228]. Dans les réseaux basés sur le TDMA, un ordonnancement centralisé est nécessaire, ce qui est faisable d'un point de vue théorique malgré une difficulté de mise en oeuvre pratique.

Dans ce chapitre, nous présentons un nouveau protocole MAC appelé *Dynamic Slotted Network Coding Protocol* (DSNCP), conçu pour détecter efficacement les scénarios

TWRC (appelés opportunités NC) et appliquer la technique NC sur des topologies en étoile initialement simples et référées aussi sous le nom de *atomes PNC* [15] [242]. Nous basons notre conception sur le protocole MAC bien connu TDMA avec des modifications importantes qui apportent le dynamisme et la flexibilité à la politique d’ordonnancement.

La solution proposée a pour objectifs :

1. De résoudre le problème de synchronisation imparfaite qui empêche deux ou plusieurs nœuds de transmettre en même temps [243] par l’utilisation d’un ordonnancement en slots de temps.
2. De réduire les délais d’attente et maximiser l’utilisation du canal en adoptant une allocation de slots de temps adaptative et dynamique.
3. De minimiser l’*overhead* éventuel qui puisse résulter de l’échange préalable de l’état de la file d’attente des nœuds voisins pour détecter les opportunités de PNC.
4. De supporter les deux systèmes SNC et PNC, représentés par les figures 3.1 (a) et 3.1 (b), respectivement.

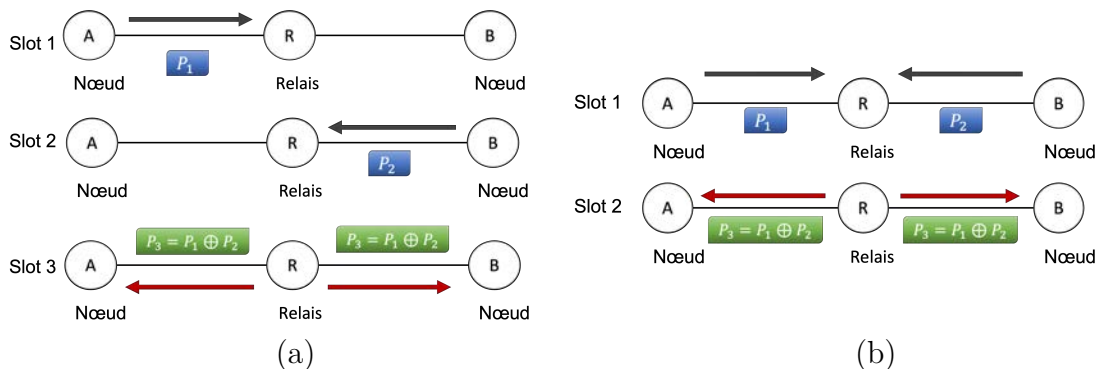


FIGURE 3.1 – Le système SNC (a) et le système PNC (b).

Ce chapitre, présente, dans un premier temps, les détails conceptuels de la solution proposée, puis expose les résultats de performances obtenus par simulation du protocole proposé en comparaison avec les protocoles TDMA et CSMA/CA classiques. Une synthèse est fournie à la fin du chapitre pour faire le point sur les limites de la solution proposée et définir les contours de la prochaine contribution.

3.2 Dynamic Slotted Network Coding Protocol

3.2.1 Préliminaires

L'utilisation de la technique NC dans des réseaux sans fil multi-sauts étendus et denses peut entraîner une certaine complexité dans la conception du protocole MAC qui supporte la technique NC, ce qui peut conduire à une analyse des performances assez difficile.

Afin de simplifier la conception de ces protocoles MAC qui supportent la technique NC, les auteurs de [15] ont montré qu'un réseau général peut être décomposé en sous-réseaux plus petits appelés *PNC Atomes* (dans ce travail, nous les appelons topologies en étoile ou simplement des étoiles), comme le montre la figure 3.2.

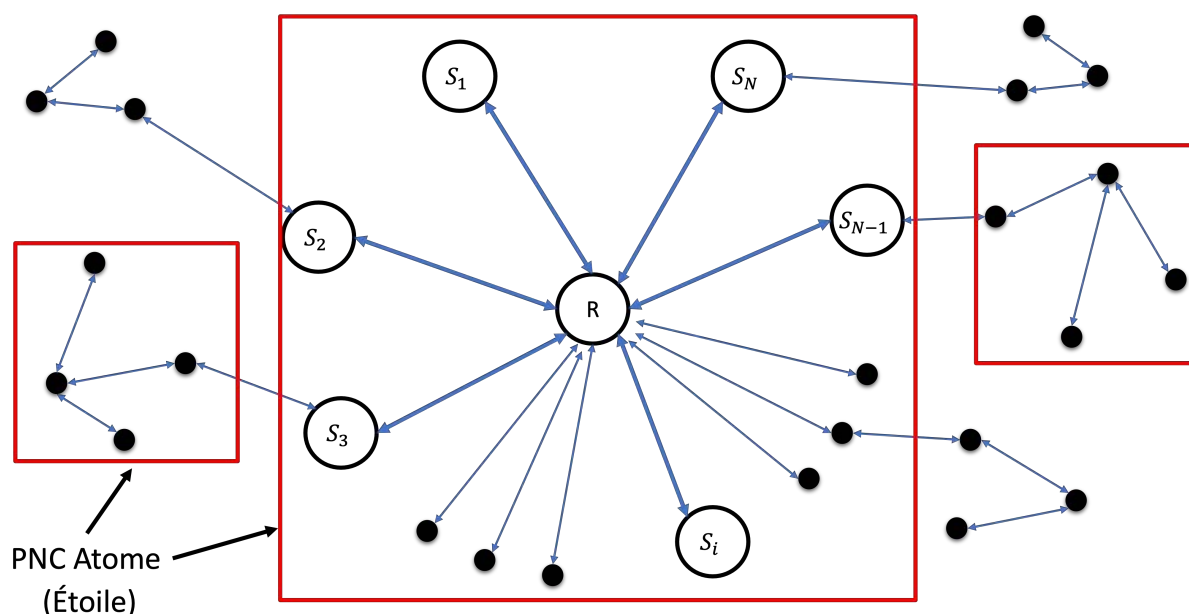


FIGURE 3.2 – Réseau général divisé en sous-réseaux de topologies en étoile (PNC Atomes) [15].

Donc, pour élucider l'applicabilité du protocole proposé, nous adoptons, dans une approche progressive, cette division du réseau en petits blocs de construction. Le protocole MAC proposé sera conçu pour fonctionner au niveau de la topologie en étoile (Atome PNC), les transmissions et les connexions entre les sous-réseaux (étoiles) ne seront pas prises en compte dans ce travail pour des raisons de simplicité étant donné que tout l'impact de la technique NC sera à l'intérieur des blocs et que les transmissions entre les blocs sont ordinaires et ne vérifient pas les conditions d'une opportunité NC.

Dans ces étoiles, comme le montre la figure 3.2, nous avons N nœuds d'extrémité

(feuilles) $(S_1, S_2, S_3, \dots, S_i, \dots, S_N)$ échangeant leurs données via un nœud central appelé nœud relais R . Une telle topologie peut être utile dans les réseaux de satellites, les réseaux de points d'accès, les réseaux de capteurs et les réseaux d'accès radio, etc.

Afin d'améliorer les performances du système à l'aide de la technique NC, il suffit de profiter des scénarios possibles de TWRC (les opportunités NC) dans chaque étoile (*PNC Atome*).

Dans ce travail, nous nous concentrons sur le scénario TWRC car il s'agit du scénario le plus fréquent dans le domaine de NC. Rappelons que pour bénéficier de la technique NC, un protocole MAC est nécessaire pour planifier les transmissions NC et construire les scénarios NC.

Ainsi, cette section présente un nouveau protocole MAC appelé *Dynamic Slotted Network Coding Protocol* (DSNCP) qui est proposé pour les systèmes de niveau "atomique" ou de topologie en étoile (avec infrastructures).

L'idée de base de notre proposition est de développer un ordonnancement des transmissions dans une perspective opportuniste afin de détecter et de prioriser les scénarios NC pour supporter les systèmes SNC et PNC, et, par conséquent, d'améliorer le *throughput* de données et de minimiser le retard résultant.

Les hypothèses de base et les éléments fondamentaux du protocole sont proposés comme suit :

1. Les horloges internes de tous les nœuds feuilles sont synchronisées avec le nœud relais, non pas en termes absolus (c'est-à-dire de manière à ce que toutes les stations partagent la même horloge) mais de manière à ce que tous les nœuds sachent exactement quand un nouveau slot de temps commence et quand il se termine. Le développement d'un schéma de synchronisation explicite dépasse le cadre de ce travail, mais nous suggérons des propositions existantes telles que [244, 238, 239, 153, 240, 216, 220, 241].
2. L'information sur le voisinage est déjà donnée (entre les nœuds feuilles de l'étoile et le relais) soit à l'aide de messages *hello* [245] ou de techniques d'authentification et d'association appropriées [246, 247, 248]. Par conséquent, nous considérons que la topologie en étoile est déjà construite et que chaque nœud connaît ses voisins (le relais connaît ses nœuds feuilles, et chaque nœud feuille connaît son nœud relais).
3. Les nœuds feuilles ont des liaisons semi-duplex avec le nœud relais et n'ont pas de liaisons entre eux.
4. Tous les paquets de données ont la même taille, de sorte que les nœuds auront

besoin de la même durée ou du même nombre de slots de temps pour transmettre leurs données.

5. Tous les paquets de données respectent une taille maximale fixe (qui se traduit par une durée de transmission fixe inférieure ou égale au slot de temps).

Sur la base de ces hypothèses et grâce à notre nouvelle classification des couches physiques présentées pour supporter la technique NC dans l'état de l'art (présentée dans le chapitre 2), nous avons pu déduire la couche physique adaptée au protocole DSNCP. Le tableau 4.2 montre les paramètres et les caractéristiques de la couche physique qui convient à notre nouveau protocole proposé DSNCP.

TABLEAU 3.1 – Les paramètres d'implémentation des couches physiques de PNC convenant au protocole DSNCP.

Les techniques	Mappage PNC	État du canal		Codage du canal		Ordonnancement des paquets		Nombre de relais		Modulation
		Symétrique	Asymétrique	Conjoint	Disjoint	Synchrone	Asynchrone	Un seul	Multiple	
Les paramètres	XOR	✓		✓	✓	✓		✓		Même modulation

Nous considérons une version modifiée du protocole TDMA où le temps est divisé (par le nœud relais) en "mini" slots de temps de longueur unitaire, comme présenté dans la figure 3.3.

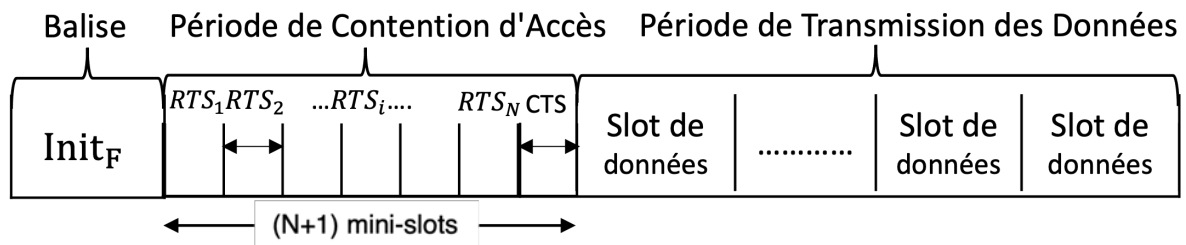


FIGURE 3.3 – Format de la super trame du protocole DSNCP.

Le principe de fonctionnement du protocole DSNCP pourrait être récapitulé selon les étapes suivantes :

Étape 1 : Le nœud relais envoie un message $Init_F$ pour initialiser une période DSNCP.

Étape 2 : Chaque nœud feuille qui veut envoyer des données envoie un message RTS au relais identifiant sa destination.

Étape 3 : Après avoir reçu tous les messages RTS et détecté toutes les transmissions NC ou ordinaires disponibles, le relais envoie un message CTS contenant le type de système de codage qui sera utilisé (le type de système utilisé est défini par le développeur lors du

processus de déploiement ou en utilisant un algorithme adaptatif) et l'allocation de chaque noeud à son slot de temps.

Étape4 : Chaque noeud envoie et reçoit ses données dans ses slots de temps adéquats pendant la période de transmission des données.

Ainsi, chaque super trame est divisée en deux parties : une Période de Contention d'Accès (PCA) utilisée pour l'allocation des ressources selon les scénarios TWRC détectés et une Période de Transmission des Données (PTD) pour les communications de données entre paires de noeuds.

3.2.2 La Période de Contention d'Accès (PCA)

La période de contention d'accès est divisée en $(N + 1)$ mini-slots comme le montre la figure 3.3, où N est le nombre de voisins du relais (les noeuds feuilles). Ces mini-slots sont conçus de manière à supporter le *handshake* traditionnel RTS/CTS (*Request To Send / Clear To Send*) pour l'attribution de la période de transmission de données suivante. Un tel mécanisme aidera le noeud relais à détecter les opportunités de NC et à faire une meilleure gestion des échanges de données conséquents.

Avant chaque période de contention d'accès, le relais envoie une super-trame $Init_F$ (Balise) pour déclencher une nouvelle période.

Cette super-trame comprend le type de message ($Init_F$) qui se trouve dans la partie contrôle de trame, le nombre de mini-slots (NB_{MS}), l'allocation de chaque noeud feuille à son mini-slot (AF_{MS}) et le *Frame Check Sequence* (FCS) comme le montre la figure 3.4.

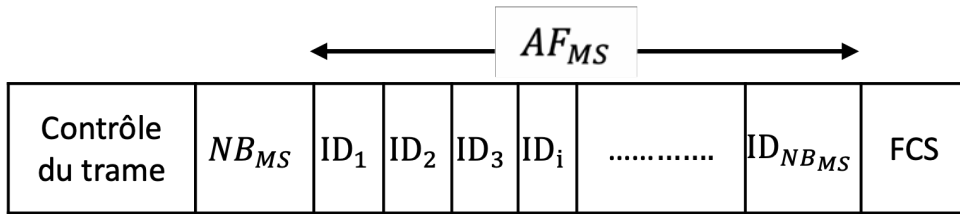


FIGURE 3.4 – Format de la trame $Init_F$.

Le temps de démarrage du mini-slot (MS_i) alloué au noeud feuille N_i peut être calculé à l'aide de la formule ci-dessous :

$$MS_i = t_0 + \sum_{j=1}^{i-1} (MST_j) \quad (1 \leq i \leq NB_{MS}) \quad (3.1)$$

Étant donné que MS_i est l'instant de départ du i ^{ème} mini-slot, t_0 est le temps de

départ de la phase de contention d'accès, et MST_j est la durée du $j^{\text{ème}}$ mini-slot.

Nous avons modifié le mécanisme RTS/CTS pour tenir compte des particularités de la technique NC comme suit :

Dans un mini-slot de contention donné, un nœud feuille souhaitant envoyer des données envoie d'abord une trame de demande d'envoi (RTS) au nœud relais.

Le message RTS, comme le montre la figure 3.5, outre le type du message (contenu dans le champ contrôle de trame) et le FCS, contient quatre champs : l'identifiant du nœud (ID_S), la priorité (P) des données à envoyer, l'identifiant du nœud relais (ID_R) et l'identifiant de la destination finale (ID_F) (dans ce travail, la destination finale est un nœud feuille).

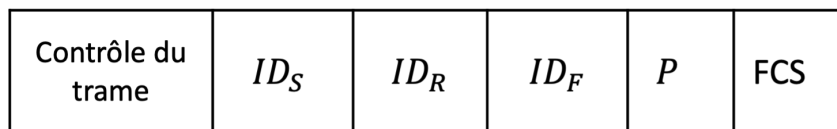


FIGURE 3.5 – Format de la trame *RTS*.

Lorsque le relais reçoit toutes les trames RTS et en fonction de la technique ou du système adopté (SNC ou PNC), il est capable de détecter les échanges mutuels pouvant faire l'objet d'une opportunité TWRC. Il diffuse, donc dans le $(N + 1)^{\text{ème}}$ mini-slot, une trame CTS indiquant les nœuds autorisés à transmettre dans la Période de Transmission de Données (PTD) suivante.

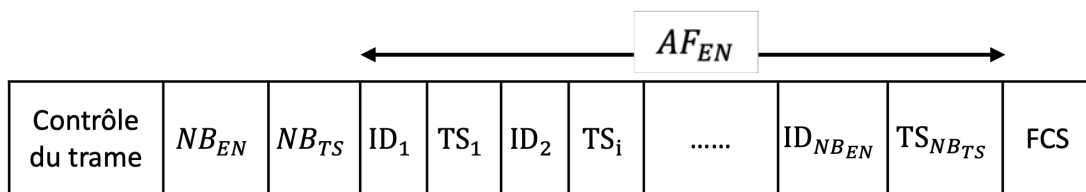


FIGURE 3.6 – Format de la trame *CTS*.

Cette trame CTS, comme le montre la figure 3.6, contient : le type du message CTS (CTS_{SNC} ou CTS_{PNC}) (dans le champ contrôle de trame), le nombre de nœuds feuilles qui enverront leurs données (NB_{EN}) dans cette période, le nombre de slots de temps dans la période de transmission des données (NB_{TS}), l'ordre de transmission de chaque émetteur (l'attribution de chaque nœud à son slot de temps) (AF_{EN}) et le FCS.

Dans la section AF_{EN} , l'*ID* de chaque nœud sera suivi de son numéro de slot de données TS_i .

Sur la base des trames RTS reçues, qui contiennent la source et la destination finale

de chaque donnée sera envoyée, le relais peut facilement détecter et extraire les scénarios TWRC (deux nœuds vont échanger des données) par rapport aux scénarios ordinaires et adapter l'allocation de la période de transmission des données (PTD) à cette fin.

En effet, pour les nœuds formant une opportunité NC, en utilisant le système SNC, le relais fournit trois slots de temps : un pour le paquet du premier nœud, un pour le paquet du deuxième nœud et le dernier pour que le relais envoie le paquet codé résultant, comme le montre la figure 3.1 (a). L'ordre est établi en fonction de la priorité des données, de sorte que le premier nœud émetteur est celui qui a la priorité la plus élevée (s'il y a des priorités identiques, le nœud qui appartient à une transmission NC a la priorité, sinon si les nœuds appartiennent à des transmissions de même type (NC ou ordinaires), l'ordre est aléatoire entre elles). Alors que, pour le système PNC, pour orchestrer une opportunité PNC, le relais fournit deux slots de temps : un premier slot pour récupérer simultanément les paquets des deux nœuds feuilles impliqués dans ce scénario et un deuxième slot pour leur faire parvenir le paquet codé résultant.

D'autre part, le relais fournit deux slots de temps pour chaque scénario ordinaire : un premier slot pour permettre à la source d'envoyer ses données au relais et un deuxième slot pour permettre au relais de transférer ces données à la destination finale correspondante.

En envoyant la trame CTS , la période de concurrence d'accès PCA se termine et la période de transmission de données PTD commence. Nous présentons les détails du fonctionnement de cette période dans la section suivante.

3.2.3 La Période de Transmission des Données (PTD)

Dans cette phase, les nœuds feuilles transmettent leurs données au nœud relais, qui, à son tour, fait parvenir ces données reçues à chaque destination. Après avoir reçu la trame CTS , chaque nœud peut calculer son slot de temps de départ en utilisant la formule ci-dessous :

$$S_i = t_0 + \sum_{j=1}^{i-1} (DS_j) \quad (1 \leq i \leq NB_{MS}) \quad (3.2)$$

Où S_i est le temps de début du $i^{\text{ème}}$ slot de données, t_0 est le temps de début de la PTD, et DS_j est la durée du $j^{\text{ème}}$ slot de données.

En fonction du type de message CTS (CTS_{SNC} ou CTS_{PNC}) reçu, les nœuds feuilles peuvent déterminer le système qui sera utilisé pendant la période de transmission des données, soit le système SNC ou PNC. Dans le système SNC, les deux nœuds feuilles

du scénario TWRC envoient leurs données l'un après l'autre dans deux slots de temps consécutifs, puis le relais leur envoie les données NC dans le troisième slot de temps. En revanche, dans le système PNC, les deux nœuds feuilles envoient leurs données simultanément dans un seul slot de temps. Ensuite, le relais leur envoie les données PNC dans le deuxième slot de temps. Par conséquent, la période de transmission des données du système PNC comporte moins de slots de données que celle du système SNC.

Après la fin de la période de transmission des données, les nœuds feuilles qui ont d'autres données à envoyer doivent attendre la réception d'une nouvelle supertrame $Init_F$ pour initialiser une nouvelle période DSNCP.

Les diagrammes de flux du protocole DSNCP pour les nœuds feuilles et le nœud relais, qui résument les différentes étapes de la solution proposée en détail, sont illustrés par les figures 3.7 et la figure 3.8, respectivement.

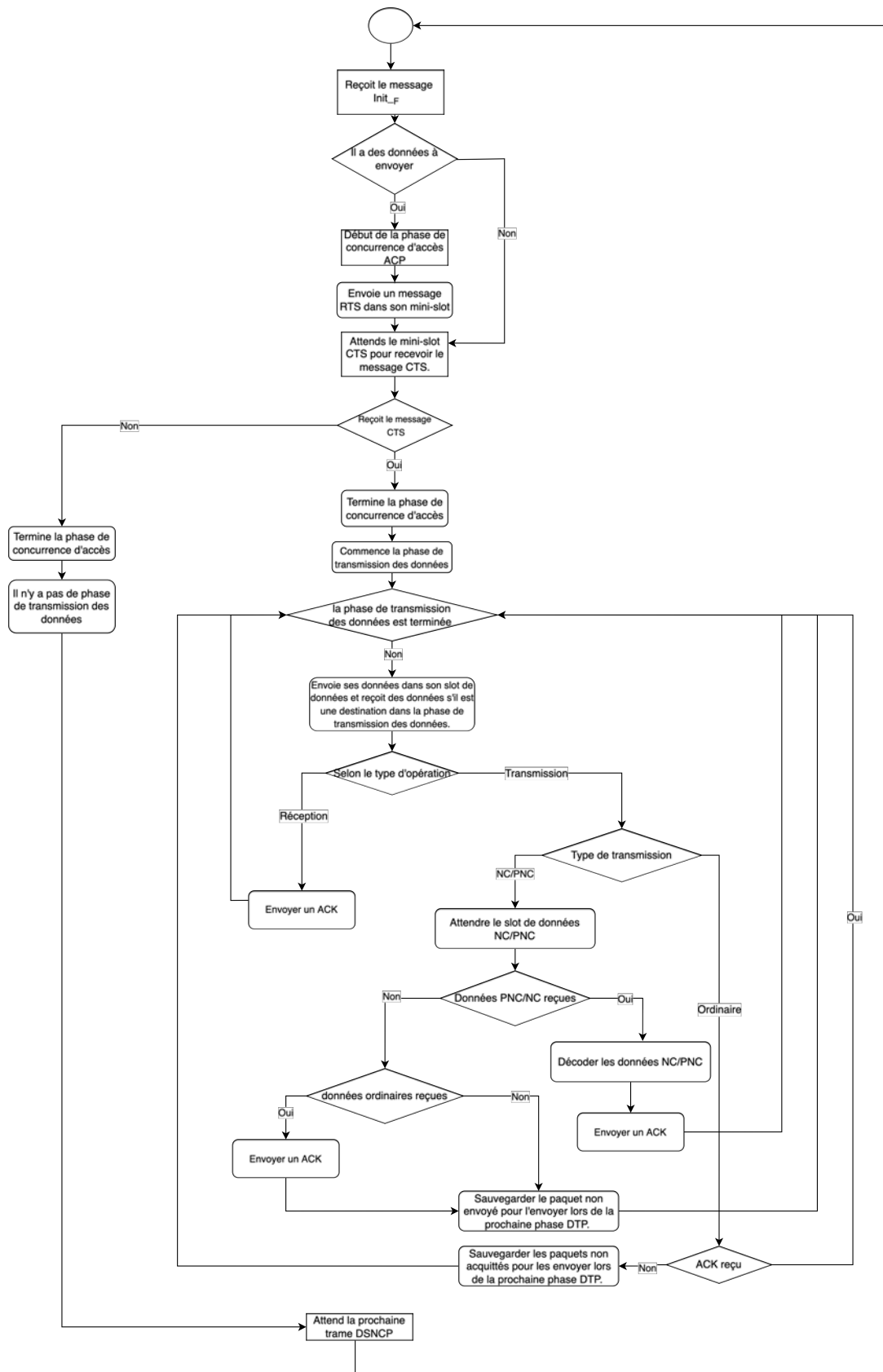


FIGURE 3.7 – Le diagramme de flux DSNCP des nœuds feuilles.

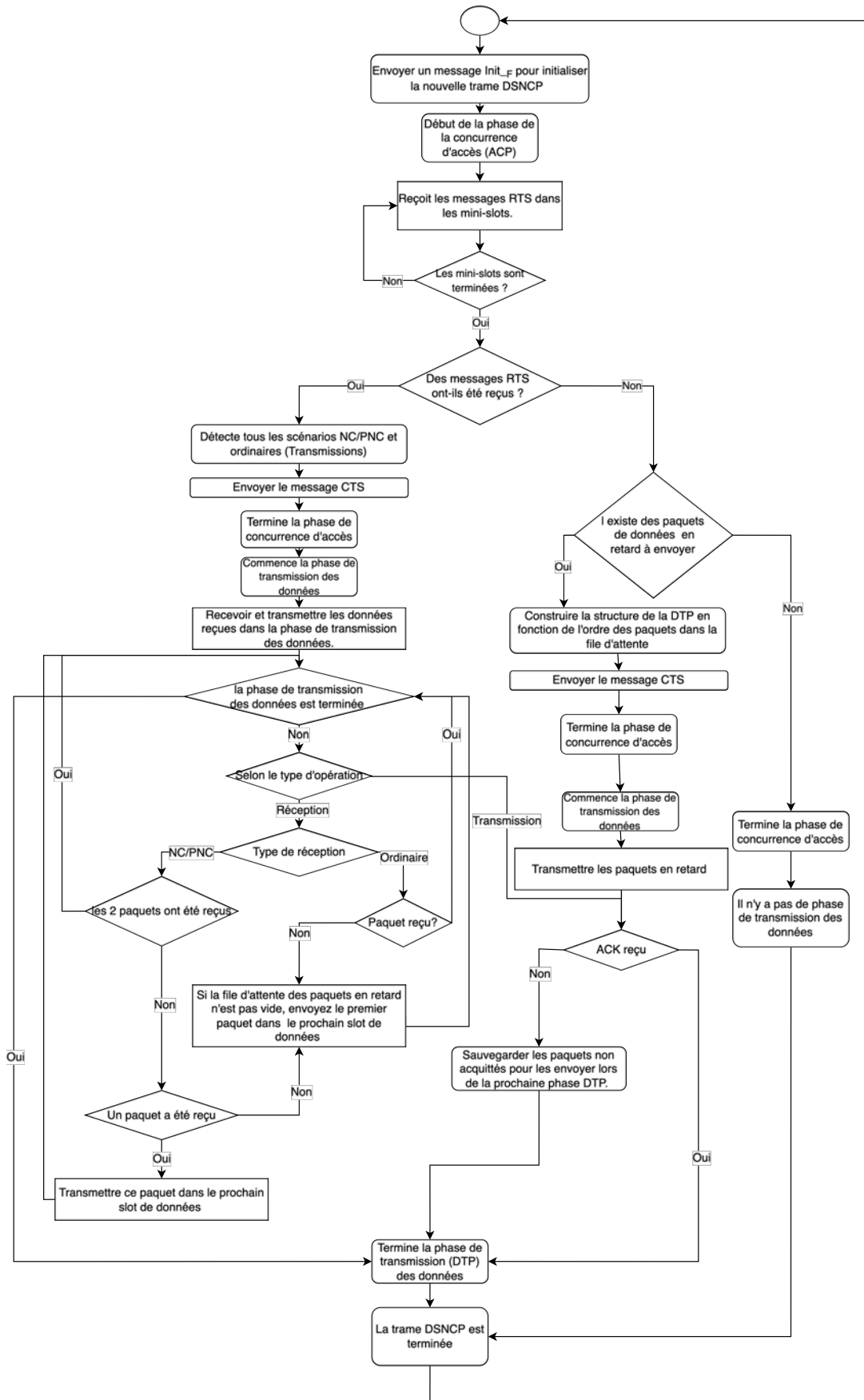


FIGURE 3.8 – Le diagramme de flux DSNCP de nœud relais.

3.2.4 Exemple illustratif

Pour illustrer le processus de la solution proposée, nous nous référons à l'exemple de la figure 3.9 dans laquelle cinq nœuds feuilles échangent des données via un nœud relais.

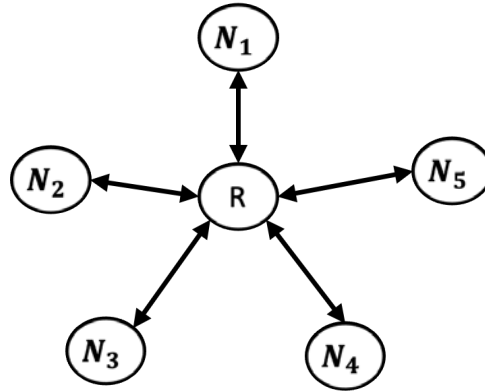


FIGURE 3.9 – La topologie de l'exemple illustratif.

Tout d'abord, le relais envoie un message $Init_F$, comme décrit dans la Figure 3.10, pour initialiser une nouvelle période. Comme nous l'avons mentionné précédemment, nous considérons que la topologie étoile est déjà construite et que le nœud relais (R) connaît déjà ses voisins (nœuds feuilles : N_1 , N_2 , N_3 , N_4 , et N_5) et leur nombre (5).

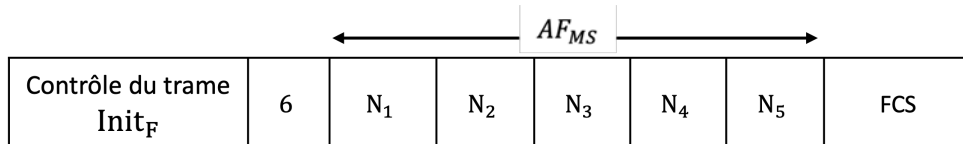


FIGURE 3.10 – Le message $Init_F$ envoyé par le relais.

Sur la base du message $Init_F$ reçu, chaque nœud feuille qui veut envoyer des données envoie d'abord un message RTS dans son mini-slot correspondant en utilisant l'équation 3.1.

Sur la base des trames RTS reçues, comme le montre la figure 3.11, le nœud relais détecte les flux de données qui peuvent être combinés en des opportunités NC et des flux ordinaires.

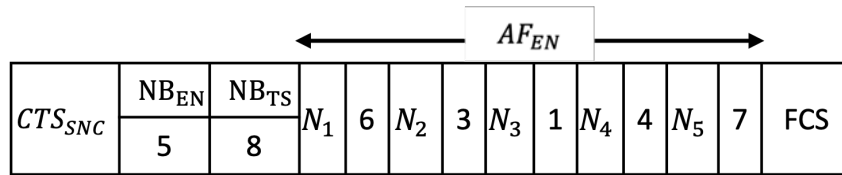
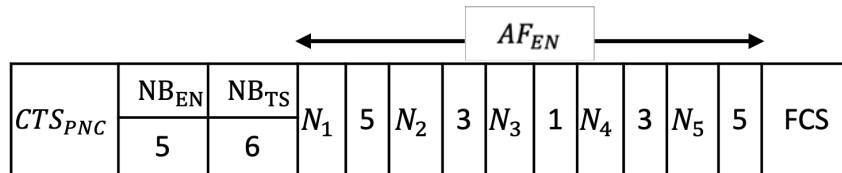
Message RTS	ID_S	ID_{FD}	P
RTS_1	N_1	N_5	0
RTS_2	N_2	N_4	1
RTS_3	N_3	N_5	5
RTS_4	N_4	N_2	2
RTS_5	N_5	N_1	1

FIGURE 3.11 – Les messages RTS reçus par le relais.

Comme mentionné dans la figure 3.11, le premier scénario NC est formé par les transmissions des nœuds N_1 et N_5 désignés par $NCT(N_1, N_5)$, le second scénario est formé par les transmissions des nœuds N_2 et N_4 désignés par $NCT(N_2, N_4)$. Le flux du nœud N_3 sera relayé comme un trafic ordinaire et désigné par $OT(N_3)$.

Ensuite, la période de transmission des données sera divisée en huit slots de temps de données en utilisant le SNC (six slots de temps en utilisant le PNC) et ordonnancée en fonction de la priorité des nœuds impliqués dans chaque transmission. Dans cet exemple, la priorité des transmissions sera attribuée inversement selon les IDs des nœuds. Par conséquent, les échanges seront exécutés comme suit : l' $OT(N_3)$ d'abord, le $NCT(N_2, N_4)$ ensuite, et enfin, le $NCT(N_1, N_5)$. Dans le cas d'une transmission PNC, la priorité du nœud n'a pas d'impact puisque le nœud relais délivrera effectivement les trames codées ($P_1 XOR P_2$) à chaque nœud destinataire (A et B) au même slot de temps, mais cette priorité est utile au relais pour planifier les temps de transmission. Cependant, ces priorités sont très importantes pour l'ordre des différentes transmissions NCT et OT car plus la priorité est élevée, les données seront envoyées plus tôt et le délai sera réduit.

Ainsi, après avoir reçu les trames RTS et identifié toutes les opportunités NC, le nœud relais diffuse une trame CTS permettant aux nœuds concernés d'envoyer leurs trames de données dans les slots de temps qui leur sont alloués. Comme le montrent les figures 3.12 et 3.13, pour les systèmes SNC et PNC respectivement, cette trame CTS contient : le type du message CTS_{SNC}/CTS_{PNC} , le nombre de nœuds feuilles qui enverront leurs données (NB_{EN}) dans cette trame, le nombre de slots de temps (NB_{TS}) dans la PTD, l'allocation de chaque nœud feuille à son slot de temps de données (AF_{EN}) et le FCS .

FIGURE 3.12 – Le message CTS_{SNC} envoyé par le relais.FIGURE 3.13 – Le message CTS_{PNC} envoyé par le relais.

Sur la base des informations contenues dans la trame CTS , nous pouvons reprendre les détails de l'ordonnancement du PTD NC (système SNC) et du PTD PNC (système PNC) comme indiqué dans les tableaux 3.2 et 3.3, respectivement.

TABLEAU 3.2 – L'ordonnancement de la période de transmission des données NC

L'ID du nœud	1	2	3	4	5	R
Slot de temps	6	3	1	4	7	(2,5,8)

TABLEAU 3.3 – L'ordonnancement de la période de transmission des données PNC

L'ID du nœud	1	2	3	4	5	R
Slot de temps	5	3	1	3	5	(2,4,6)

Les figures 3.14 et 3.15, respectivement, résument l'ordonnancement SNC et PNC de l'exemple 3.9 réalisé par la solution DSNCP.

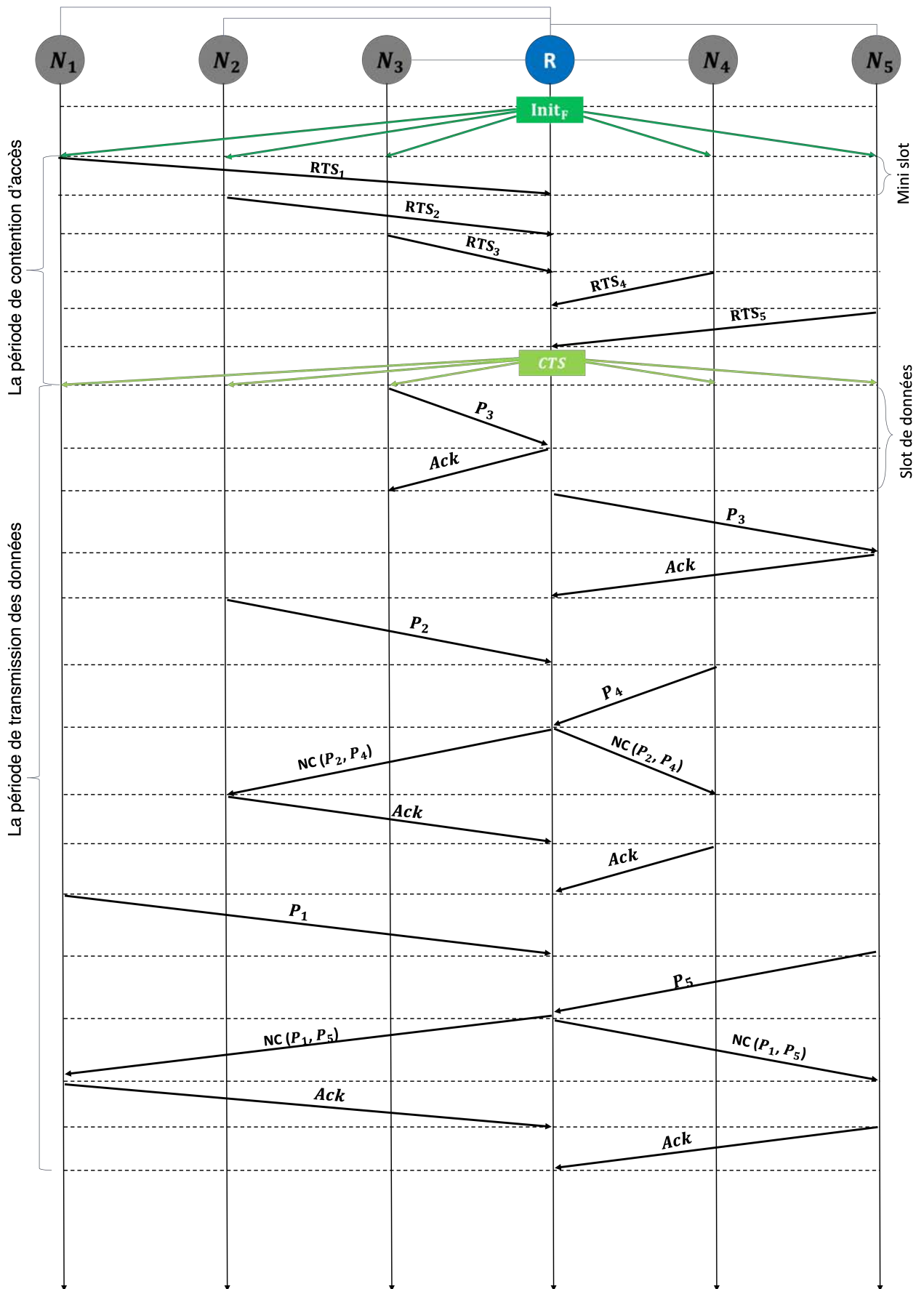


FIGURE 3.14 – L’ordonnancement du DSNCP SNC de l’exemple présenté dans la figure 3.9.

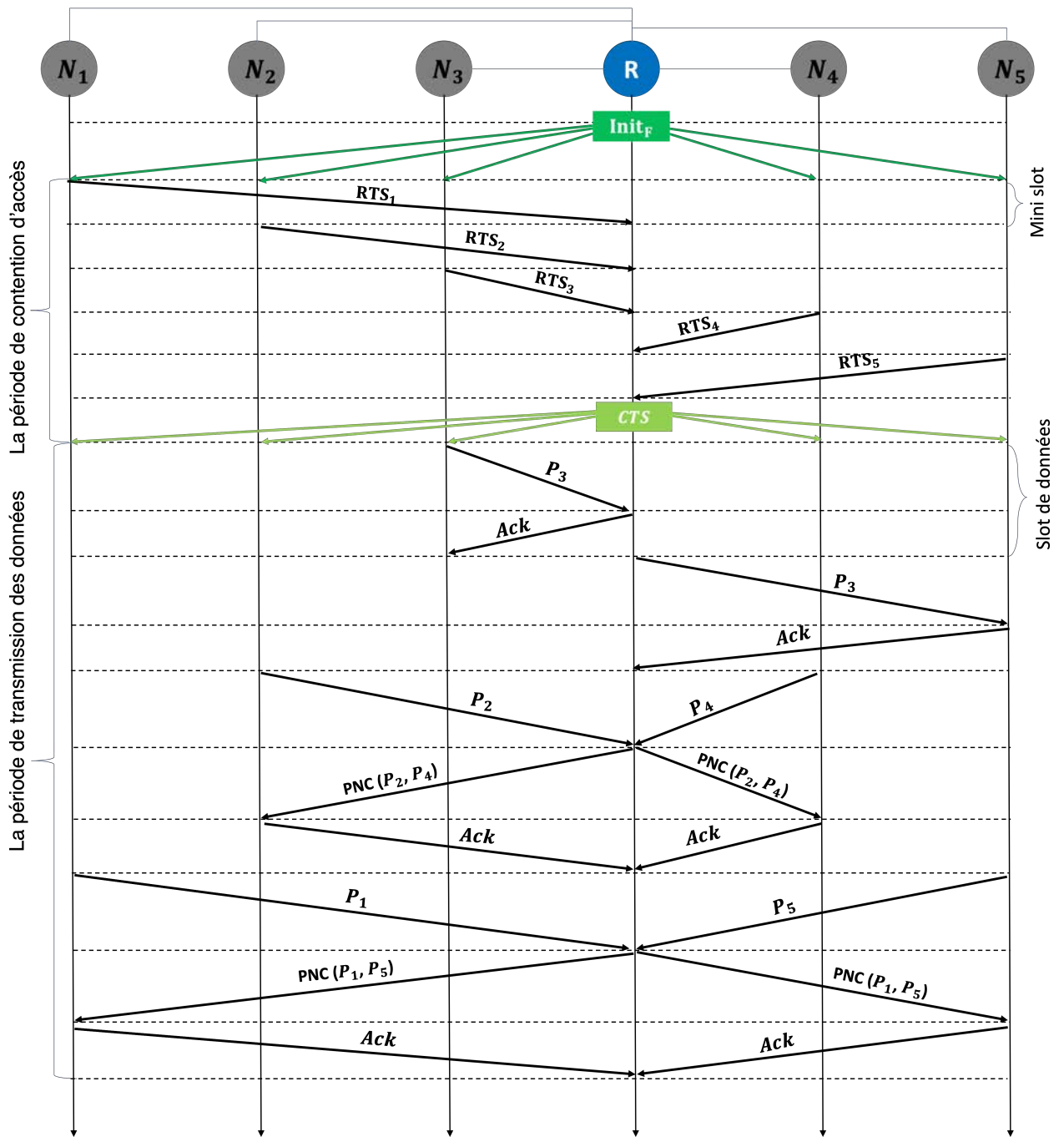


FIGURE 3.15 – L’ordonnancement du DSNCP PNC de l’exemple présenté dans la figure 3.9.

3.2.5 Traitement des exceptions

Dans un contexte réaliste, il est possible que certains paquets soient perdus (ou corrompus). Par conséquent, ces situations doivent être prises en considération. Dans cette

section, et sur la base des diagrammes présentés par les Figures 3.7 et 3.8, nous présentons les situations les plus critiques qui affecteront le système en fonction des paquets perdus, comme suit :

- **Perte du message *RTS*** : Si le nœud relais n'a reçu aucun message *RTS*, il considère qu'il n'y a pas de période de transmission de données et il n'enverra pas de message *CTS*.
- **Perte du message *CTS*** : Dans cette situation, le nœud feuille ne recevra pas une confirmation pour sa demande de transmission considère donc qu'il n'y a pas de période de transmission de données et attend le prochain message *Init_F*.
- **Perte d'un paquet d'acquittement (*ACK*)** : Si un nœud, qu'il s'agisse d'un nœud relais ou d'un nœud feuille, ne reçoit pas de message *ACK* après une transmission de données (*NC* ou ordinaire), il sauvegarde les données déjà envoyées et tente de les renvoyer dans la super trame DSNCP suivante.
- **Perte d'un paquet de données ordinaire** : Dans cette situation, il y a trois cas :
 1. **Le nœud relais n'a pas reçu le paquet ordinaire lors d'une transmission ordinaire** : Dans ce cas, le nœud relais envoie le premier paquet de données de la file d'attente des paquets sauvegardés lors des transmissions précédemment échouées.
 2. **Un des paquets ordinaires pendant la transmission *NC*** : Si le nœud relais ne reçoit qu'un seul paquet de données ordinaire pendant une transmission *NC*, il envoie le paquet reçu à la destination dans le troisième slot de temps ou le deuxième slot de temps, pour le système *SNC* ou *PNC*, respectivement.
 3. **Les deux paquets ordinaires pendant la transmission *NC*** : Si le nœud relais n'a reçu aucun paquet de données ordinaire des deux nœuds feuilles pendant une transmission *NC*, il envoie le premier paquet de données de la file d'attente des paquets sauvegardés pendant les transmissions échouées précédemment, dans le troisième slot de temps ou le deuxième slot de temps, pour le système *SNC* ou *PNC*, respectivement.
- **Perte d'un paquet de données *NC*** : Dans ce cas, le nœud feuille ne reçoit pas le paquet de données codé à partir duquel il devrait pouvoir extraire les données qui lui sont destinées. Il sauvegarde donc les données déjà envoyées et essaie de les renvoyer dans la prochaine super trame DSNCP.

3.3 Expérimentation et discussion

Cette section présente les résultats d'une évaluation des performances de la solution proposée DSNCP basée sur la simulation en utilisant les systèmes SNC et PNC et compare les résultats obtenus avec une implémentation CSMA/CA (avec RTS et CTS) et TDMA (statique). Pour les protocoles MAC CSMA/CA et TDMA bien connus, nous avons ajouté une sous-couche afin de supporter la technique NC et de rendre la comparaison plus équitable. Dans cette sous-couche, les opportunités NC sont détectées par le relais en fonction de la file d'attente des données reçues. Si le relais détecte une opportunité NC, il encode les deux paquets impliqués dans cette opportunité et envoie le paquet encodé comme un paquet NC, c'est ce qu'on appelle le NC opportuniste. Nous décrivons d'abord l'environnement de simulation, les métriques de performance, et finalement, nous présentons et interprétons les résultats obtenus.

À l'aide de NS-3 [212], nous avons implémenté les protocoles *DSNCP*, *CSMA/CA* et *TDMA* avec toutes les modifications sus-mentionnées. Les configurations du système sont présentées dans le tableau 3.4. Pour les flux de données, en ayant à l'appui la topologie de la figure 3.16, nous avons établi les paires formées en diagonale par chacun des noeuds feuilles et son correspondant via le relais.

TABLEAU 3.4 – Les paramètres utilisés pour l'implémentation.

Couche	Paramètre	Valeur
Application	Résultats obtenus	La moyenne de 30 simulations
	Temps de simulation	200 secondes
	Distance entre chaque nœud feuille et le relais	300 mètres
Réseau	Protocole de routage	Statique
Liaison	Slot de temps	0.8 milliseconde
	Temps de Mini-slot	20 microseconde
	Taille du paquet	1024 octets
	Technique de mappage NC	XOR
Physique	<i>Throughput</i> physique	Dsss Rate 11Mbps (IEEE 802.11g, 2.4 GHz)
	Modèle de perte et de propagation	Friis Propagation Loss Model

Les performances du DSNCP proposé sont évaluées à l'aide de trois métriques : le *throughput*, le délai et le taux de perte de paquets, car ces métriques sont étroitement influencées par la technique Network Coding.

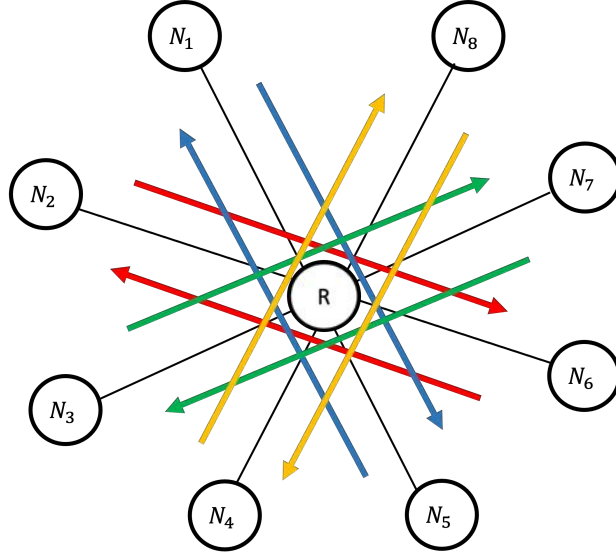


FIGURE 3.16 – Un exemple de flux de données d’une topologie étoile composée de 8 feuilles et d’un nœud relais

Le *throughput* moyen est mesuré en Kbits et considère la moyenne des bits reçus par tous les nœuds feuilles pendant la période de simulation. La formule pour calculer ce *throughput* est la suivante :

$$\text{Débit} = \left(\frac{\sum_{i=1}^N \text{RCVDATA}_i}{N} \right) \quad (3.3)$$

Où RCVDATA_i est la quantité de données reçues par le nœud feuille i , et N est le nombre de nœuds feuilles.

Le délai moyen de bout en bout représente le temps total pour délivrer un paquet et comprend tous les délais possibles causés par la mise en mémoire tampon (de la couche application), la mise en file d’attente à l’interface (de la couche MAC), le délai de retransmission à la couche MAC, la propagation et le temps de transfert (des nœuds source et relais). Il est exprimé en millisecondes et est mesuré par la formule ci-dessous :

$$\text{Délai} = \frac{\sum_{j=1}^P (DT_j - CT_j)}{P_k} \quad (3.4)$$

Où $(DT_j - CT_j)$ est le délai de bout en bout du paquet j , qui est la durée entre le temps de création du paquet j par l’émetteur (CT_j) et son temps de livraison par la destination finale (DT_j), et P_k est le nombre de tous les paquets reçus par tous les nœuds feuilles.

Enfin, la troisième métrique est le taux de perte de paquets (PLR, *Packet’s Loss Rate*

en anglais), qui représente le rapport entre les paquets reçus avec succès (SRP, *Successfully Received Packets* en anglais) et tous les paquets de données transmis (TDP, *Transmitted Data Packets* en anglais). La formule pour calculer le PLR est la suivante :

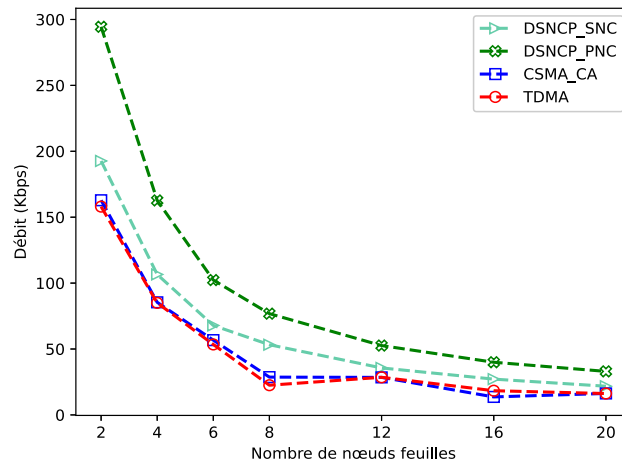
$$PLR \% = \frac{(SRP * 100)}{TDP} \quad (3.5)$$

Les résultats de la simulation sont donnés respectivement par la figure 3.17 lorsque l'on fait varier la densité du réseau, c'est-à-dire le nombre de nœuds feuilles et pour laquelle nous avons utilisé des topologies de 2, 4, 6, 8, 12, 16 et 20 nœuds feuilles et la figure 3.18 lorsque l'on fait varier la charge de trafic, c'est-à-dire le nombre de paquets envoyés par chaque nœud feuille (la topologie de la figure 3.16 a été utilisée dans ce scénario) et pour laquelle nous avons utilisé un modèle de trafic de 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 et 6000 paquets/nœud sachant que quelle que soit la charge de trafic, la production des paquets est régulière avec un taux de 100kbps.

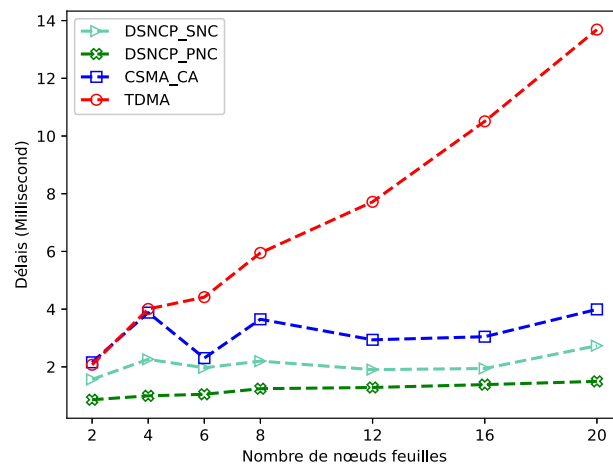
Pour le *throughput*, les figures 3.17 (a) et 3.18 (a) montrent que le DSNCP surpasse toujours les protocoles CSMA/CA et TDMA indépendamment du nombre de nœuds et de la charge de trafic. Il maintient un bon *throughput* plus longtemps en raison de sa nature opportuniste et de sa capacité à détecter, à l'avance, toutes les opportunités de NC possibles pour tous les flux de données par rapport aux protocoles CSMA/CA et TDMA.

En outre, par rapport au protocole CSMA/CA où l'accès au support est effectué de manière complètement aléatoire et par rapport à la norme TDMA où les slots de temps sont alloués aux nœuds feuilles de manière statique et donc, la détection des opportunités de NC est rare et parfois impossible, les aspects centralisés et dynamiques du protocole DSNCP ont rendu le contrôle d'accès au support facile et l'ordonnement des flux de données adaptatif et efficace.

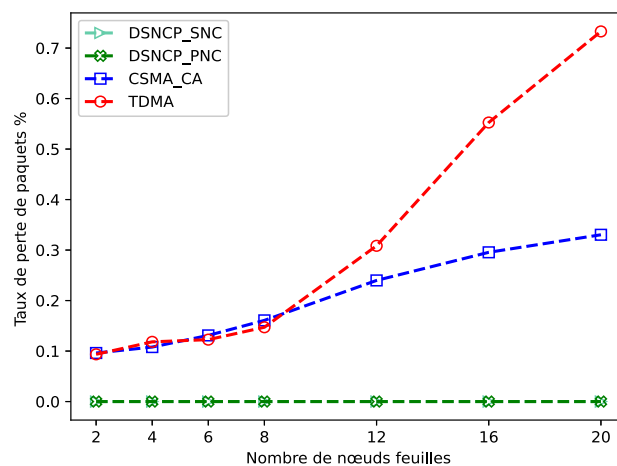
De plus, le *throughput* est fortement influencé par la file d'attente MAC du relais contenant les paquets reçus des nœuds feuilles en vue de les relayer vers les destinations correspondantes et la file d'attente NC, qui est utilisée pour stocker les paquets NC utiles pour le codage/décodage. Sachant que dans, notre évaluation, la taille maximale proposée de la file d'attente MAC de transmission ou de la file d'attente NC est de 2 (pour les deux paquets des deux nœuds feuilles impliqués dans le scénario TWRC).



(a)

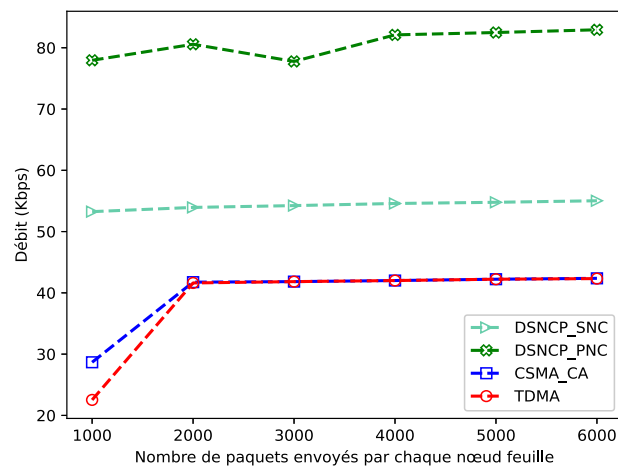


(b)

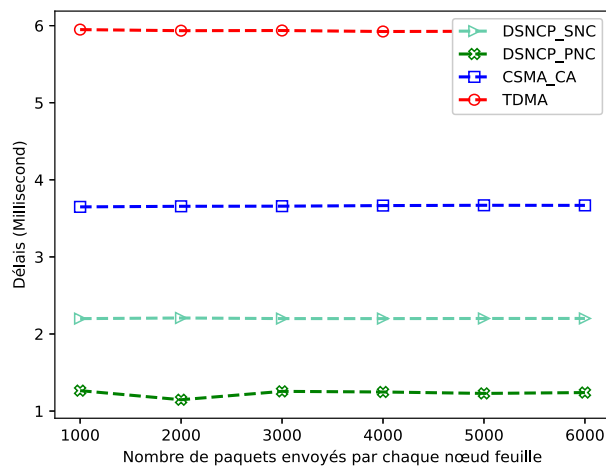


(c)

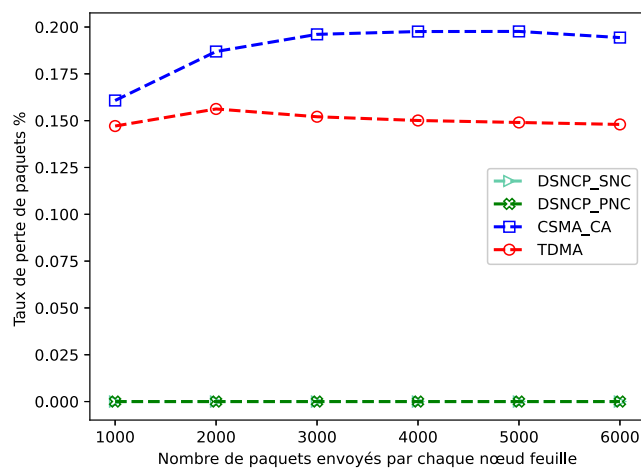
FIGURE 3.17 – Résultats des performances en fonction de la densité du réseau



(a)



(b)



(c)

FIGURE 3.18 – Résultats des performances en fonction de la charge du trafic

La figure 3.17 (a) montre également que le *throughput* diminue progressivement avec le nombre de nœuds feuilles. Cette diminution est due aux délais de traitement et aux pertes causées par la saturation des files d'attente au niveau du nœud relais, qui augmente avec l'affluence des nouveaux paquets de données.

On remarque également, à partir de cette figure 3.17 (a), que, pour des topologies relativement denses (plus de 12 nœuds), le protocole CSMA/CA perd légèrement de son efficacité en termes de *throughput* par rapport au protocole TDMA en raison des pertes associées à l'accès au support et des problèmes d'interférence lorsque nous traitons plusieurs nœuds chose qui évitée dans un accès déterministe et en slots.

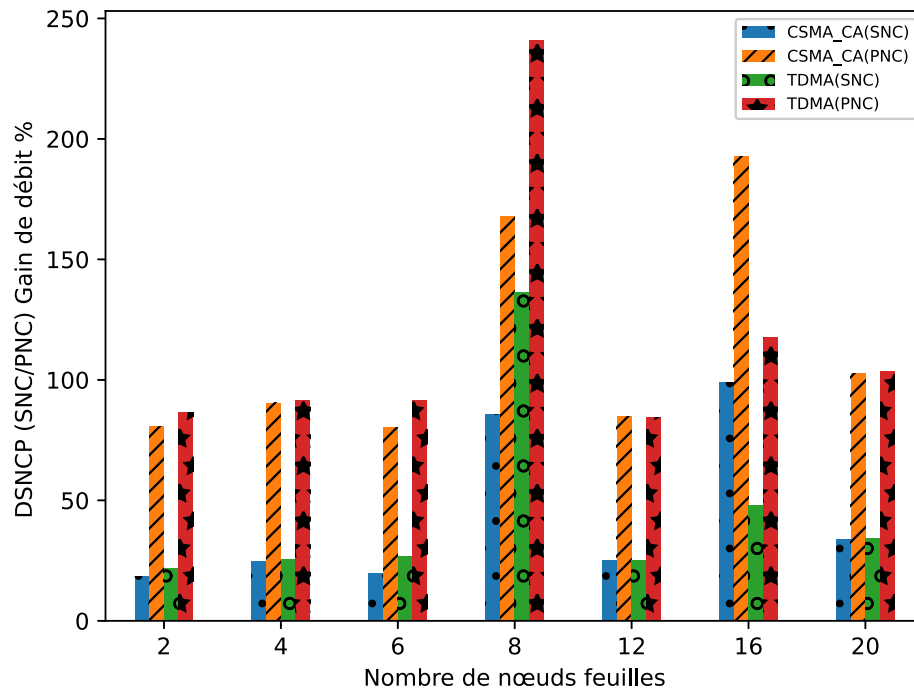
D'après la figure 3.18 (a), nous pouvons voir que tous les protocoles sont stables dans le temps, ce qui est dû à la production régulière des paquets de données. Dès que la quantité de données est transmise, le DSNCP est plus performant en termes de *throughput*. De même, nous pouvons voir que les protocoles CSMA/CA et TDMA donnent presque le même *throughput* dans la même topologie au fil du temps.

En outre, nous pouvons facilement remarquer un saut dans le débit pour TDMA et CSMA/CA à partir d'une charge de trafic de 2000 paquets par seconde. Ce saut s'explique par le peu d'opportunités NC existantes lorsque la charge de trafic est limitée et le gain en *throughput* réalisé lorsque la charge de trafic augmente.

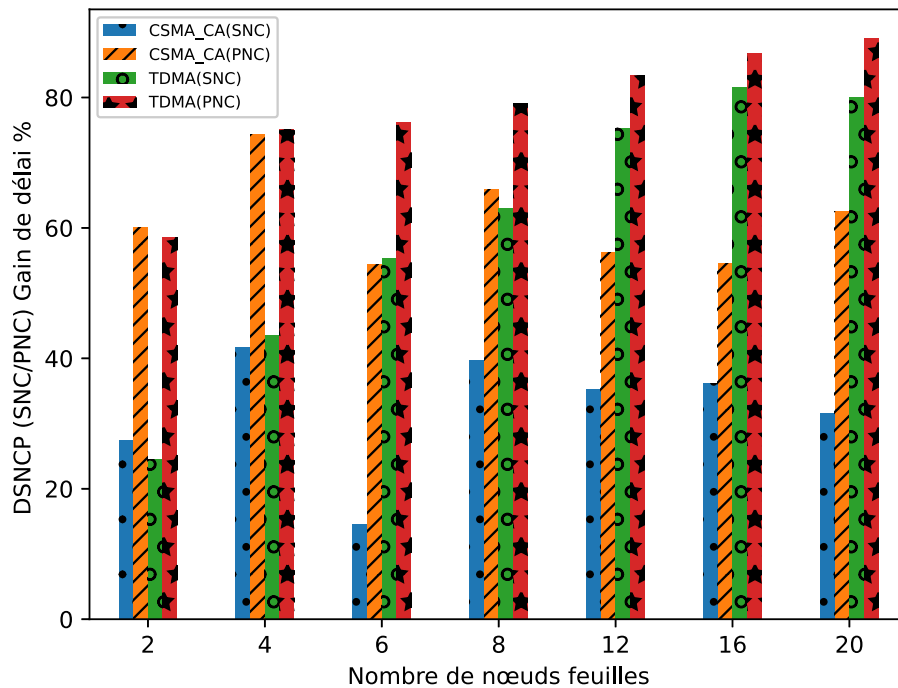
Nous pouvons également voir sur les figures 3.17 (a) et 3.18 (a) qu'en utilisant le système PNC, le DSNCP donne de meilleurs résultats qu'en utilisant le système SNC, ceci parce que le système PNC utilise deux slots de temps pour livrer un paquet plutôt que trois slots de temps du système SNC, comme nous l'avons vu précédemment.

Pour les résultats de délai, représentés dans les figures 3.17 (b) et 3.18 (b), nous pouvons clairement observer le gain notable réalisé par DSNCP par rapport aux autres protocoles. En effet, étant donné que la décision NC dans les protocoles CSMA/CA et TDMA est basée uniquement sur les paquets de données déjà reçus par le nœud relais, cela donne un avantage à la solution opportuniste proposée pour détecter plus d'opportunités, pour réduire les slots de temps nécessaires pour chaque scénario TWRC et donc pour obtenir de meilleures performances globales, notamment en termes de délai de livraison.

D'après la figure 3.17 (b), si le nombre de nœuds feuilles augmente, le délai du DSNCP (utilisant SNC et PNC) et du CSMA/CA est soit constant, soit augmenté d'un pourcentage minime, par rapport au protocole TDMA, qui donne le pire délai et augmente de manière exponentielle avec le nombre de nœuds feuilles.



(a)



(b)

FIGURE 3.19 – Les gains en délai et en *throughput* du DSNCP par rapport aux protocoles TDMA et CSMA/CA.

Les résultats dans 3.17 (b) montrent également que, pour tous les protocoles MAC, le délai de bout en bout augmente avec la taille du réseau, car, en général, l'augmentation du nombre de nœuds dans le réseau entraîne une charge de trafic supplémentaire et donc, les délais causés par les délais de mise en mémoire tampon et les files d'attente au niveau du nœud relais contribuent de manière significative au délai de bout en bout.

Cette augmentation est particulièrement importante avec le protocole TDMA, ce qui pourrait s'expliquer par l'allocation statique des slots de temps et la présence de slots de temps alloués inutilement à des nœuds qui n'ont pas de données à transmettre.

La figure 3.19 montre le gain du DSNCP, utilisant SNC et PNC, par rapport aux protocoles CSMA/CA et TDMA en termes, respectivement, de *throughput* et de délai de bout en bout.

Les figures 3.17 (c) et 3.18 (c) présentent le taux de perte de paquets en fonction de la densité du réseau et de la charge de trafic, respectivement. Étant donné que le DSNCP est basé sur un mécanisme de *handshake* préalable et que les paquets reçus sont directement suivis dans le prochain slot de temps par le relais, il est généralement rare d'abandonner des paquets en raison de la saturation des files d'attente MAC ou du *timeout*. Par conséquent, le taux de perte de paquets du DSNCP est naturellement très faible.

D'après les résultats de la figure 3.17 (c), nous pouvons conclure que, puisque le TDMA est statique, plus le nombre de nœuds feuilles est élevé, plus le nombre de paquets reçus est important, ce qui peut conduire à une saturation rapide des files d'attente et à un *timeout* du délai d'attente des paquets. Les pertes dans le contexte CSMA/CA sont généralement causées par des collisions lors de la période de contention d'accès.

De tous les résultats, nous concluons à la performance et à la stabilité du DSNCP par rapport aux protocoles MAC CSMA/CA et TDMA en termes de *throughput*, de délai et de taux de perte de paquets, peu importe, il utilise le système SNC ou PNC. Les résultats ont également montré que le DSNCP donne de meilleurs résultats en utilisant le système PNC qu'en utilisant le système SNC, comme prévu.

3.4 Synthèse

L'évaluation des performances réalisée à l'aide du simulateur NS-3, a montré, en général, les bonnes performances de notre nouveau protocole MAC proposé appelé DSNCP.

Comme nous l'avons présenté précédemment, les résultats du DSNCP sur la topologie étoile montrent les gains apportés par la technique de *Network Coding* par rapport aux

transmissions traditionnelles. Les résultats obtenus révèlent, également, l'utilité de l'aspect dynamique dans l'allocation des slots de temps aux noeuds du réseau contrairement à une allocation statique et figée ce qui procure à la solution proposée une flexibilité et une adaptabilité en fonction de la densité et de la charge du réseau.

Cependant, cette simulation peut se révéler relativement simpliste et peu conforme aux conditions réelles liées essentiellement au matériel utilisé et aux imperfections de la couche physique adoptée. Ces contraintes physiques, dans un contexte PNC, pourraient engendrer une asynchronie, des déphasages, des pertes de données, des retransmissions et pourraient ainsi compromettre les gains éventuels de la technique PNC. Par conséquent, une couche physique dédiée doit être implémentée en premier lieu pour supporter le système PNC et permettre des transmissions simultanées synchrones et fiables.

En outre, le protocole MAC proposé étant validé et évalué sur des topologies en étoile simples, mérite de l'adopter pour les réseaux à grande échelle où les étoiles, ici considérées, seront interconnectées pour former un système complet.

De plus, afin d'étudier la faisabilité et l'intégration de la technique PNC dans un milieu réel, nous proposons de faire des expérimentations de la solution proposée sur un banc d'essai réel basé sur un système de radio logicielle « *Softwar Defined Radio* ». Cette étape nous permettra de lever les verrous sur les défis réels qui freinent l'adoption du NC dans les réseaux sans fil multi-sauts denses et déployés à grande échelle.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, un protocole MAC à slots dynamiques (DSNCP) basé sur la norme TDMA a été proposé. Le DSNCP est conçu pour prendre en charge de manière opportuniste les scénarios de Network Coding TWRC avec un mécanisme de *handshake* adapté au préalable. Le DSNCP proposé introduit des mini-slots temporels dans lesquelles le nœud relais détecte les opportunités de TWRC et planifie ces transmissions de manière dynamique et efficace. Par des simulations sous différents modèles de densité de réseau et de charge de trafic, nous avons démontré que le DSNCP peut considérablement améliorer le *throughput* et le délai par rapport aux protocoles MAC basés sur TDMA et CSMA/CA de l'IEEE 802.11.

Dans le chapitre suivant, nous proposons d'implémenter une couche physique dédiée pour supporter les transmissions PNC en utilisant un *testbed* réel. La couche physique proposée sera la première solution qui supporte un système hétérogène de radio logicielle.

Proposition et implémentation d'une couche physique adaptée au PNC en utilisant des radios logicielles hétérogènes

4.1 Introduction

Motivés par les résultats des performances obtenus avec des transmissions NC par rapport aux transmissions traditionnelles présentées dans le chapitre précédent, une implémentation de la technique NC sur un *testbed* réel sera discutée dans ce chapitre.

Comme la technique PNC exige que les deux nœuds feuilles soient parfaitement synchronisés (au niveau du symbole), son implémentation s'avère parfois difficile et délicate ce qui explique la rareté des contributions scientifiques dans ce sens comparés aux nombreuses démonstrations théoriques ou études par simulation.

Les rares implémentations existantes dans la littérature utilisent un matériel homogène de radio logicielle (SDR, *Software Defined Radio* en anglais) celui qui offre les plus hautes fonctionnalités afin de simplifier au maximum l'implémentation de la couche physique. Ces exigences sont assez coûteuses étant souvent basées sur des SDRs de type USRP [249].

Pour cette raison, et pour donner plus de liberté aux chercheurs dans le choix du matériel utilisé, nous proposons, dans ce chapitre, la première implémentation de PNC basée

sur le modèle TWRC en utilisant des SDRs hétérogènes. Nous présentons, également, les défis posés par cette hétérogénéité ainsi que les solutions apportées pour les résoudre.

4.2 Motivation

Comme nous pouvons le constater dans l'état de l'art, les propositions d'implémentation des systèmes PNC utilisant les scénarios TWRC [159, 215, 217, 218, 219, 216, 220, 221, 222] sont rares par rapport aux différentes propositions basées sur l'analyse mathématique ou l'évaluation par simulation (par exemple, tous les travaux présentés dans la section 2.5.1, sauf les implémentations réelles présentées dans la sous-section G).

D'après nos recherches dans ce domaine, cette rareté dans l'implémentation de la PNC en utilisant la TWRC est due aux raisons suivantes :

- Le coût élevé des SDRs pour les chercheurs. Les prix de certains SDRs disponibles sont présentés dans le tableau 4.1. Sachant que les prix évoqués dans ce tableau sont standards et peuvent facilement devenir exorbitants en fonction des spécifications offertes par la SDR.

TABEAU 4.1 – Prix des différents SDRs

Nom de la SDR	Prix	Site web
USRP B210	1811.00 USD	https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit
Adalm-Pluto	506.39 USD	https://www.passion-radio.fr/satellite-qo-100/adalm-kit-100-948.html
HackRF One	389.95 USD	https://www.sparkfun.com/products/13001
RTL XYNC	4500 USD	https://www.rtl-sdr.com/xync-a-massive-mimo-sdr-with-up-to-32x32-tx-rx-channels/
BLADE RF 2.0	658.44 USD	https://lab401.com/fr/products/bladerf-sdr-2-micro-xa4
LimeSDR mini	272.91 USD	https://www.passion-radio.com/sdr-transceivers/limesdr-mini-667.html

- Certains SDRs, comme HackRF [250] et RTL [251], n'ont qu'une seule antenne pour émettre ou recevoir. Elles peuvent être utilisées uniquement comme émetteurs tout le temps ou comme récepteurs tout le temps. De ce fait, elles ne sont pas prises en charge par la plate-forme GNU Radio [214] pour être utilisées en mode « semi-duplex » référé aussi sous le nom "boucle" (*loopback* en anglais) c'est à dire émettre dans un intervalle de temps et recevoir dans un autre.
- Lorsque nous utilisons des SDRs hétérogènes (par exemple USRP et HackRF) et donc des configurations et un calibrage différent, il y a toujours des décalages qui sont introduits et qui affectent ensuite les valeurs des entrées et des sorties obtenues des SDRs. Par conséquent, la détermination des valeurs optimales d'entrée et de sortie des SDRs qui mènent à une transmission et une réception réussies constitue un défi puisque chaque SDR utilise un pilote différent avec des opérations de traitement du signal, des horloges et des délais différents.

TABLEAU 4.2 – Plateformes utilisées dans l’état de l’art.

Travail	Plateforme logicielle	Plateforme matérielle	Antennes dans chaque SDR	Problème de Loop-back
[217]	GNU Radio	USRP	Multiple	Non
[215]	GNU Radio	USRP	Multiple	Non
[216]	GNU Radio	USRP	Multiple	Non
[218]	GNU Radio	USRP	Un seul	Non
[219]	GNU Radio	USRP	Un seul	Non
[220]	GNU Radio	USRP	Multiple	Non
[221]	GNU Radio	BladeRF	Multiple	Non
[222]	GNU Radio	BladeRF	Multiple	Non

Comme le montre le tableau 4.2, toutes les implémentations existantes de la technique PNC utilisant le TWRC utilisent le même type et la même version de SDR pour les différents nœuds du système TWRC afin d’éviter les problèmes liés aux dispositifs SDRs hétérogènes. En outre, la plupart des SDRs utilisées prennent en charge des antennes multiples pour éviter le problème de *loopback*.

Ainsi, la proposition d’un nouveau prototype et d’une couche physique qui supporte la technique PNC et fonctionne avec tous les systèmes qui utilisent des SDRs, qu’elles soient hétérogènes ou homogènes, donnera plus d’opportunités aux chercheurs d’implémenter la technique PNC en utilisant des *testbeds* et du matériel réels plutôt que d’utiliser des simulateurs.

Dans notre solution, nous avons utilisé trois types de SDRs : USRP b210 [252], HackRF One [250], et Adalm-Pluto [253] comme matériel (voir la figure 4.11) et la plateforme GNU Radio [214] comme logiciel. Outre le problème de l’hétérogénéité du matériel, le HackRF est limité à une antenne et ne supporte pas le bouclage (*loopback*) sous la plateforme GNU Radio. Par conséquent, pour implémenter la technique PNC avec le modèle TWRC en utilisant conjointement ces trois types des SDRs, nous devons faire face, premièrement, à l’impact de la variété du matériel sur le réglage des entrées et des sorties des SDRs et, deuxièmement, au problème des SDRs mono-radio.

Dans ce qui suit, nous présentons le prototype de PNC proposé. Ensuite, nous présentons les solutions proposées pour implémenter la couche physique du système PNC afin de résoudre les problèmes sus-mentionnés.

4.3 Prototype de la couche physique PNC proposée

Dans cette section, l’objectif est la modélisation d’un système PNC-TWRC en temps réel basé sur des SDRs hétérogènes dans deux slots de temps au total pour démontrer l’échange de deux flux de données entre deux nœuds d’extrémité via un nœud relais.

L'opération de codage au niveau du nœud relais est le XOR, bit par bit.

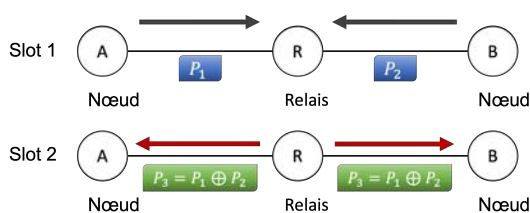


FIGURE 4.1 – Le système Physical-layer Network Coding (TWRC)

Comme le montre la figure 4.1 du modèle TWRC, la transmission PNC se déroule en deux phases : la première phase est la phase d'accès multiple (MAP, *Multiple Access Phase* en anglais) correspondant au premier slot de temps et durant laquelle les deux nœuds feuilles transmettent simultanément leurs données (P_1 et P_2 , respectivement) au relais. La deuxième phase est la phase de diffusion (BCP, *BroadCasting Phase* en anglais), au cours de laquelle le relais diffuse les données PNC codées ($P_1 \text{ XOR } P_2$) aux deux nœuds feuilles A et B . Étant donnée la contrainte "semi-duplex" adoptée dans notre implémentation, il convient de rappeler que cette BCP nécessite une couche MAC dédiée pour planifier et coordonner les transmissions entre nœuds feuilles et relais comme proposé dans le chapitre précédent. Par conséquent, dans ce chapitre, nous nous limitons à la conception de la première phase MAP avec tous les détails relatifs à la synchronisation, au traitement du signal et aux opérations de mappage PNC qui auront lieu.

Pour une transmission fiable, les signaux *Uplink* (de la première phase MAP) doivent être distingués au niveau du nœud relais, la synchronisation temporelle et fréquentielle doit être respectée et l'estimation de l'état du canal « *Channel State Information* » (CSI) doit être assurée avec précision. Pour cela, nous avons utilisé le multiplexage en fréquence (en utilisant l'OFDM), la partie préambule de la trame OFDM (la structure proposée par Schmidl-Cox [254]) et les signaux de balise (*beacon signals* en anglais).

La figure 4.2 présente le prototype des nœuds feuilles A et B , et la figure 4.3 illustre le prototype du nœud relais R , respectivement.

Comme décrit sur la figure 4.2, nous avons utilisé la technique OFDM pour les transmissions afin de contourner la nécessité d'une synchronisation parfaite requise par le système PNC.

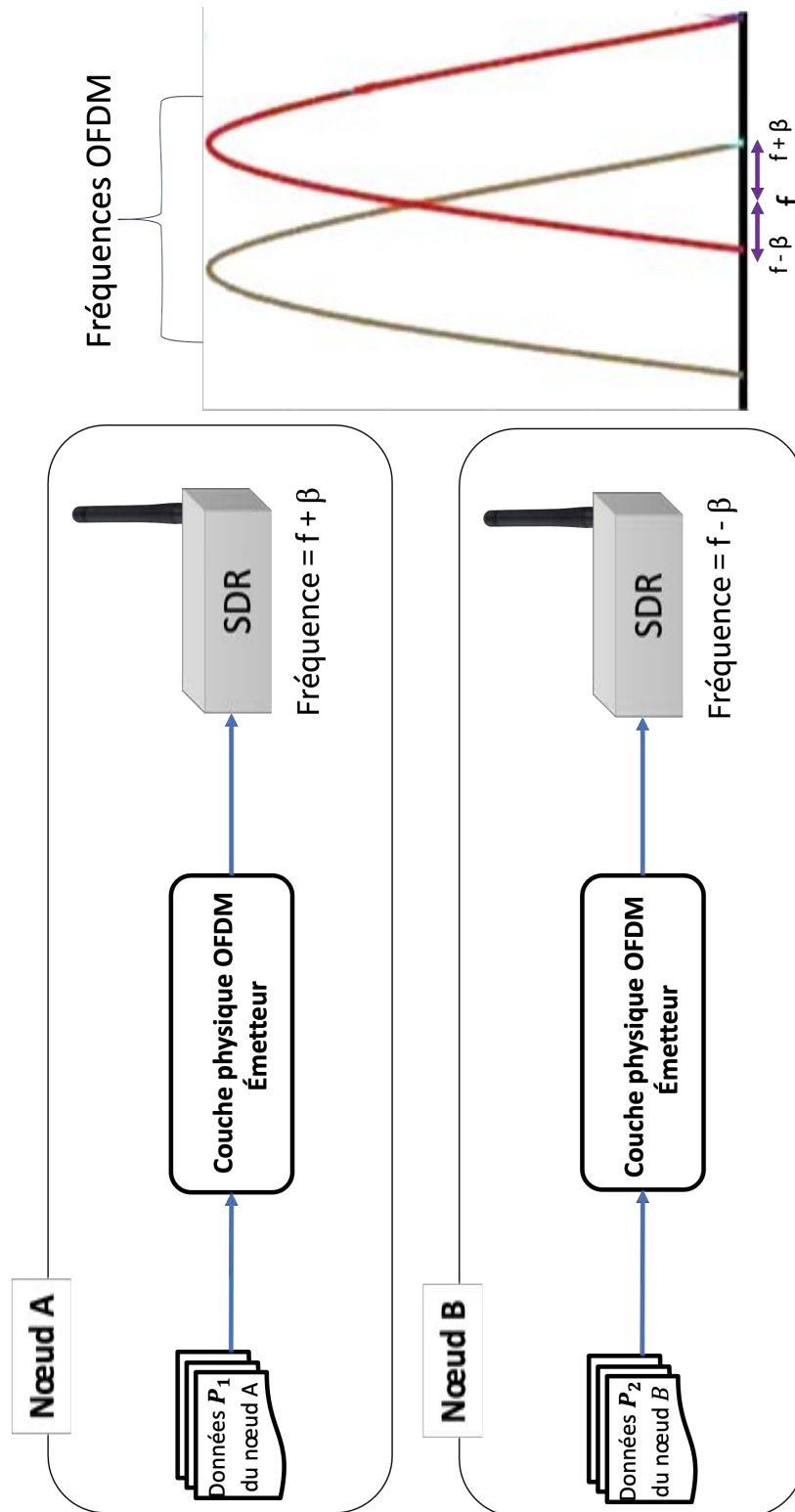


FIGURE 4.2 – Le prototype des deux nœuds feuilles A et B.

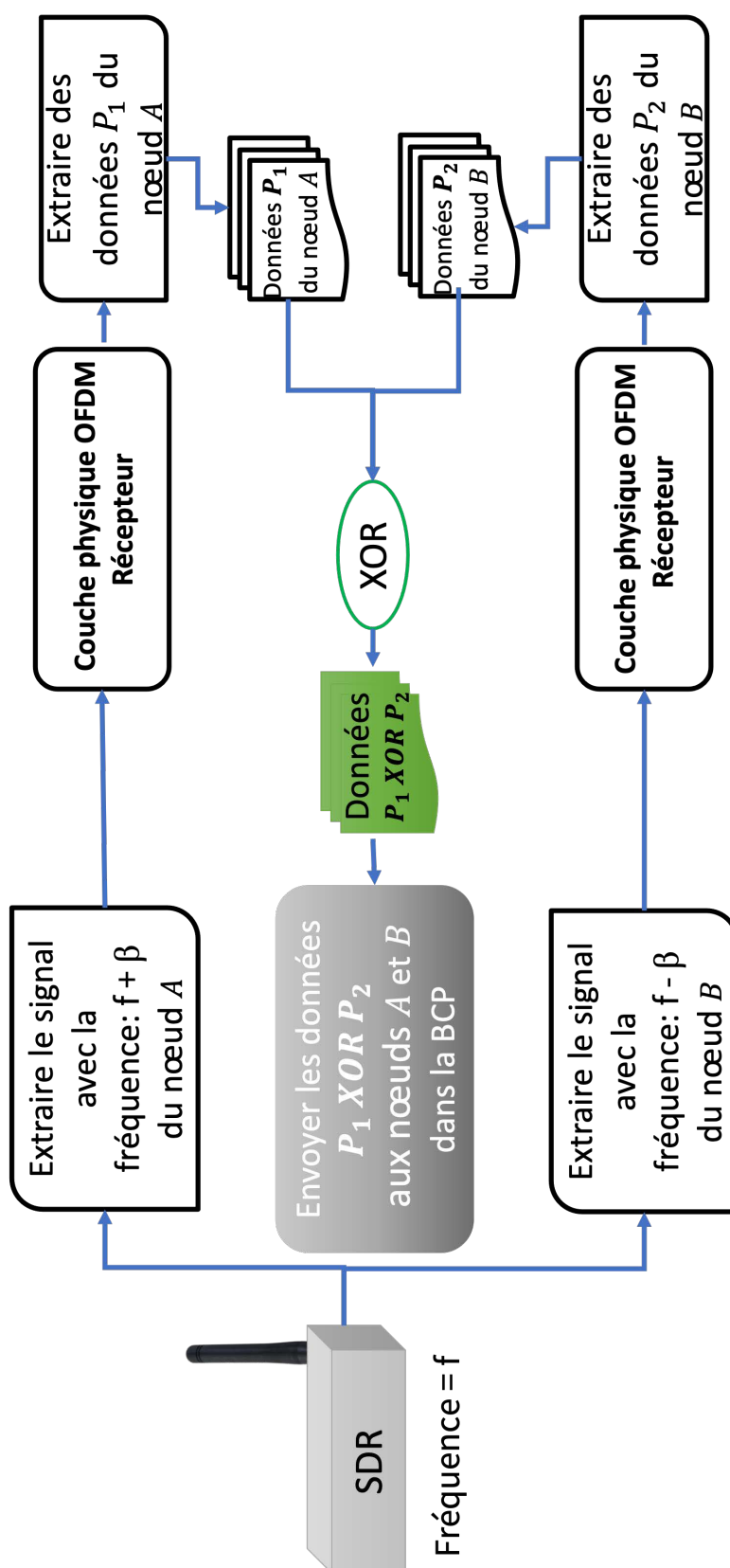


FIGURE 4.3 – Le prototype du noeud relais R .

Dans ce travail, nous adoptons des émetteur et récepteur OFDM comme proposés dans [255] où chaque nœud A et B envoie ses données dans une fréquences OFDM légèrement décalée par rapport à une fréquence centrale comme suit : le nœud relais R utilise la fréquence f pour recevoir les signaux superposés des transmissions PNC. Le nœud A envoie ses données au relais en utilisant une fréquence légèrement décalée vers la droite $(+\beta)$ par rapport à cette fréquence centrale f et le nœud B envoie également ses données au nœud relais R en utilisant une fréquence légèrement décalée vers la gauche $(-\beta)$ par rapport à la fréquence centrale f .

En utilisant une seule antenne et une fréquence centrale, comme le montre la figure 4.3, le relais récupère le signal et les données P_1 du nœud A en décalant le signal reçu sur le signal central f vers la droite d'une valeur de $+\beta$. Ce relais applique également le même processus pour récupérer le signal et les données P_2 du nœud B en décalant le signal reçu sur le signal central f vers la gauche d'une valeur de $-\beta$. Après avoir récupéré les données P_1 et P_2 des deux nœuds feuilles A et B , respectivement, le relais applique le OU eXclusif (XOR) sur les paquets reçus P_1 et P_2 , bit par bit, et diffuse les données PNC résultantes $P_1 XOR P_2$ aux deux nœuds feuilles A et B dans le deuxième slot de temps ou le BCP, comme le montre la figure 4.1 du modèle TWRC. La technique de relayage utilisée ici est appelée *Decode-And-Forward* (DAF).

4.4 Implémentation de la technique PNC sous le modèle TWRC en utilisant des SDRs hétérogènes

4.4.1 Étude préliminaire

Afin d'implémenter la technique PNC basée sur le modèle TWRC en utilisant des SDRs hétérogènes (USRP b210, HackRF One et Adalm-Pluto, comme le montre la figure 4.11), nous devons faire face à deux défis majeurs :

1. **Le loop-back sur chaque SDR** : La SDR devrait être capable de jouer un double rôle, émetteur et récepteur en semi-duplex, mais compte tenu de notre cas d'utilisation, le pilote Hackrf ne supporte pas cette option. La figure 4.4 montre un exemple d'erreur lors de l'utilisation du HackRF en boucle. Il faut donc utiliser une version modifiée du pilote du HackRF ou un autre pilote afin de résoudre ce problème.

```

gr-osmosdr 0.1.5 (0.1.5) gnuradio 3.7.11
built-in source types: file fcd rtl_tcp uhd hackrf rfspace soapy redpitaya
Using HackRF One with firmware 2018.01.1
gr-osmosdr 0.1.5 (0.1.5) gnuradio 3.7.11
built-in sink types: uhd hackrf soapy redpitaya file
Traceback (most recent call last):
  File "test_saopy.py", line 158, in <module>
    main()
  File "test_saopy.py", line 146, in main
    tb = top_block_cls()
  File "test_saopy.py", line 101, in __init__
    self.osmosdr_sink_0 = osmosdr.sink( args="numchan=" + str(1) + " " + "hackrf
=0000000000000000000014d463dc2f3f7be1" )
  File "/usr/local/lib/python2.7/dist-packages/osmosdr/osmosdr_swig.py", line 14
16, in make
    return osmosdr_swig.sink_make(*args, **kwargs)
RuntimeError: Failed to open HackRF device (-1000) Resource busy

```

FIGURE 4.4 – Erreur lors de l'utilisation du HackRF SDR en alternance, une fois comme émetteur et une fois comme récepteur.

2. **L'hétérogénéité des configurations intrinsèques** : L'hétérogénéité des SDRs ou des pilotes utilisés (trois types des SDRs) a conduit à de multiples configurations et, par conséquent, à des *outputs* différents (Fréquence, puissance d'émission, taux d'échantillonnage (*sample rate*), Bande passante, etc.). Par exemple, nous avons utilisé un HackRF pour envoyer un signal WIFI en mode OFDM (IEEE 802.11), et à la réception au même moment, trois SDRs différents : un HackRF, un USRP b210, et un ADALM-Pluto. Cette première expérience nous permettra de voir la différence entre les signaux reçus aux niveau des différents SDRs. Les paramètres utilisés pour l'émetteur et les récepteurs sont les mêmes, comme le montre le tableau 4.3.

TABLEAU 4.3 – Les paramètres utilisés pour l'exemple.

Paramètre	Valeur
Fréquence	2.48GHz
Taux d'échantillonnage (<i>Sample Rate</i>)	2M
Largeur de bande (<i>Bandwidth</i>)	2MHz
Gain	40dB pour TX, 40dB pour RX
Distance entre l'émetteur et le récepteur	20CM

Les figures 4.5, 4.6 et 4.7 montrent les résultats des signaux reçus par le HackRF, l'USRP b210 et l'ADALM-Pluto, respectivement.

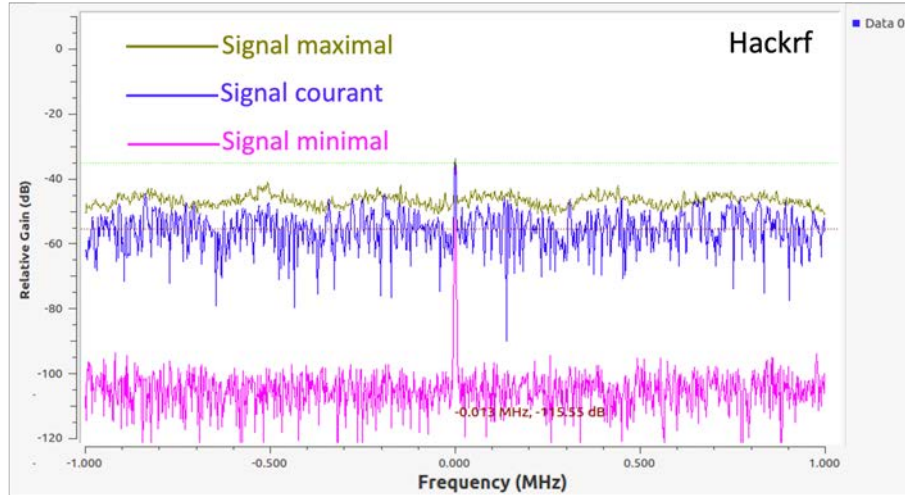


FIGURE 4.5 – Le signal reçu par le HackRF.

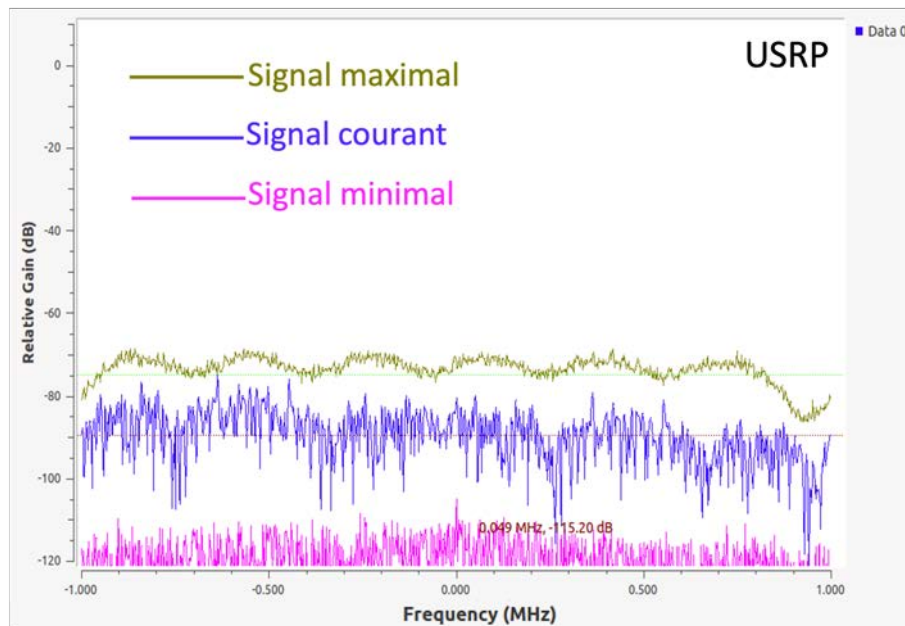


FIGURE 4.6 – Le signal reçu par l'USRP b210.

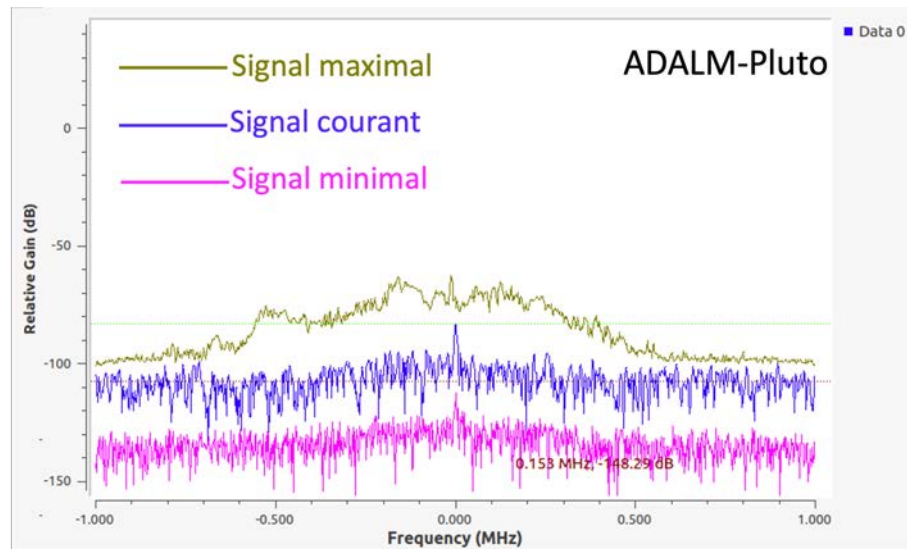


FIGURE 4.7 – Le signal reçu par l'ADALM-Pluto.

À partir de ces figures 4.5, 4.6 et 4.7, nous pouvons voir que les paramètres (bande passante, gain, etc.) du signal reçu ne sont pas les mêmes sur les trois récepteurs SDR. Le récepteur qui donne presque les mêmes paramètres que le signal envoyé est le HackRF puisqu'il a le même type que l'émetteur utilisé qui est aussi un HackRF comme le montre la figure 4.5. Les autres SDRs, USRP b210 et ADALM-Pluto, n'ont pas donné les mêmes paramètres que le signal envoyé, par exemple, le Gain du signal reçu par l'USRP b210 est $-70dB$ comme le montre la figure 4.6, alors que la puissance de transmission au niveau de l'émetteur est de $40dB$. De plus, sur la figure 4.7, nous pouvons voir que le signal reçu a une bande passante de presque $1MHz$ au lieu de $2MHz$ du signal envoyé. Ainsi, à partir de l'exemple présenté, nous pouvons déduire que l'hétérogénéité des SDRs affecte les caractéristiques et les paramètres du signal envoyé et reçu. Par conséquent, l'utilisation des SDRs hétérogènes pour implémenter un système PNC s'avère être un défi en soi puisque le nœud relais de la transmission PNC recevra deux signaux en même temps. Donc, pour obtenir une transmission PNC réussie, les paramètres et les caractéristiques du signal reçu et du signal envoyé doivent être aussi conformes que possible.

Ainsi, afin de rendre nos résultats de performance plus fiables, nous déployons des techniques qui doivent faire abstraction de cette hétérogénéité et homogénéiser le contexte matériel et logiciel utilisés.

Notre idée est la suivante : premièrement, nous utilisons les mêmes outils de traitement du signal pour unifier les résultats des opérations de traitement du signal et donner les mêmes sorties et résultats pour toutes les SDRs. Deuxièmement, nous proposons d'utiliser

un pilote virtuel unifié pour toutes les SDRs nous permettant de faire abstraction des pilotes originaux et de traiter les différents SDRs comme un seul type. Dans ce qui suit, nous présentons en détail nos solutions.

Tout d'abord, nous avons intégré deux couches transversales intermédiaires entre les SDRs et la plate-forme GNU Radio, comme le montre la figure 4.8. Les couches intégrées sont la **SoapySDR** [256] et la **SoapyUHD** [257].

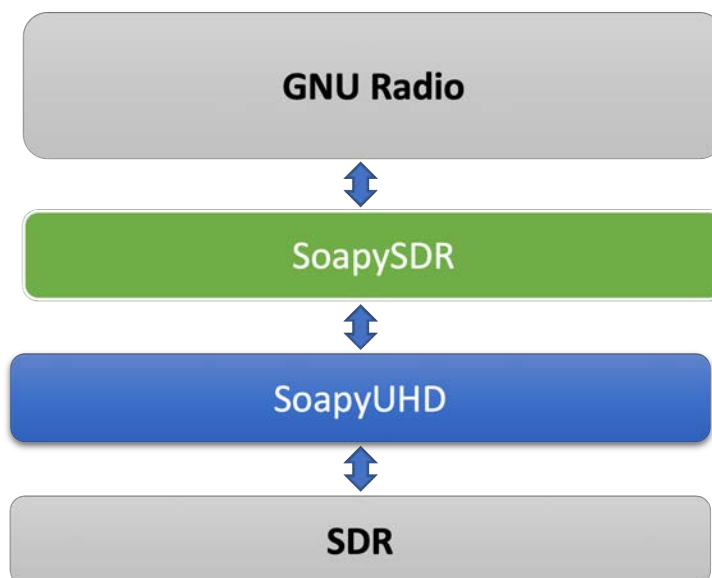


FIGURE 4.8 – Les couches intégrées entre les SDRs et la plateforme GNU Radio.

La raison de l'utilisation de chaque couche est la suivante :

La SoapySDR : SoapySDR est un outil qui fournit une couche d'abstraction entre le pilote de la SDR et le logiciel qui s'exécute dessus (la plateforme GNU Radio) [256]. Cette abstraction permet à la mise en œuvre d'être fonctionnelle sur un seul système SDR, notamment le système SOAPY, plutôt que d'être limitée à un type spécifique de système SDR. En utilisant SoapySDR, il est possible d'obtenir une plus grande flexibilité dans les systèmes SDR qui peuvent être utilisés avec une implémentation logicielle particulière (dans notre cas, l'implémentation de la technique PNC), sans sacrifier la cohérence des résultats obtenus parce qu'ils utilisent les mêmes outils de traitement du signal. Ceci est particulièrement important dans les situations où il est nécessaire de s'assurer que les mêmes résultats sont obtenus quel que soit le matériel SDR spécifique utilisé.

La SoapyUHD : SoapyUHD est une couche logicielle qui permet l'intégration et l'utilisation de divers types de SDR comme un seul type, en particulier le *USRP Hardware Driver* (UHD) [258]. L'UHD est un pilote largement utilisé pour les dispositifs USRP, qui permet la communication entre le logiciel (la plateforme GNU Radio) et les compo-

sants matériels de la SDR. En utilisant SoapyUHD, la plate-forme GNU Radio reconnaît toutes les SDRs comme des USRPs, indépendamment de leurs caractéristiques matérielles spécifiques, ce qui offre un haut degré d'interopérabilité et de flexibilité. Grâce à cette intégration, la plate-forme GNU Radio peut utiliser de manière transparente différents types de SDRs sans avoir à modifier ou à ajuster la configuration de chaque SDR pour obtenir les mêmes résultats. La figure 4.9 illustre le résultat de la recherche des SDRs effectuée après l'intégration de SoapyUHD, où toutes les SDRs sont représentés comme des SDRs de type UHD. Cela signifie que la plate-forme peut reconnaître et communiquer avec tous les SDRs connectés comme s'il s'agissait du même dispositif, notamment le *USRP Hardware Driver*. Ce niveau d'intégration simplifie l'utilisation de plusieurs types de SDRs et optimise le flux de travail global de l'application implémentée en utilisant la plate-forme GNU Radio.

```
@ubuntu:~/Desktop/Bureau/PNC$ uhd_find_devices
[INFO] [UHD] linux; GNU C++ version 5.4.0 20160609; Bo
-----
-- UHD Device 0
-----
Device Address:
  serial: 0000000000000000014d463dc2f3f7be1
  device: HackRF One
  driver: hackrf
  label: HackRF One #0 14d463dc2f3f7be1
  part_id: a000cb3c0045434a
  type: soapy
  version: 2018.01.1
-----
-- UHD Device 1
-----
Device Address:
  serial: 2671702456791545232
  device: PlutoSDR
  driver: plutosdr
  label: PlutoSDR #0 usb:3.14.5
  type: soapy
  uri: usb:3.14.5
-----
-- UHD Device 2
-----
Device Address:
  serial: 3169864
  name: MyB210
  product: B210
  type: b200
```

FIGURE 4.9 – Les SDRs disponibles pour la plateforme GNU Radio

Grâce aux couches Soapy, toutes les SDRs (USRP, HackRF et Adalm-Pluto) seront traitées et détectées comme des dispositifs UHD. Cela permet de générer des configurations uniformes pour les différents types de SDR utilisés, ce qui résout le problème de l'hétérogénéité des SDRs. De plus, cette UHD offre une radio virtuelle (UHD) capable de jouer un double rôle (émission ou réception) pour les SDRs qui ne supportent pas la fonction *loop-back* (SDRs utilisant une seule antenne comme HackRF), ce qui résout le problème du *loop-back*.

4.4.2 Mise en place du *testbed*

Dans notre implémentation, nous avons utilisé UBUNTU 16.04 comme système d'exploitation et GNU Radio 3.7.11 comme plate-forme logicielle. GNU Radio 3.7.11 est la version de la plateforme GNU Radio la plus supportée et la mieux documentée et que UBUNTU 16.04 est la version la plus recommandée pour la version GNU Radio 3.7.11.

GNU Radio est une boîte à outils logicielle polyvalente et open-source qui permet de concevoir, d'implémenter et d'exécuter des SDRs et des systèmes de traitement du signal. C'est un outil puissant pour les chercheurs, les développeurs et les ingénieurs qui cherchent à créer des applications radio en utilisant une large gamme de matériel SDR. La plate-forme est construite sur une architecture modulaire, qui permet aux utilisateurs de créer des blocs de traitement du signal personnalisés et de les connecter facilement pour former des systèmes radio complexes. Tout ceci peut être réalisé par une interface graphique et un ensemble d'outils permettant un assemblage graphique de tous les blocs et une exécution fiable des expérimentations ou simulations souhaitées, comme illustré dans la figure 4.10. Le diagramme de flux de GNU Radio est une séquence de blocs. Chaque bloc représente une opération de traitement du signal ou une tâche SDR.

En outre, GNU Radio fournit une vaste gamme d'algorithmes de traitement du signal, y compris le traitement du signal numérique, les schémas de modulation et les implémentations de protocole, ce qui en fait un outil idéal pour développer diverses applications de communication sans fil. En tant que boîte à outils gratuite et ouverte, GNU Radio est accessible à un large éventail d'utilisateurs, des amateurs aux professionnels, qui peuvent profiter de sa flexibilité, de son adaptabilité et de son développement communautaire.

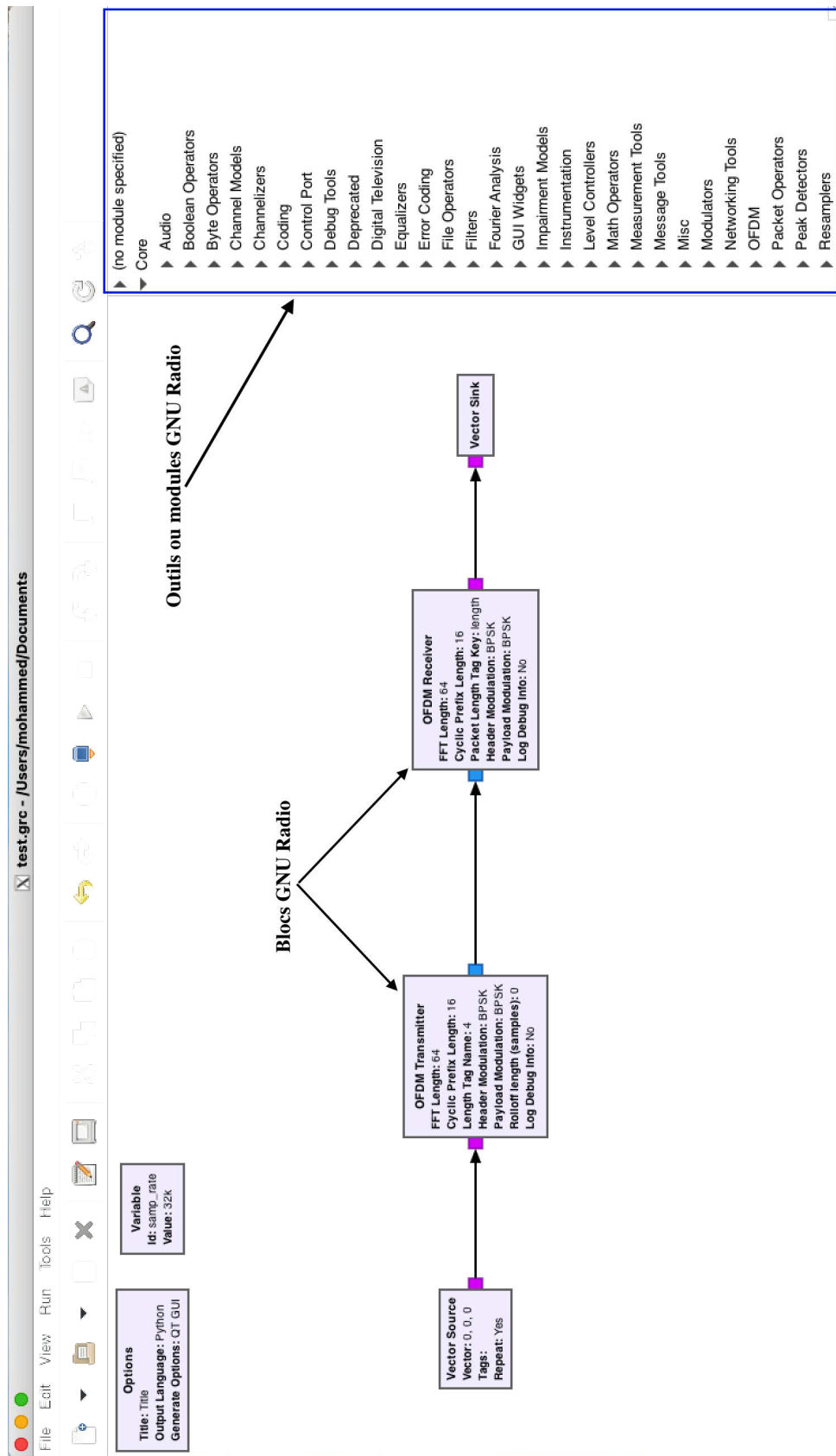


FIGURE 4.10 – Interface de GNU Radio

Pour le matériel, nous avons utilisé le HackRF One pour le nœud feuille *A*, l'Adalm-Pluto pour le nœud feuille *B* et l'USRP b210 pour le nœud relais *R* comme le montre la figure 4.11, pour créer un *testbed* de SDR hétérogène.

Pour assurer la reproductibilité de notre travail, nous avons rendu les codes sources et les résultats de l'implémentation proposée accessibles au public sur [259]. Les lecteurs intéressés peuvent accéder à cette ressource pour examiner les détails de l'implémentation proposée, y compris les configurations logicielles et matérielles spécifiques utilisées, ainsi que les résultats obtenus lors de nos expériences.

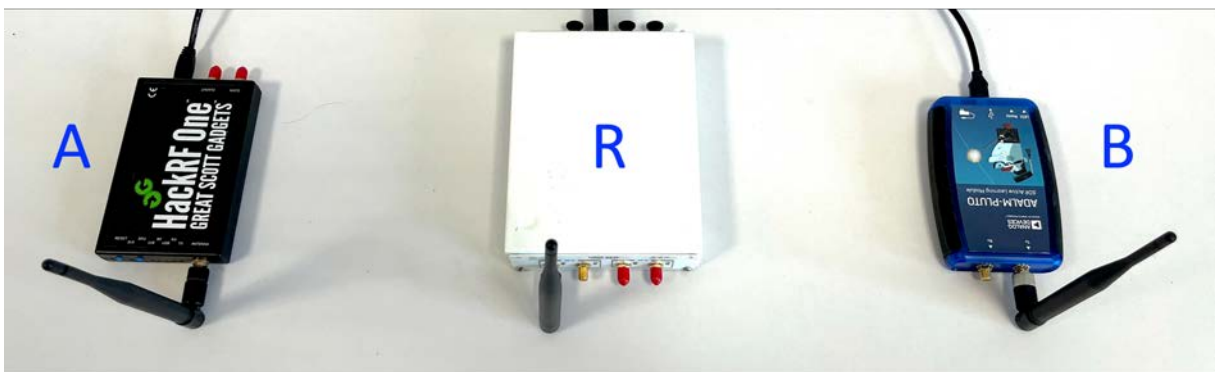


FIGURE 4.11 – Le *testbed* utilisé.

Les figures 4.12 et 4.13 montrent le graphe de flux GNU Radio des nœuds *A* et *B*, respectivement, et la figure 4.14 montre le graphe de flux GNU Radio du nœud relais *R*.

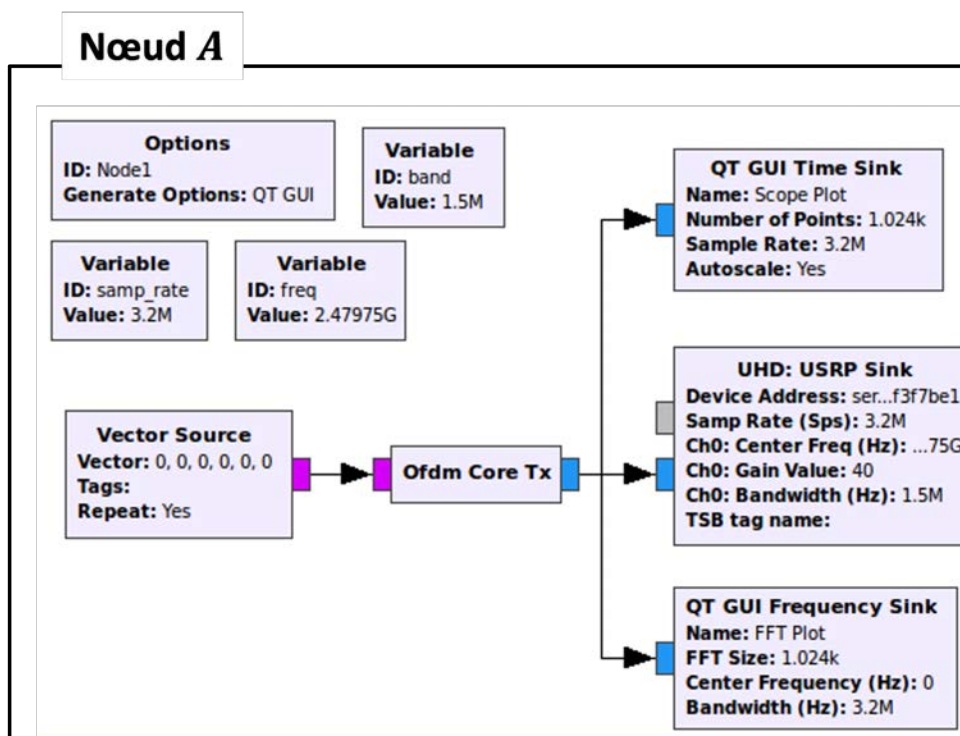


FIGURE 4.12 – Les blocs GNU Radio du nœud A.

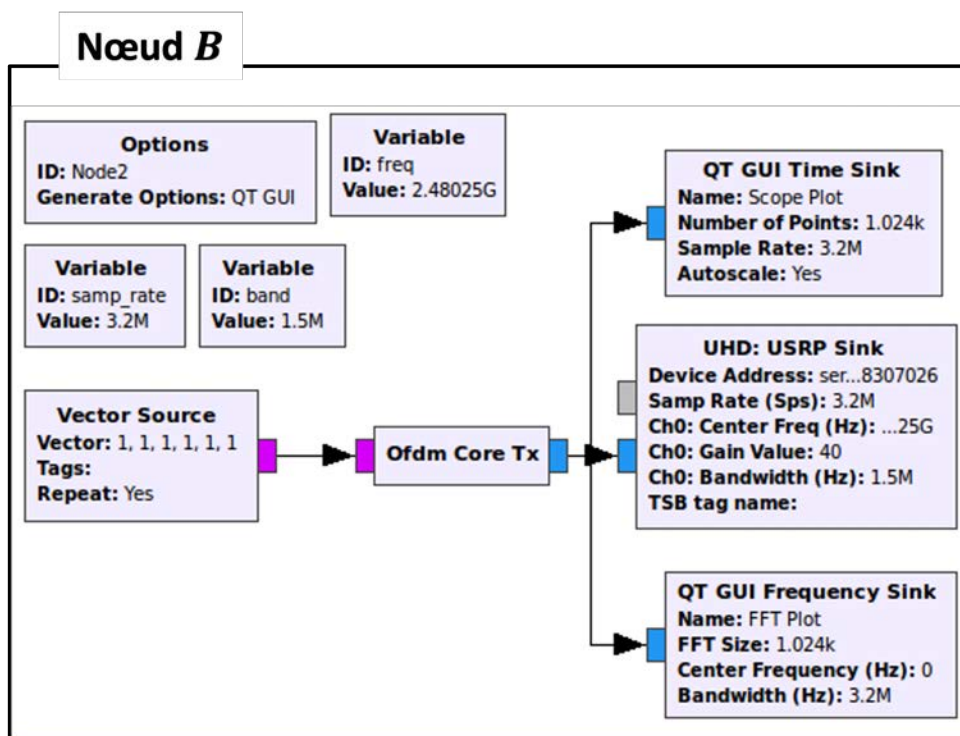


FIGURE 4.13 – Les blocs GNU Radio du nœud B.

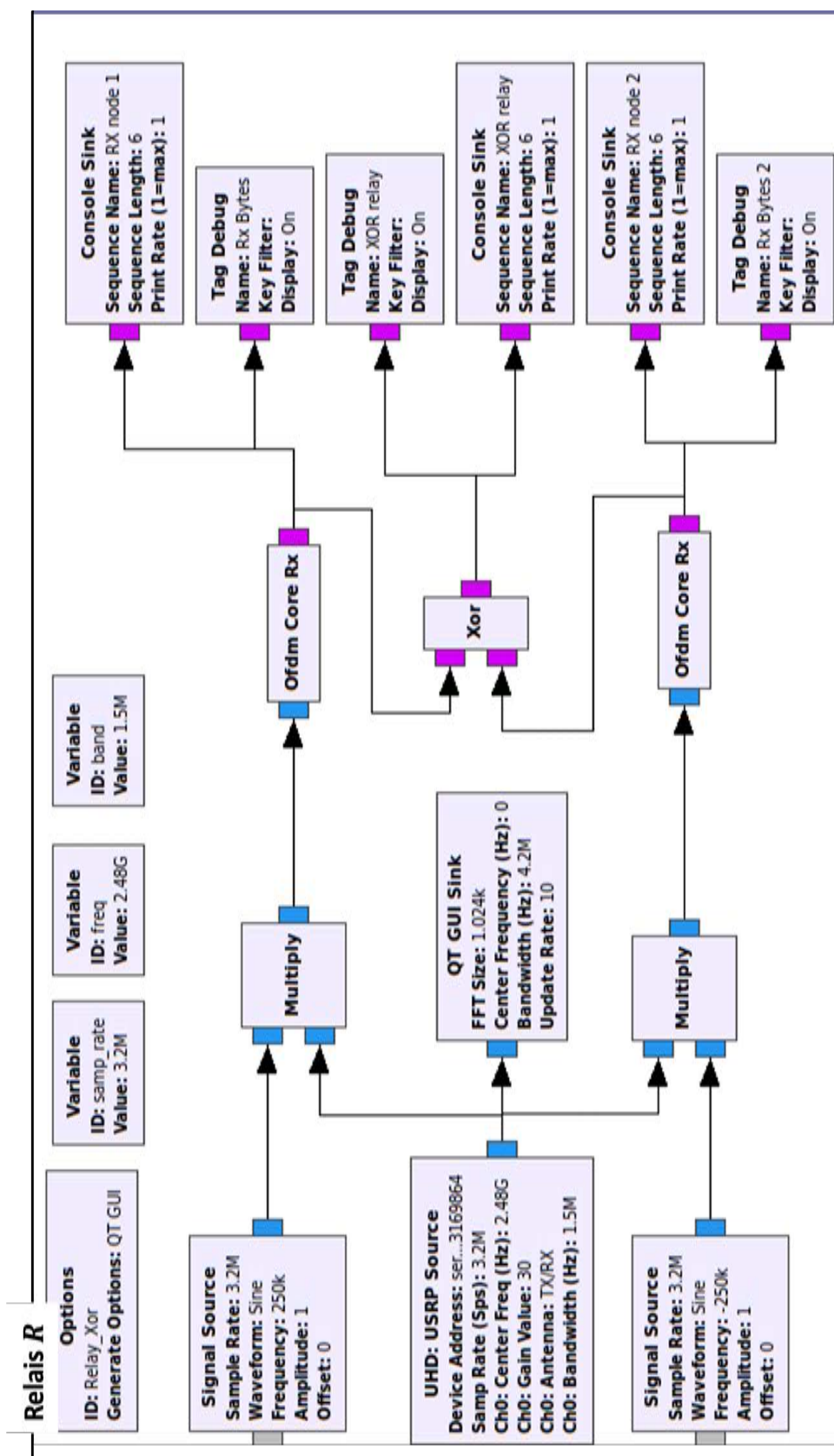


FIGURE 4.14 – Les blocs GNU Radio du relais R.

Comme nous pouvons le constater, les diagrammes de flux de la GNU Radio correspondent parfaitement aux prototypes présentés précédemment par les figures 4.2 et 4.3, pour les nœuds feuilles et le nœud relais, respectivement. Le bloc *Vector Source* représente les données sources ($P_1 = \text{séquence}(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0)$ ou $P_2 = \text{séquence}(0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0)$). Les séquences P_1 et P_2 sont choisies de manière à tester le XOR des quatre combinaisons de deux bits 00, 01, 10, et 11. *Ofdm Core TX* est l'émetteur OFDM, et le *UHD:USRP Sink* est le bloc connecté avec les nœuds feuilles *A* ou *B*. Les autres blocs utilisés pour la visualisation et l'affichage des résultats.

Pour le diagramme de flux du relais illustré par la Figure 4.14, *UHD:USRP Source* est le bloc connecté au noeud relais *R*, les blocs *Multiply* sont utilisés pour décaler et extraire les signaux des noeuds *A* et *B*, *Ofdm Core RX* est le récepteur OFDM et le bloc *XOR* est le mappeur PNC qui code les paquets P_1 et P_2 en paquet de PNC $P_1 \text{ XOR } P_2$.

Les blocs *Ofdm Core TX* et *Ofdm Core RX* sont appelés *Hier blocks* (blocs hiérarchiques), ce qui signifie qu'ils sont construits par un ensemble de blocs GNU Radio imbriqués de façon hiérarchique. Les figures 4.15 et 4.16 décrivent les diagrammes de flux des blocs *Ofdm Core TX* et *Ofdm Core RX*, respectivement. Pour plus de détails sur l'*Ofdm Core TX* et l'*Ofdm Core RX*, le lecteur peut se référer au travail [255].

Le tableau 4.4 résume les paramètres utilisés pour les SDRs dans cette implémentation.

TABLEAU 4.4 – Les paramètres utilisés pour implémenter la couche physique PNC.

Paramètre	Valeur
Fréquence f	2.48GHz
Valeur de décalage (<i>Shift value</i>) β	250KHz
Taux d'échantillonnage (<i>Sample Rate</i>)	3.2M
Largeur de bande (<i>Bandwidth</i>)	1.5MHz
Gain	40dB pour TX, 30dB pour RX
Distance entre deux SDRs	50CM

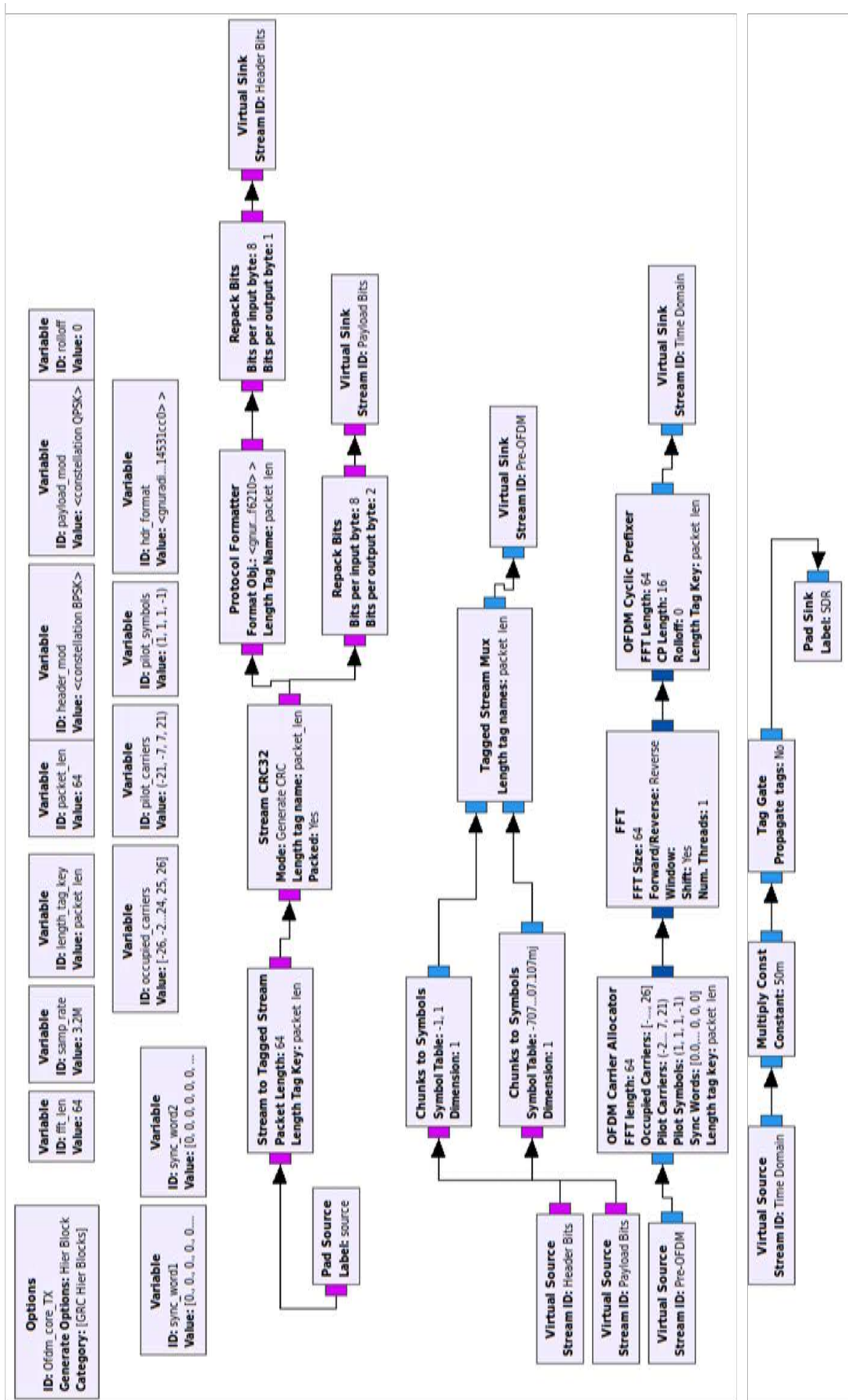


FIGURE 4.15 – Les blocs GNU Radio du bloc hiérarchique Ofdm Core TX.

4.5 Résultats préliminaires

Dans cette section, nous examinerons les résultats préliminaires de l'implémentation proposée de la couche physique proposée pour la technique PNC en utilisant le modèle TWRC, qui a été réalisée en utilisant une combinaison de dispositifs SDR hétérogènes.

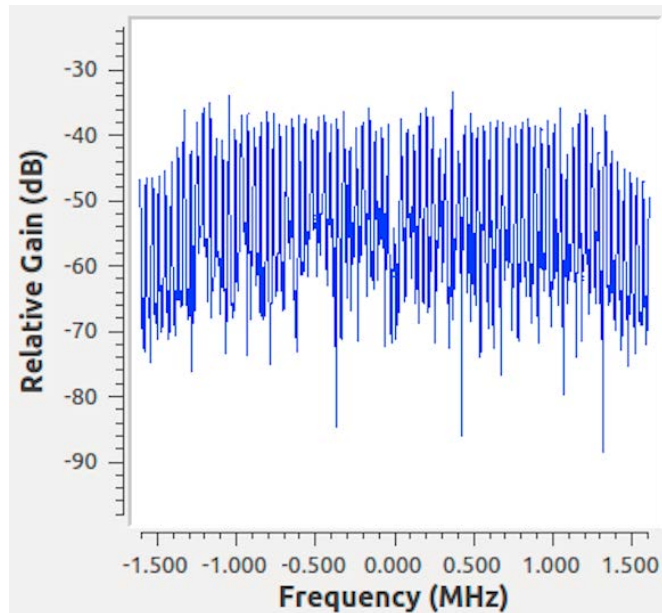


FIGURE 4.17 – Signal envoyé par le nœud A

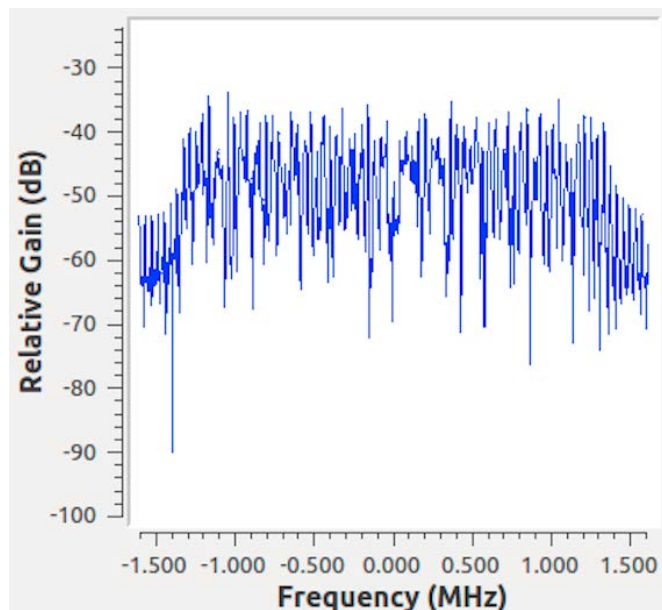


FIGURE 4.18 – Signal envoyé par le nœud B

Les figures 4.17 et 4.18 représentent les signaux envoyés par les nœuds feuilles A et B , respectivement, vers le nœud relais.

À partir des signaux résultants, on peut voir que les sorties (fréquence, bande passante, gain, etc.) correspondent presque parfaitement aux entrées, bien que les SDRs soient hétérogènes. Par exemple, sur la figure 4.17, le gain est d'environ $-40dB$, ce qui correspond au gain d'entrée, la bande passante est de $1,5MHz$ (de $0,000MHz$ à $1,500MHz$ ou de $0,000MHz$ à $-1,500MHz$) et la fréquence est parfaitement centralisée à $0,000MHz$, ce qui représente $f + \beta$ pour le nœud A et $f - \beta$ pour le nœud B .

Pour le nœud relais R , les figures 4.19 et 4.20 représentent, respectivement, les signaux reçus par le nœud relais à l'état de veille, où le relais ne reçoit pas de données provenant de A et B , et à l'état de réception, où le relais reçoit des données provenant de A et B simultanément.

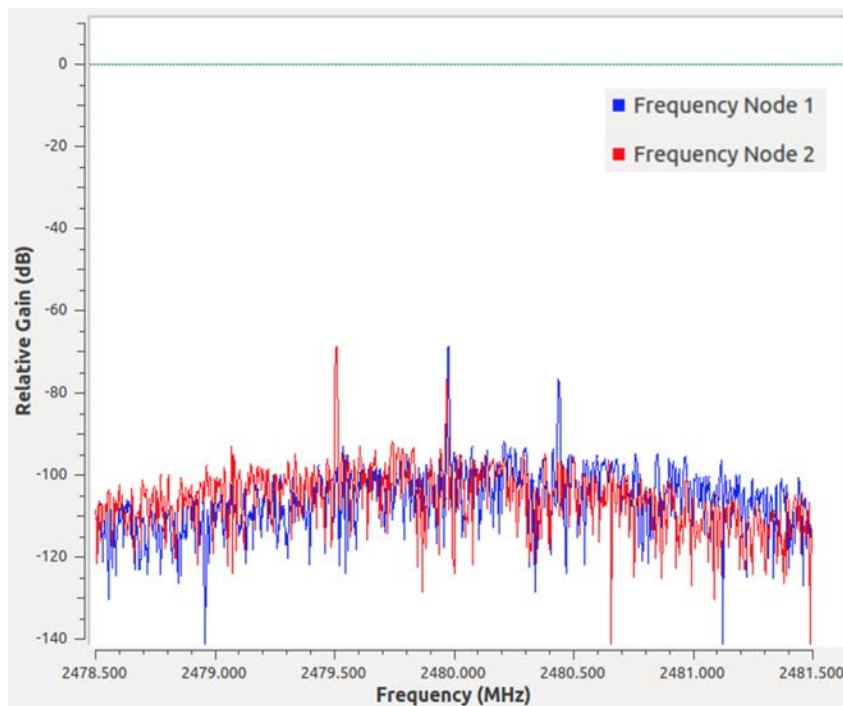


FIGURE 4.19 – Signal reçu par le relais en mode veille

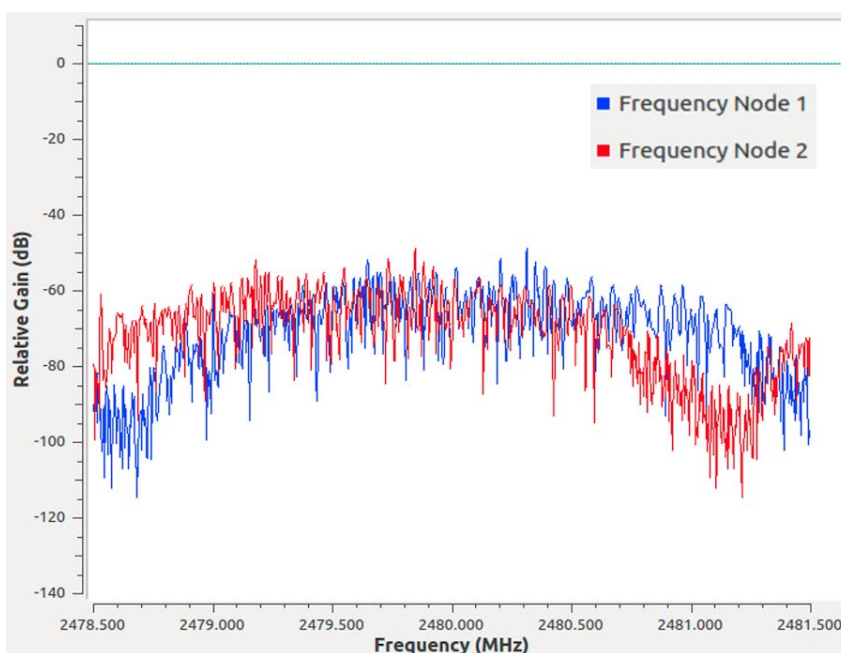


FIGURE 4.20 – Signal reçu par le relais en mode réception

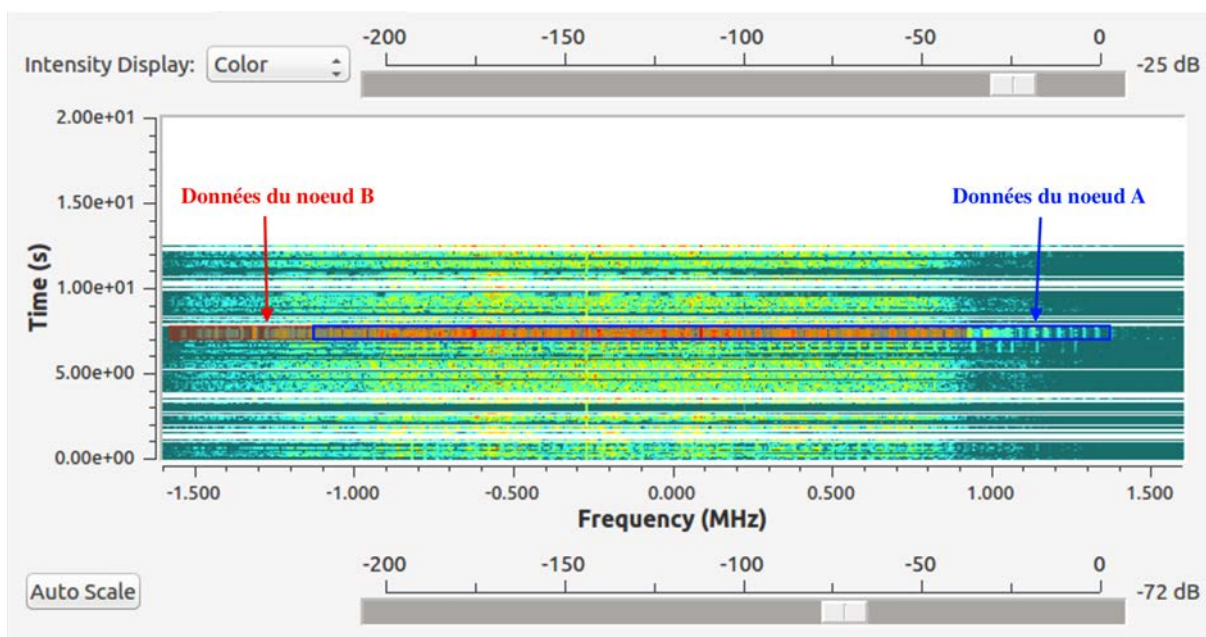


FIGURE 4.21 – Signal reçu par le relais en mode réception en utilisant la visualisation de type *watter fall*.

La figure 4.19 montre que les signaux reçus sont parfaitement centrés sur $f = 2480.000MHz$ (le pic au milieu), que ce soit pour le signal du noeud A (le bleu), ou le noeud B (le rouge). Cette figure montre également que les deux signaux des noeuds A et B sont parfaitement centrés et détectés (le pic à droite et à gauche pour les noeuds A et B, respectivement).

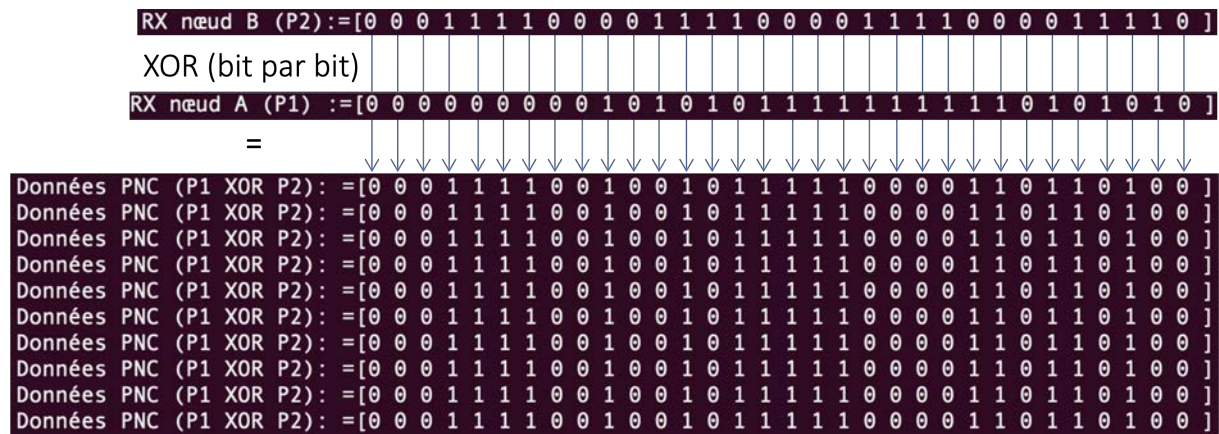


FIGURE 4.24 – Le message PNC mappé $P_1 XOR P_2$ des deux messages P_1 et P_2 .

4.6 Synthèse et discussion

Comme nous l'avons mentionné précédemment, les travaux dans la littérature ont utilisé le même type de SDRs (SDRs homogènes) pour implémenter la couche physique PNC afin d'éviter les inconvénients des SDRs hétérogènes. Par conséquent, comme le montre le tableau 4.2, le coût du *testbed* sera très élevé, puisque les SDRs utilisés doivent être homogènes et supporter la fonctionnalité de *loop-back*. Ces exigences ont rendu l'implémentation de la couche physique PNC rare dans l'état de l'art.

Afin de rendre l'implémentation et l'application de la technique PNC sur un *testbed* réel plus facile et disponible pour un plus grand nombre de chercheurs, dans ce chapitre nous avons proposé une nouvelle couche physique qui supporte la technique PNC pour les SDRs hétérogènes. La couche physique proposée résout les problèmes liés à l'hétérogénéité des SDRs, comme la fonctionnalité de *loop-back* et les différentes valeurs d'entrée et de sortie (Fréquence, puissance d'émission, taux d'échantillonnage, bande passante, gain, etc.) en raison de l'utilisation de différents pilotes et de différentes opérations de traitement du signal.

Grâce à nos expérimentations, nous avons pu obtenir des résultats prometteurs, démontrant qu'il est effectivement possible d'implémenter la technique PNC basée sur le modèle TWRC et utilisant des dispositifs matériels SDR hétérogènes. La couche physique proposée a permis une transmission et une réception fiables des signaux. Ces résultats représentent un premier pas prometteur vers le développement de systèmes de communication sans fil pratiques utilisant la technique PNC et basés sur les SDRs disponibles, qu'ils soient homogènes ou hétérogènes.

La couche physique proposée nous permettra d'implémenter la technique PNC sur un *testbed* réel. Cependant, comme nous adoptons le système TWRC dans notre travail, un protocole ou une couche MAC est nécessaire pour ordonnancer et orchestrer les transmissions des différents noeuds du réseau impliqués dans le scénario TWRC ou non.

Dans le chapitre 2, nous avons proposé un protocole MAC qui supporte la technique PNC appelée DSNCP. Ce protocole est centralisé et nécessite une topologie en étoile pour fonctionner (avec infrastructure). Ces exigences sont facilement réalisables dans un environnement de simulation, mais elles sont très difficiles à implémenter dans un environnement réel, en particulier lorsque nous utilisons la technique PNC dans des réseaux sans fil multi-sauts, où la topologie du réseau est inconnue et l'accès au canal est aléatoire. Dans ce cas, un protocole MAC aléatoire distribué est préférable.

Afin de présenter un système complet qui pourrait être implémenté dans un *testbed* réel, nous proposons un protocole MAC aléatoire distribué dans le chapitre suivant. Le protocole MAC proposé sera adopté pour supporter la couche physique PNC présentée dans ce chapitre et déployé dans un réseau sans fil multi-sauts à accès aléatoire.

4.7 Conclusion

Ce chapitre propose la première implémentation de la technique PNC sur la base du modèle TWRC, en utilisant des SDRs hétérogènes. Nous avons présenté les défis posés par les SDRs hétérogènes et les solutions pour les surmonter. Les résultats de l'implémentation prouvent la puissance des solutions proposées et la possibilité d'implémenter la technique PNC en utilisant des SDRs hétérogènes.

Dans le chapitre suivant, nous proposons et implémentons une couche MAC aléatoire distribuée au-dessus de la couche physique PNC présentée ici afin de créer un système complet qui adapte la technique PNC dans les réseaux sans fil multi-sauts à grande échelle.

DNCP : Protocole MAC distribué et adapté au PNC

5.1 Introduction

Afin d'utiliser et de bénéficier de la technique PNC, les opportunités de TWRC doivent être détectées et les transmissions PNC doivent être ordonnancées de manière synchronisée pour permettre de telles combinaisons. Pour ce faire et pour coordonner l'accès au canal, un protocole de contrôle d'accès adapté s'impose.

Dans la littérature, comme nous l'avons présenté dans la section 2.5.2, les protocoles MAC centralisés basés sur un accès partagé en temps et/ou en fréquence (TDMA/FDMA « Time/Frequency Division Multiple Access ») sont statiques et nécessitent une coordination centralisée, ce qui est théoriquement possible mais généralement difficile à implémenter dans des réseaux distribués, multi-sauts et déployés à grande échelle [231]. Par conséquent, les protocoles MAC, basés sur un accès aléatoire, ont été largement adoptés, principalement les protocoles MAC basés sur la technique « Carrier Sense Multiple Access (CSMA) ». Cependant, la conception de ces protocoles MAC, lorsqu'ils prennent en charge la technique PNC, est très complexe, car une synchronisation au niveau du symbole est nécessaire [236] [237] [152] [216].

L'objectif de ce chapitre est donc un protocole MAC distribué supportant la technique PNC et prenant en compte toutes les problématiques présentées précédemment. La solution proposée, appelée « Distributed Physical-layer Network Coding MAC Protocol (DNCP) », est destinée à être utilisée en pratique dans des réseaux sans fil distribués à

grande échelle. Elle a, pour cela, été testée et évaluée dans un large testbed réel.

Le protocole DNCP est basé sur la fonction de coordination distribuée (DCF « Distributed Coordination Function ») de la norme IEEE 802.11 [234] où les nœuds accèdent de manière aléatoire au canal. Le protocole MAC détecte l'opportunité d'effectuer une transmission PNC et propose un ordonnancement approprié des transmissions concernées qui garantit le meilleur *throughput*.

Dans ce qui suit, la section 5.2 présente les principaux verrous visés dans cette contribution. Ensuite, le protocole MAC (DNCP) proposé est présenté en détail dans la section 5.3. La section 5.4 présente l'implémentation et les résultats de performance du protocole proposé sur trois topologies différentes, en utilisant les radios logicielles (SDRs « Software Defined Radios ») comme matériel et la plateforme GNU Radio comme logiciel. Enfin, la section 5.5 conclut notre travail et présente les améliorations futures possibles.

5.2 Identification des problématiques de départ

Pour prendre en charge la technique PNC, et en se limitant aux protocoles MAC distribués existants dans la littérature, nous pouvons dégager les principales lacunes qui freinent l'intégration réelle de cette technique dans les réseaux sans fil multi-sauts. Nous pouvons les énumérer dans les points suivants :

- **La synchronisation des nœuds d'extrémité avec le nœud relais :** Dans le scénario TWRC, pendant la phase d'accès multiple (MAP « Multiple Access Phase ») de la transmission PNC, il est impératif que les deux nœuds émetteurs A et B (voir la figure 5.1) soient maintenus en parfaite synchronisation niveau symbole pour pouvoir garantir une réception simultanée au niveau du relais et ainsi un codage correcte bit par bit des signaux reçus. Ce processus de synchronisation (au niveau du symbole(bit)) des deux nœuds, A et B , avec le nœud relais R nécessite plusieurs échanges de messages (au moins deux) [238, 239, 153, 240, 216, 220, 241].

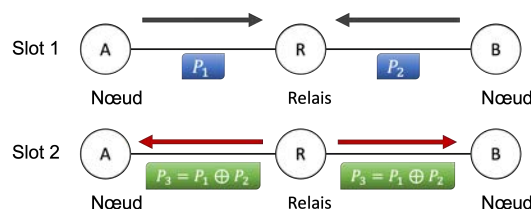


FIGURE 5.1 – Le système Physical-layer Network Coding (TWRC)

- **La connaissance complète en temps réel de la topologie et de l'état des**

voisins : Afin d'organiser et planifier les transmissions des nœuds, ceux-ci doivent connaître le type de transmission à venir, s'il s'agit d'une transmission ordinaire ou PNC. Par conséquent, les nœuds du réseau doivent avoir une connaissance en temps réel de l'état des files d'attente des autres nœuds (informations sur les données à envoyer), au moins dans la portée de deux sauts (les feuilles du scénario TWRC, A et B). Pour ce faire, les travaux de la littérature sont divisés en trois catégories : (i) des travaux qui se limitent à une seule topologie spécifique et connue au préalable [230] [232] [233], (ii) des travaux qui répondent aux besoins de connaissances en temps réel grâce à un échange régulier de messages de contrôle [153] [169] [15] et (iii) des travaux qui se basent sur des hypothèses qui simplifient la conception du système PNC, par exemple, la supposition que le nœud relais est déjà connu et a une connaissance en temps réel de l'état des files d'attente des nœuds voisins (nœuds feuilles) à un saut, ou que les nœuds connaissent la topologie du réseau dans un rayon d'au moins deux sauts (chaque nœud feuille (A et B) connaît en temps réel l'état de la file d'attente de l'autre nœud feuille) [14] [231].

- **L'effet des stations cachées** : En raison des hypothèses restrictives sur la topologie étudiée, les travaux existants n'ont pas pris en compte l'effet des stations cachées des trois nœuds du réseau TWRC (A , B , et R). Une fois déployées dans des réseaux large échelle, ces solutions ne donnent pas les résultats attendus et peuvent présenter des incohérences.

Nous présentons, ci-après, le protocole MAC distribué proposé DNCP qui supporte la technique PNC et résout les problèmes mentionnés précédemment afin de garantir sa dissémination dans les réseaux sans fil multi-sauts et large échelle.

5.3 Distributed Physical-layer Network Coding MAC Protocol (DNCP)

L'application des approches PNC dans les réseaux sans fil multi-sauts aléatoires à grande échelle et denses peut entraîner une certaine complexité de conception, rendant l'analyse des performances difficile. Par conséquent, la plupart des travaux existants se limitent à l'étude du scénario TWRC simple, font de nombreuses hypothèses restrictives et évaluent les solutions proposées de la manière la plus simple possible. À notre connaissance, il n'existe pas de travail complet de la communauté scientifique qui est déployé dans des réseaux sans fil multi-sauts aléatoires à grande échelle et denses. Ce chapitre présente, ainsi, le premier protocole MAC complet qui supporte la technique PNC et qui

est déployé et évalué sur un testbed réel en utilisant des SDRs pour des réseaux sans fil à grande échelle.

Le protocole proposé, baptisé « Distributed Physical-layer Network Coding MAC Protocol (DNCP) », est basé sur la DCF de la norme IEEE 802.11 [234].

Dans cette solution, nous abordons les principales considérations de conception décrites ci-après :

- **Détection des opportunités PNC** : Avant de transmettre un paquet, chaque nœud d'extrémité (A ou B) doit vérifier si ses données peuvent être codées avec un autre flux de données afin qu'il y ait une coordination entre ces nœuds émetteurs et que leurs transmissions puissent avoir lieu simultanément.
- **Coordination des transmissions simultanées** : Lors d'une transmission PNC, les nœuds sources (A et B) portant les paquets à encoder doivent connaître le temps de transmission approprié.
- **Compatibilité avec le mécanisme de relayage ordinaire de données** : Étant donné qu'il n'est pas toujours possible et avantageux d'effectuer une transmission PNC, le protocole proposé doit garantir la compatibilité avec les autres systèmes de relayage conventionnels afin que les transmissions de données ordinaires (qui ne font pas partie d'une opportunité PNC) se déroulent correctement.
- **Prise en compte de l'effet des stations cachées dans les réseaux à grande échelle** : Lors d'une transmission PNC, les nœuds voisins des nœuds impliqués dans l'opportunité PNC doivent également être informés afin d'éviter les *interférences destructives*.
- **Évaluation dans le monde réel** : Afin d'avoir une solution pratique, nous abordons des hypothèses efficaces pédagogiquement et essayons de respecter les exigences matérielles.

5.3.1 Modélisation du système

Dans cette section, nous discutons les principes de base du protocole DNCP proposé. Pour cela, nous modélisons la topologie de notre réseau comme présenté dans la figure 5.2, où deux nœuds A et B échangeront des données via un nœud relais R (réseau TWRC). Les trois autres nœuds, C , D et E , sont des stations cachées (les stations cachées du nœud R sont : D et E , les stations cachées du nœud A sont : C et E , et les stations cachées du nœud B sont : C et D).

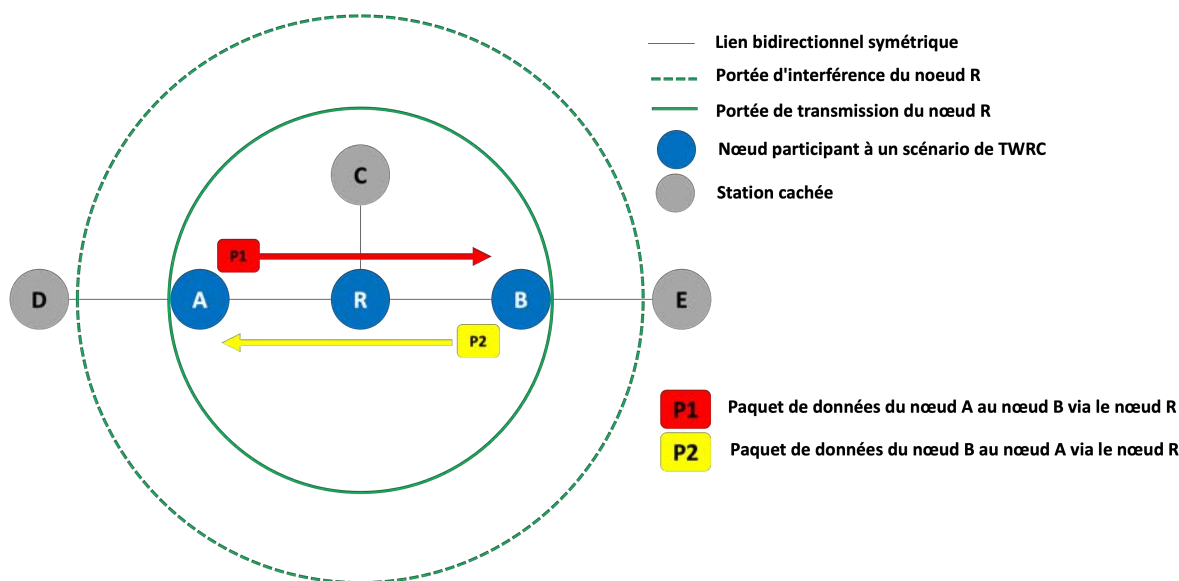


FIGURE 5.2 – La topologie considérée du réseau.

Nous supposons que tous les nœuds sont statiques et que les nœuds d'extrémité (A et B) sont suffisamment éloignés l'un de l'autre pour exiger un schéma de relais multi-sauts pour communiquer. Nous supposons également que les nœuds sont situés à la même distance les uns des autres et que tous les nœuds ont la même portée de transmission/communication et la même portée d'interférence/détection, comme illustré pour le nœud relais dans la figure 5.2.

Toutes les transmissions sont effectuées en mode *mono-canal*. La restriction *half-duplex* impose qu'un nœud ne puisse pas envoyer et recevoir des paquets simultanément. Notons également que les liens sont bidirectionnels, ce qui permet des opportunités de PNC. Lors de l'application de la technique PNC, les nœuds émetteurs transmettent simultanément leurs paquets, et nous limitons le nombre de paquets codés à deux, de sorte que chaque nœud impliqué dans le processus PNC code en XOR deux paquets appartenant à deux flux différents en un seul paquet codé.

Dans ce travail, nous supposons également un routage statique permettant aux nœuds de connaître les routes vers toutes les destinations possibles et les nœuds de saut suivants correspondants. Ce point sera ensuite évoqué en perspective de cette thèse.

En considérant cette modélisation du réseau, nous pouvons distinguer deux types de transmissions possibles : les *transmissions à un ou plusieurs sauts*, en fonction du nombre de sauts pour atteindre le nœud destination final. Pour les **transmissions à un saut**, le nœud suivant est le nœud de destination finale. En conséquence, il n'existe qu'un seul scénario, celui d'une transmission ordinaire à un saut. En revanche, il existe deux

scénarios possibles pour les **transmissions multi-sauts** : *une transmission PNC* ou *une transmission multi-sauts ordinaire*. En effet, la transmission PNC a lieu s'il existe une opportunité de PNC. Dans le cas contraire, la transmission ordinaire multi-sauts aura lieu. Les détails du scénario de chaque transmission seront présentés dans ce qui suit.

Pour les transmissions à un saut, le même processus *RTS/CTS* du DCF (norme IEEE 802.11) sera adopté.

Comme l'objectif du présent travail est de réaliser des transmissions PNC, nous nous concentrons uniquement sur les transmissions multi-sauts où au moins un nœud relais est nécessaire pour que l'échange de données entre une paire de nœuds soit réussi. Ainsi, la technique PNC sera appliquée s'il existe une opportunité de PNC (c'est-à-dire si deux nœuds sources échangent deux flux de données bidirectionnels via un nœud relais). Dans le cas contraire, une transmission ordinaire sans technique PNC aura lieu. Dans la suite de ce chapitre, nous étudions les deux cas.

5.3.2 Processus d'échange de paquets de la transmission PNC

Pour mieux comprendre la transmission PNC, nous nous référons au diagramme temporel illustré par la figure 5.3 à titre d'exemple. Dans ce scénario, le nœud A veut envoyer le paquet de données P_1 au nœud destination final B via le nœud relai R . Simultanément, le nœud B a un paquet de données P_2 pour le nœud A à travers le même relai. Par conséquent, un scénario TWRC existe entre les nœuds A , B et R qui agira en tant que nœud relais. Le DNCP a été proposé afin de profiter des possibilités du PNC. Pour résoudre les problèmes identifiés lors de l'analyse de l'état de l'art, comme indiqué précédemment, le protocole DNCP introduit des politiques nouvellement adoptées basées sur la DCF de la norme IEEE 802.11 (RTS/CTS) [234].

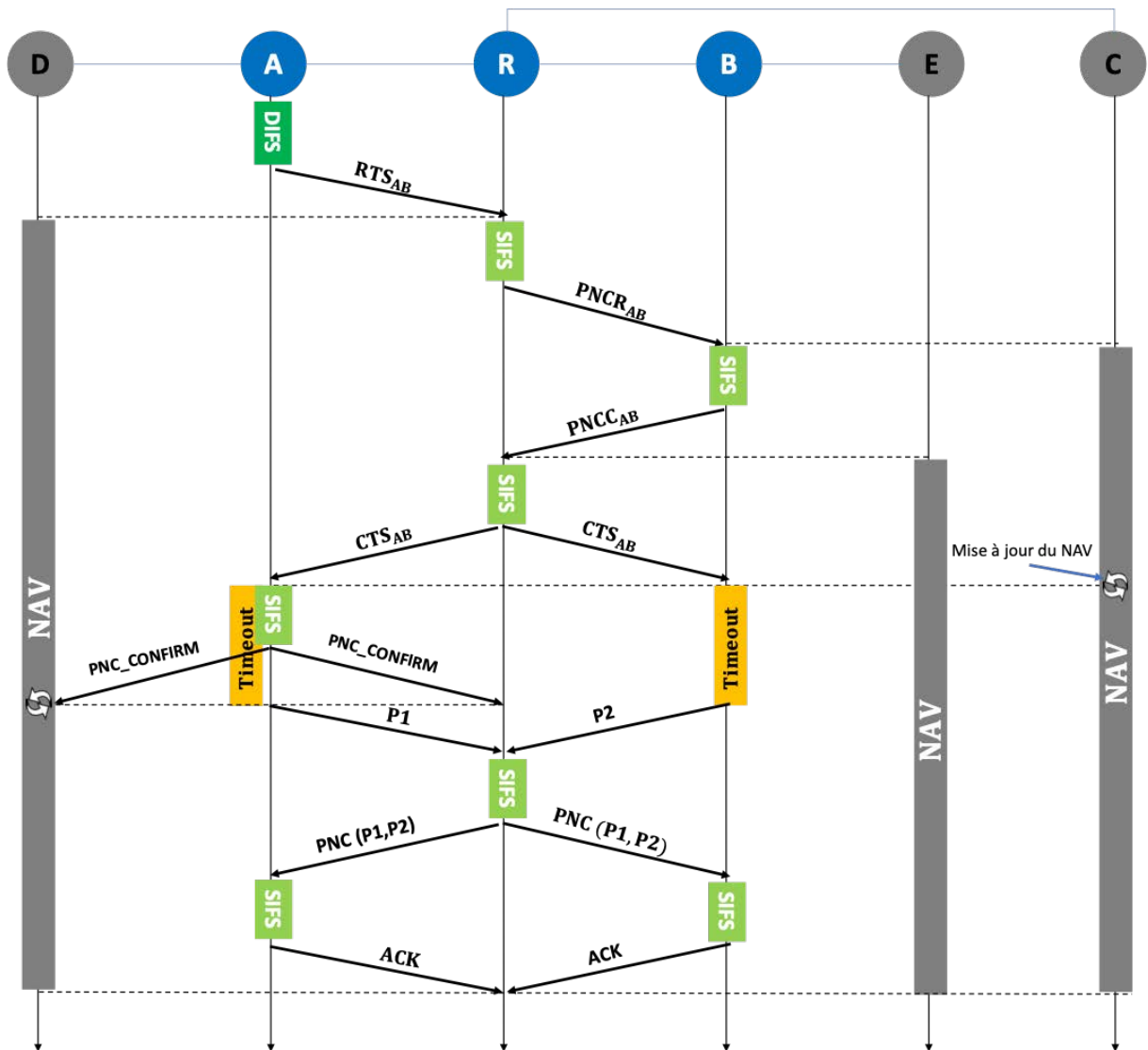


FIGURE 5.3 – Exemple de transmission PNC multi-sauts en utilisant la topologie considérée illustrée par la figure 5.2.

Le nœud *A* commence par écouter le canal durant un temps *DIFS* puis envoie une trame *Request To Send* (RTS_{AB}) au nœud *R*, qui transmet une trame *PNC Request* ($PNC_{R,AB}$) au nœud *B* de sorte à vérifier la possibilité d’avoir une opportunité de PNC entre ces deux nœuds. Cette trame permettra au nœud *C* voisin de *R* de prendre conscience de l’échange en cours et retarder son accès au canal en conséquence grâce au temporisateur *NAV* « Network Allocation Vector ».

Dans le cas où le nœud *B* a des données pour *A*, il répond par une trame *PNC Confirm* ($PNC_{C,AB}$) au nœud *R* pour annoncer qu’il est prêt à effectuer un échange de paquets PNC avec le nœud *A*. A ce moment, le nœud *R* diffuse alors une trame *Clear To Send*

(CTS_{AB}) annonçant le scénario TWRC détecté et le noeud E voisin de B déclenche son NAV pour retarder ses transmissions le temps que les échanges relatifs au scénario PNC en cours prennent lieu. En recevant cette trame CTS_{AB} , le noeud A diffuse une trame de confirmation finale ($PNC_{confirm}$), d'une part, pour réserver le canal d'une façon définitive, et d'autre part, pour permettre à toutes les stations voisines et cachées de mettre à jour leurs NAV respectifs ce qui évitera toute perturbation des transmissions PNC susceptibles d'avoir lieu. Le calcul de ces NAV sera détaillé plus tard.

Ensuite, une fois cette phase de coordination terminée, les deux noeuds A et B transmettent leurs paquets de données respectifs P_1 et P_2 simultanément au noeud relais R , qui mappe les deux paquets reçus en un paquet de données PNC ($PNC_{DATA_{P_1P_2}}$). Chaque noeud d'extrémité recevant le paquet codé le décode correctement et répond par une trame d'accusé de réception (ACK) au noeud relais et indiquant la fin de cette transmission PNC.

5.3.3 Transmission ordinaire multi-saut

En l'absence d'un trafic bidirectionnel entre les noeuds A et B , et donc l'absence d'une opportunité TWRC, un échange ordinaire prendra cours en appliquant le mécanisme de relayage conventionnel, comme le montre la figure 5.4. En effet, lorsque le relais R transmet à B la demande d'un échange PNC avec A ($PNC_{R_{AB}}$) et alors que le noeud B n'a pas de données à transmettre à A au même moment, il renvoie une trame *Negative PNC* (NEG_{PNC}) pour indiquer qu'il est prêt à recevoir le paquet de données de A mais ne peut pas collaborer dans un scénario TWRC.

Par conséquent, le noeud relais envoie une simple trame de contrôle CTS_A pour informer la source et la destination A et B , respectivement, qu'une transmission ordinaire multi-sauts est à venir. Ensuite, un schéma de relais unicast est employé pour délivrer le paquet de A à B en respectant le protocole MAC IEEE 802.11 conventionnel et la politique traditionnelle du NAV pour les stations cachées.

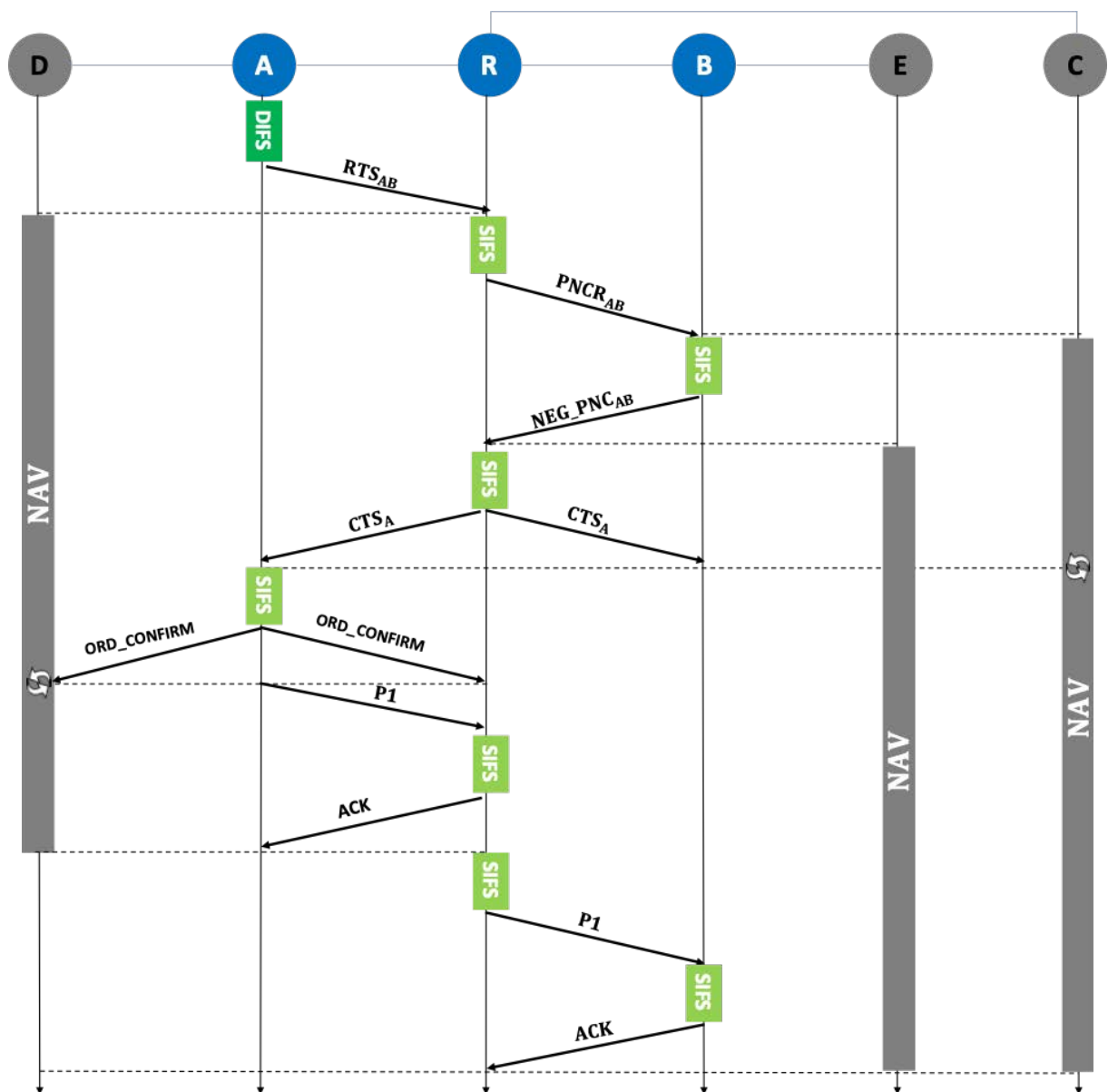


FIGURE 5.4 – Exemple d’une transmission ordinaire multi-sauts en utilisant la topologie considérée illustrée par la figure 5.2.

5.3.4 Paramétrage du NAV

Nous dédions cette section au calcul du NAV qui représente un paramètre clé dans la résolution du problème des noeuds cachés. Cette technique, appelée détection de porteuse virtuelle (VCS « Virtual Carrier Sensing ») [260], est utilisée par les stations cachées (noeuds D , E et C) autres que les noeuds TWRC (A , B et R) afin de se mettre en veille (ne pas transmettre) pendant les transmissions PNC ou ordinaires ce qui éviterait toute collision éventuelle.

Dans nos exemples illustrés par la figure 5.3 et la figure 5.4, pour les transmissions PNC et multi-sauts ordinaires, respectivement, il y a trois stations cachées, les nœuds D , E , et C . Les NAVs des deux nœuds D et C seront activés une première fois dès la réception des trames *request* pour une éventuelle opportunité PNC et seront mis à jour (les flèches en rond sur les figures) une fois le scénario PNC confirmé pour se conformer aux délais nécessaires au processus PNC en cours.

Le NAV du premier nœud D (voisin du nœud A) sera mis à jour après la réception du message $PNC_{CONFIRM}$ ou $ORD_{CONFIRM}$, qui indique si la transmission est une transmission PNC ou ordinaire, tandis que le deuxième nœud C met à jour le NAV après la réception du message CTS_{AB} ou CTS_A . Le nœud E met à jour son NAV après la réception du message $PNCC_{AB}$ ou NEG_{PNC} , qui indique déjà le type de la transmission à venir.

Chaque nœud calcule son NAV selon les informations tirées des trames de contrôle échangées pendant la phase de coordination comme la durée des trames de données qui est considérée la même et est connue par tous les nœuds. Ces calculs sont détaillés respectivement par les équations 5.1, 5.2 et 5.3 pour la transmission PNC multi-sauts et par les équations 5.4, 5.5 et 5.6 pour la transmission ordinaire multi-sauts :

$$\begin{aligned} T_{NAV_D_PNC} = & 6T_{SIFS} + T_{PNCR_{AB}} + T_{PNCC_{AB}} + T_{CTS_{AB}} + T_{PNC_{confirm}} + T_{P_1} \\ & + T_{PNC_{DATA_{P_1P_2}}} + T_{ACK} \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} T_{NAV_C_PNC} = & 5T_{SIFS} + T_{PNCC_{AB}} + T_{CTS_{AB}} + T_{PNC_{confirm}} + T_{P_1} + T_{PNC_{DATA_{P_1P_2}}} \\ & + T_{ACK} \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} T_{NAV_E_PNC} = & 4T_{SIFS} + T_{CTS_{AB}} + T_{PNC_{confirm}} + T_{P_2} + T_{PNC_{DATA_{P_1P_2}}} + T_{ACK} \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} T_{NAV_D_ORD} = & 7T_{SIFS} + T_{PNCR_{AB}} + T_{NEG_PNC_{AB}} + T_{CTS_A} + T_{ORD_{confirm}} + 2T_{P_1} \\ & + 2T_{ACK} \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned} T_{NAV_C_ORD} = & 6T_{SIFS} + T_{NEG_PNC_{AB}} + T_{CTS_A} + T_{ORD_{confirm}} + 2T_{P_1} + 2T_{ACK} \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} T_{NAV_E_ORD} = & 5T_{SIFS} + T_{CTS_A} + T_{ORD_{confirm}} + 2T_{P_1} + 2T_{ACK} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Sachant que, les temporisateurs *SIFS* sont pré-configurés de la même sorte chez tous les nœuds. Les délais des trames de contrôle sont obtenus en divisant la taille de ces

trames par la capacité du canal. Les tailles des différentes trames inclut l'entête MAC et la taille des données tout en respectant le format des entêtes décrits dans la section 5.3.6.

5.3.5 Traitement des exceptions

Nous avons présenté dans les sections 5.3.2 et 5.3.3 le processus de base de la transmission PNC et multi-sauts ordinaire, respectivement. Cette section présente les éventuels cas exceptionnels causés par la perte (ou la corruption) des trames de contrôle conçues pour la phase de coordination et introduit la façon dont le protocole DNCP traite ces cas afin de réduire leurs impacts sur le déroulement correct des échanges de données.

Nous abordons les cas les plus critiques, en fonction de la trame perdue, comme suit :

- ***PNCC_{AB} ou NEG_PNC_{AB}*** : La perte d'un message de confirmation (positive ou négative) pour une demande d'échange PNC signifie, généralement, que le nœud *B* n'a pas reçu le message *PNC_{RAB}* du nœud relais *R* (une seule tentative), ou qu'il n'est pas disponible pour répondre. Par conséquent, le nœud *R* envoie un message *CTS* ordinaire (le même que le processus RTS/CTS du DCF) pour autoriser une transmission ordinaire à un saut avec le nœud *A*.
- ***CTS ou CTS_{AB} ou CTS_A*** : Ce message est envoyé par le relais *R* afin de confirmer aux deux nœuds impliqués dans le scénario TWRC ainsi que leurs nœuds voisins, la réservation du canal pour cet échange entre eux (PNC ou ordinaire). Dans ce cas, il y a deux situations. La première se produit quand le nœud *A* veut envoyer un paquet à un saut, et qu'il n'a pas reçu le message *CTS*, le même que le processus RTS/CTS du DCF. Il annule donc la transmission et réessaie lors d'un autre cycle. Dans la deuxième situation, le nœud *A* veut envoyer un paquet multi-sauts, et il n'a pas reçu de message *CTS_{AB} ou CTS_A*. Dans ce cas, les nœuds *A*, *B* et *C* sont tous concernés. Les nœuds *A* et *B* annulent la transmission et réessaient lors d'un autre cycle. Cependant, le nœud *C* ne met pas à jour son *NAV* et considère que la transmission a échoué.
- ***PNC_{confirm} ou ORD_{confirm}*** : Ce message est généralement initié par *A* pour informer ses voisins de son échange avec *B*. EN l'absence de cette information, le nœud *D* ne mettra pas à jour son *NAV*, ce qui signifie que la transmission a échoué.
- **Données ordinaires** : Ici, il y a trois situations :
 1. La première est pendant la transmission d'un paquet à un saut. Dans ce cas, le nœud *R* ou tout nœud récepteur annule la transmission et considère que la transmission a échoué.

2. Le deuxième cas est celui de la transmission de paquets ordinaires multi-sauts. Ici, le nœud R ou B , considère que la transmission a échoué.
 3. Enfin, la troisième situation est une transmission de paquets PNC. Si le nœud relais ne reçoit qu'un seul paquet de données ordinaire d'un nœud feuille, il transmet ces données à l'autre nœud feuille de destination et considère qu'il s'agit d'une transmission ordinaire multi-sauts. En revanche, s'il n'a reçu aucune donnée ordinaire, il annule la transmission et considère qu'elle a échoué.
- ***PNC_DATA*** : Si l'un des nœuds d'extrémité A et B , ou les deux, n'ont pas reçu le paquet *PNC_DATA*, ils considèrent que la transmission a échoué et essaient à nouveau dans un autre cycle.
 - ***PNC_ACK*** : Si le nœud relais R ne reçoit qu'un seul *PNC_ACK* pour un nœud feuille, il envoie le *PNC_DATA* reçu dans un autre slot de temps à l'autre nœud feuille. En revanche, s'il n'a reçu aucun *PNC_ACK*, il retransmet le *PNC_DATA* reçu dans un autre cycle aux deux nœuds feuilles A et B .
 - ***ACK*** : Si un nœud n'a pas reçu de *ACK* ordinaire, il considère que la transmission a échoué et tente d'envoyer à nouveau ces données ordinaires lors d'un autre cycle.
 - **Paquets dupliqués** : Si un nœud reçoit un paquet de données PNC ou ordinaire dupliqué (par exemple, en utilisant les numéros de séquence des trames pour vérifier les duplications), il retransmet un *PNC_ACK* ou *ACK*, respectivement, et supprime le paquet de données reçu.

Pour résumer, l'organigramme présenté par la figure 5.5 et la figure 5.6, reprend tous les cas possibles (trames envoyées, reçues et perdues) du protocole DNCP, respectivement, pour le nœud source (le nœud qui va initialiser la transmission et envoyer des données, dans notre exemple, c'est le nœud A) et tout nœud récepteur : relais, destination ou station cachée (dans notre exemple, il s'agit des nœuds R , B , et C , D et E), respectivement).

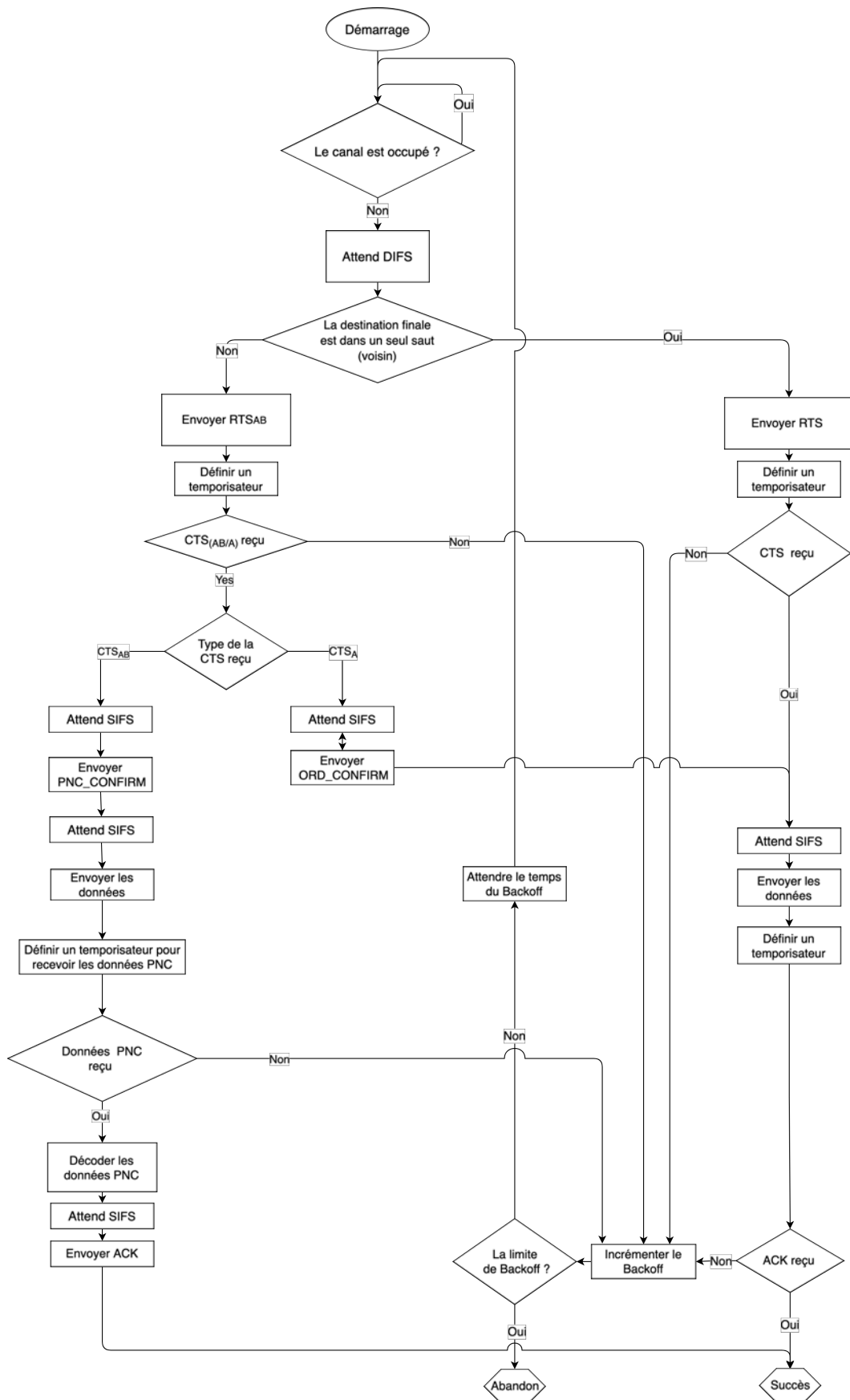


FIGURE 5.5 – Diagramme de flux du nœud source.

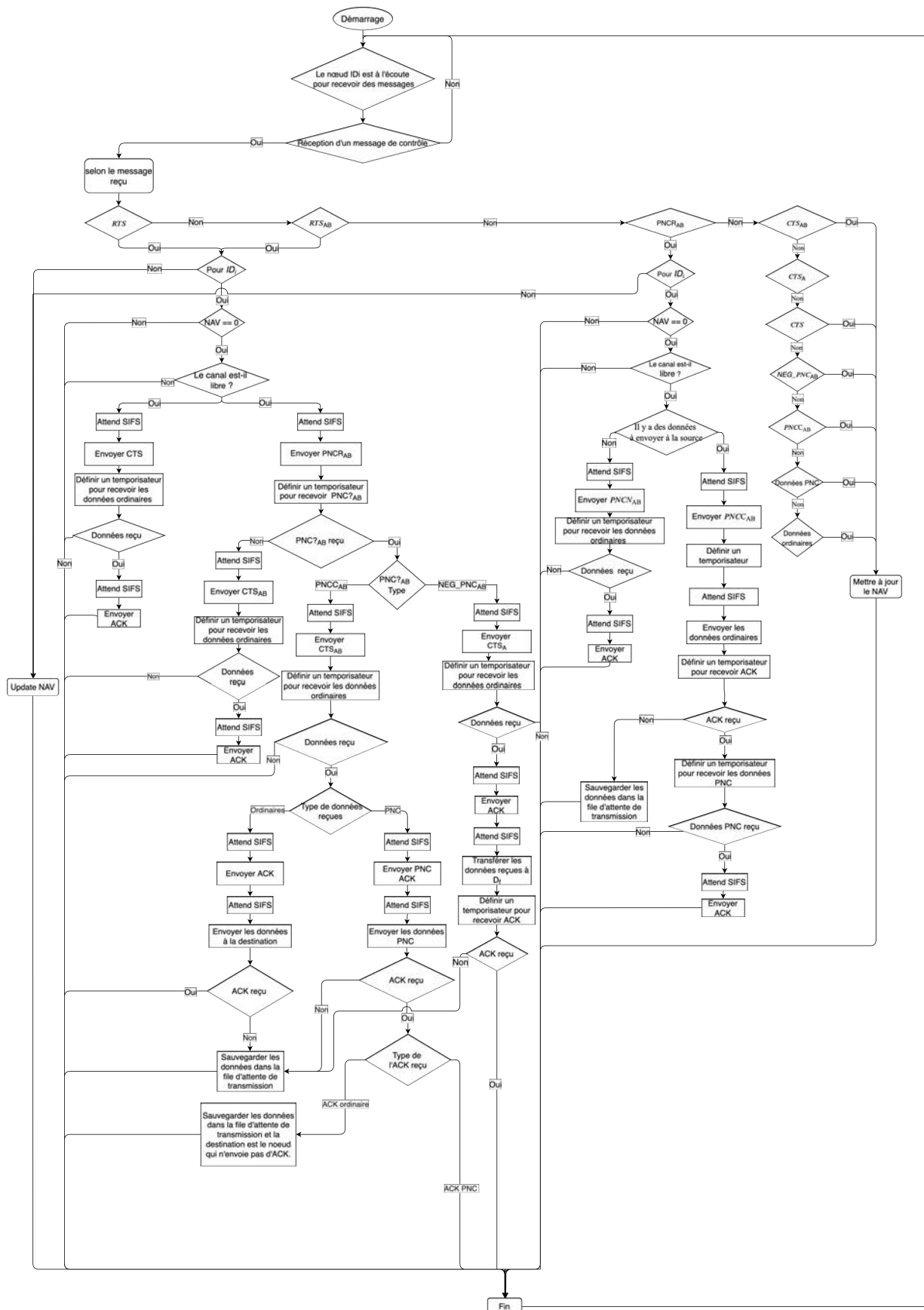


FIGURE 5.6 – Diagramme de flux du relais, de la destination et de la station cachée.

Pour récapituler, le protocole DNCP repose sur les politiques suivantes, qui le rendent fiable, pratique et adapté aux réseaux multi-sauts à grande échelle :

- **Une coordination fiable** : Les nœuds impliqués dans le scénario TWRC pourraient transporter leurs informations d’horloge dans les trames de contrôle (RTS, CTS, etc.) pour coordonner l’accès au canal entre eux et garantir une transmission simultanée des données lors de l’exécution de la technique PNC. La synchronisation initiale des horloges des nœuds peut être inspirée de [244], [238], [240], [239], [153], [220], [216], et [241].
- **Pas de connaissance complète en temps réel** : En utilisant le DNCP, toutes les informations nécessaires pour vérifier et maintenir une opportunité PNC sont soit locales soit extraites des trames de contrôle. En effet, le handshake initié par la source à travers les trames RTS et CTS permettent de détecter les scénarios TWRC et synchroniser les nœuds impliqués dans ce scénario ainsi que leurs voisins cachés. Il n’est donc pas nécessaire de connaître au préalable ou en temps réel la topologie ou l’état de la file d’attente des nœuds voisins.
- **Gestion efficace du temps** : Contrairement aux protocoles d’accès statiques où il peut y avoir des slots de temps non utilisés et gaspillés, DNCP, grâce à son aspect distribué, offre une meilleure exploitation des ressources à la demande et permet d’éviter toute forme de gaspillage ou de sous-utilisation.
- **Universalité topologique** : Le DNCP ne nécessite pas le déploiement de topologies spécifiques ou dédiées (les topologies maillées étudiées dans [230, 232, 233]). Par conséquent, il peut être déployé sur n’importe quel réseau sans fil multi-sauts.
- **Pas de problème de station cachée** : Grâce à un mécanisme efficace de configuration du NAV couplé à un échange systématique de messages de contrôle, les stations cachées peuvent retarder correctement leur accès au canal et éviter ainsi ce qui était initialement appelé ” *interférence destructive* ”.

5.3.6 Structure des trames

Dans cette sous-section, nous discutons la structure des trames du protocole proposé DNCP. Ces trames sont conçues pour contenir les informations nécessaires à la coordination entre nœuds candidats à une opportunité PNC, comme indiqué dans les sections précédentes. Les figures 5.7 (a) et 5.7 (b) résument les formats des trames de contrôle et de données qui sont modifiés conformément à la norme IEEE 802.11.

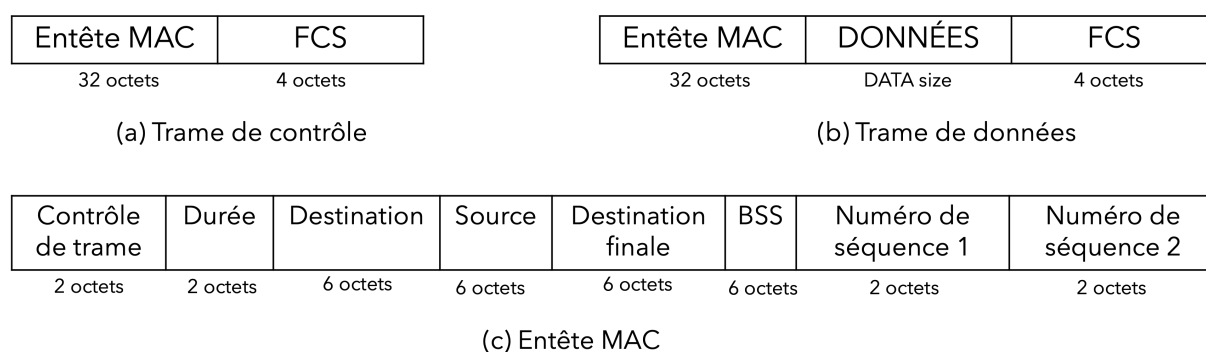


FIGURE 5.7 – Format des trames utilisées dans DNCP.

L'*En-tête MAC* est illustré par la figure 5.7 (c), qui comprend le type de message (contrôle de trame), la durée de la trame, l'adresse MAC du prochain saut, l'adresse MAC source, l'adresse MAC de destination finale, l'adresse MAC du point d'accès BSS « Basic Service Set », le numéro de séquence (numéro de séquence 1), et le numéro de séquence (numéro de séquence 2) de la deuxième trame de données si la trame de données est une donnée PNC.

5.4 Implémentation et résultats

Dans cette section, nous présentons une implémentation réelle du protocole DNCP en utilisant un testbed basé sur la radio logicielle (SDR « Software Defined Radio »). Plus précisément, nous avons utilisé GNU Radio [214] comme logiciel et Universal Software Radio Peripheral (USRP) [213] comme matériel. La version de GNU Radio utilisée est 3.7.14, qui est bien documentée et supportée. Concernant le matériel, nous avons utilisé le testbed FIT/CorteXlab [261] formé par des noeuds de type *USRP N2932*.

5.4.1 Configuration de l'expérimentation

Pour commencer, nous avons utilisé le réseau TWRC présenté par la Figure 5.8 pour déduire comment le DNCP se comporterait avec les scénarios TWRC.

Ensuite, afin d'analyser l'impact du problème de la station cachée sur la solution proposée, nous avons adopté la topologie présentée dans la figure 5.9, que nous appelons la *topologie Full*.

Nous considérons, comme l'illustre la figure 5.9, que les noeuds *A* et *B* sont, d'une part, engagés dans un scénario TWRC via le noeud relais *R* et, d'autre part, échangent

des flux de données avec leurs nœuds voisins respectifs *D* et *E*. Cette configuration des données a été motivée par la nécessité d’avoir des transmissions ordinaires ainsi que des transmissions PNC pour bien évaluer le gain apporté par cette technique.

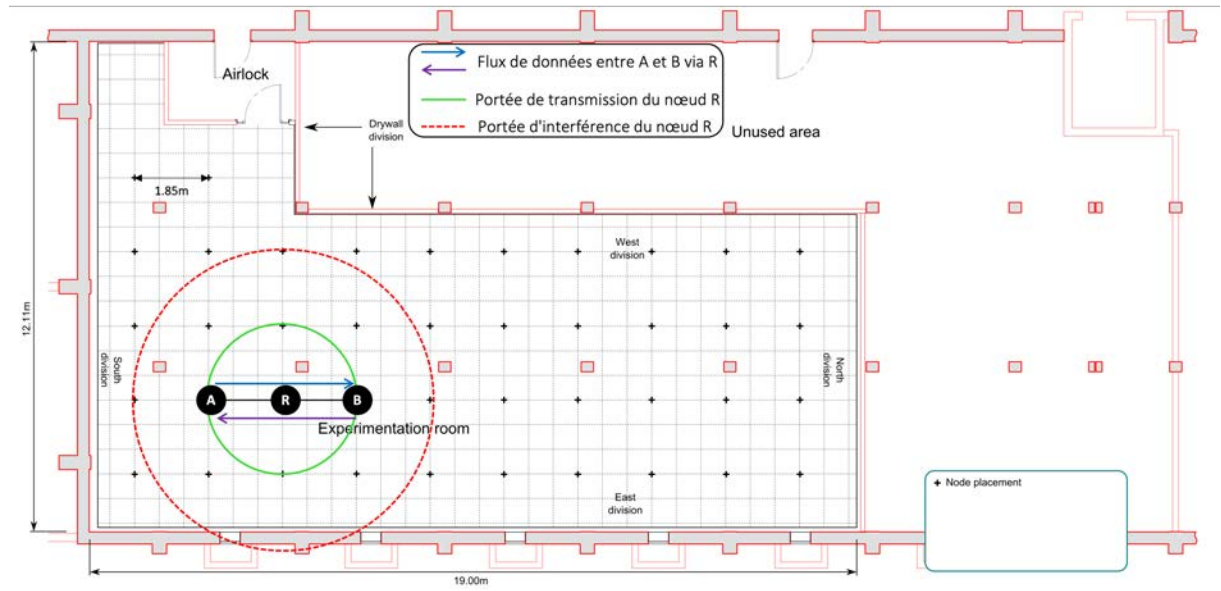


FIGURE 5.8 – La topologie TWRC.

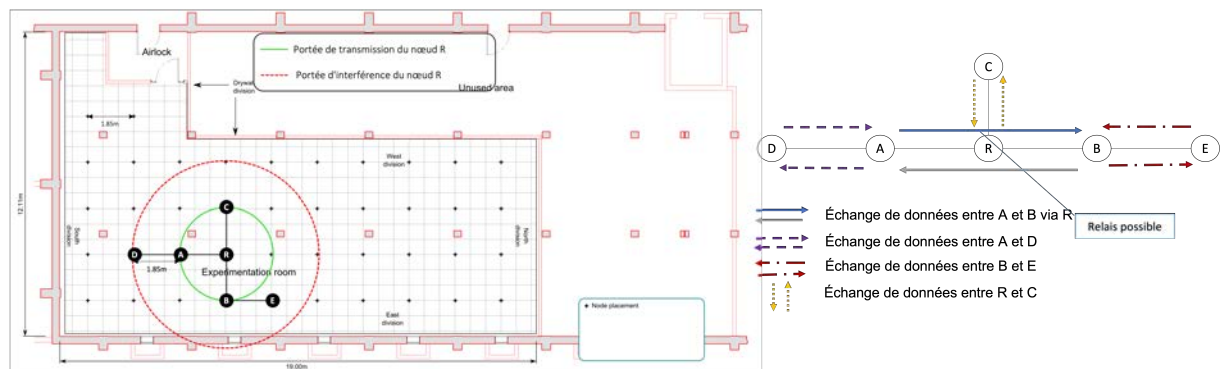


FIGURE 5.9 – La topologie Full.

En dernier lieu, la topologie *Line*, illustrée par la figure 5.10, est utilisée pour déduire les effets des relais successifs dans un réseau multi-sauts à grande échelle. Dans cette topologie, les deux nœuds d’extrémité, *A* et *F*, échangent des données simultanément via les nœuds intermédiaires *B*, *C*, *D* et *E*. Ainsi, chaque nœud intermédiaire dans ce scénario pourrait être un nœud relais.

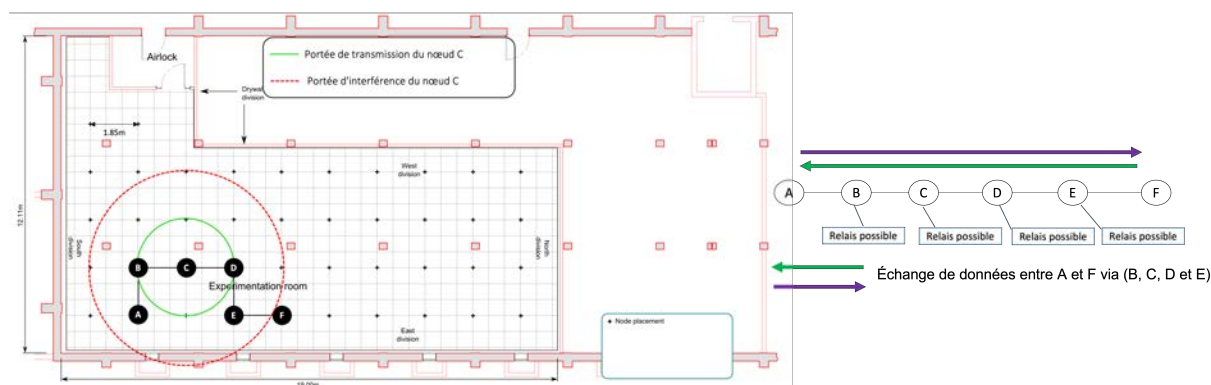


FIGURE 5.10 – La topologie Line.

Nous avons construit un prototype à trois couches en utilisant la plateforme GNU Radio où la couche application génère des paquets de données, la couche MAC implémente le protocole DNCP proposé, et la couche physique implémente le standard WiFi [262] [263] comme décrit dans le chapitre précédent.

Pour la couche application, le bloc *Message Strobe*¹ du module radio *Debug Tools* est utilisé pour créer des paquets de données à partir de texte. Cependant, nous avons construit un nouveau module GNU Radio pour la couche MAC du protocole MAC proposé appelé DNCP. Nous avons basé notre implémentation sur le protocole MAC CSMA/CA bien connu proposé dans [264].

En ce qui concerne la couche physique, comme nous l'avons mentionné précédemment, nous avons utilisé une couche physique WiFi basée sur le travail élaboré dans le chapitre 4.

Pour la couche MAC, le résultat de notre nouveau module est un bloc *GNU Radio Companion (GRC)* appelé *DNCP*², comme le montre la figure 5.11. Ce bloc comprend plusieurs ports et paramètres, résumés respectivement dans les tableaux 5.1 et 5.3.

1. https://wiki.gnuradio.org/index.php/Message_Strobe

2. <https://cloud.irit.fr/s/dxUIXdqeLHAzCFM>

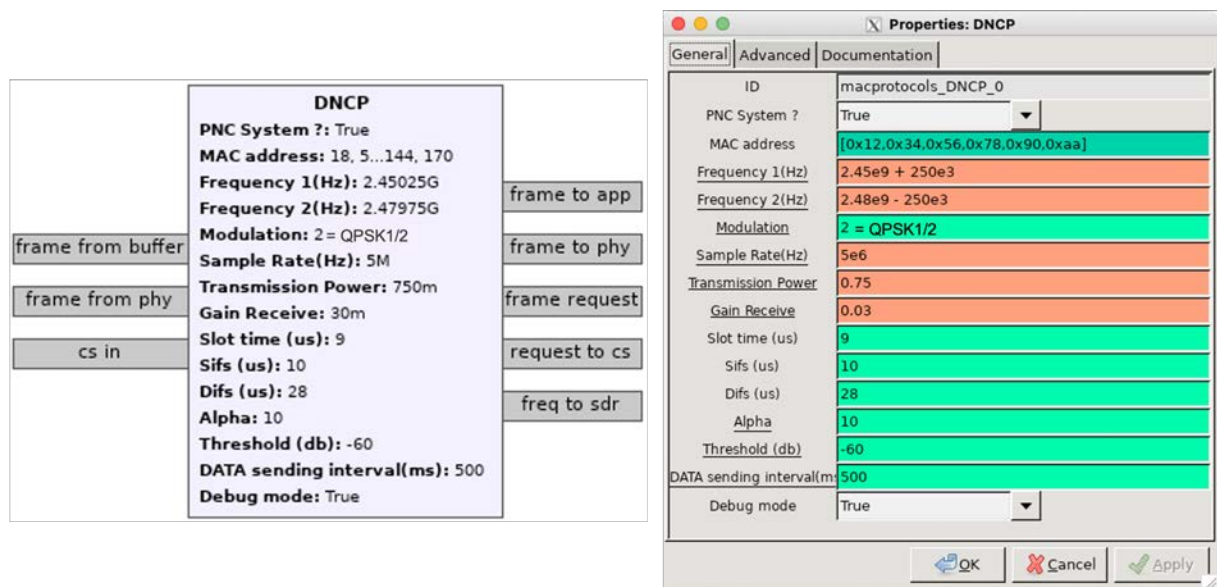


FIGURE 5.11 – Le bloc GRC DNCP.

TABLEAU 5.1 – Description des ports utilisés dans le bloc GRC DNCP

Ports	Description
Frame to app	Envoi d'une trame de données de la couche MAC à la couche application
Frame to phy	Envoi d'une trame de données de la couche MAC à la couche physique
Frame request	Demande une trame à partir de la file d'attente de paquets
Request to CS	Demande l'écoute du canal (CS « Carrier Sense »)
Freq to SDR	Modifie la fréquence de la SDR émettrice
Frame from buffer	Réception d'une trame de données de la couche application par la couche MAC
Frame from phy	Réception d'une trame de données de la couche physique par la couche MAC
CS in	Reçoit la valeur renvoyée par l'opération d'écoute du canal

Les paramètres des couches MAC et PHY sont présentés respectivement dans les tableaux 5.2 et 5.3.

TABLEAU 5.2 – Configuration de la couche MAC

Paramètres	Valeurs
Taille du tampon de la couche application	250 trames de données
Taille du tampon local de la couche MAC	3 trames de données
Délai moyen du bloc GNU Radio	1000 μ s (1ms)
Nombre maximal de tentatives	10
Délai de la couche physique	1 (μ s) pour une distance maximale de 300m entre deux nœuds
CWmin	16
CWmax	1024

TABLEAU 5.3 – Configuration de la couche PHY

Paramètres	Valeurs
Fréquence centrale f	$f = 2.45GHz$
Fréquence de décalage β	$\beta = 250KHz$
Fréquence 1	$f + \beta$
Fréquence 2	$f - \beta$
Taux d'échantillonnage	10MHzs
Modulation	BPSK1/2 (1/2 is the code rate), BPSK3/4, QPSK1/2, QPSK3/4, 16QAM1/2, 16QAM3/4, 64QAM1/2, and 64QAM3/4
Puissance de transmission	0.75 (Gain normalisé $\in [0.0, 1.0]$)
Gain de réception	0.03 (Gain normalisé $\in [0.0, 1.0]$)
Seuil CS	-60 dBm
Alpha	10
Taille du paquet de données	500 Octets
Intervalle de production du paquet de données	500 ms

Il est judicieux de noter que le paramètre *ALPHA* est utilisé pour multiplier le slot de temps, le SIFS, et le DIFS, afin d'augmenter le temps d'attente de la couche MAC puisque tous les processus seront effectués par le logiciel GNU Radio, qui n'est pas assez

rapide comparé au logiciel intégré du FPGA [265]. Le paramètre *Threshold* fait référence à la limite de puissance reçue pour laquelle le canal est considéré comme occupé.

Dans une expérience préalable, nous avons vérifié tout d'abord l'état du canal lorsqu'il est libre et pendant la transmission. Cela nous permet d'estimer correctement le bruit produit par les nœuds voisins et de configurer correctement la puissance du signal pour laquelle le canal est considéré comme occupé dans nos expériences.

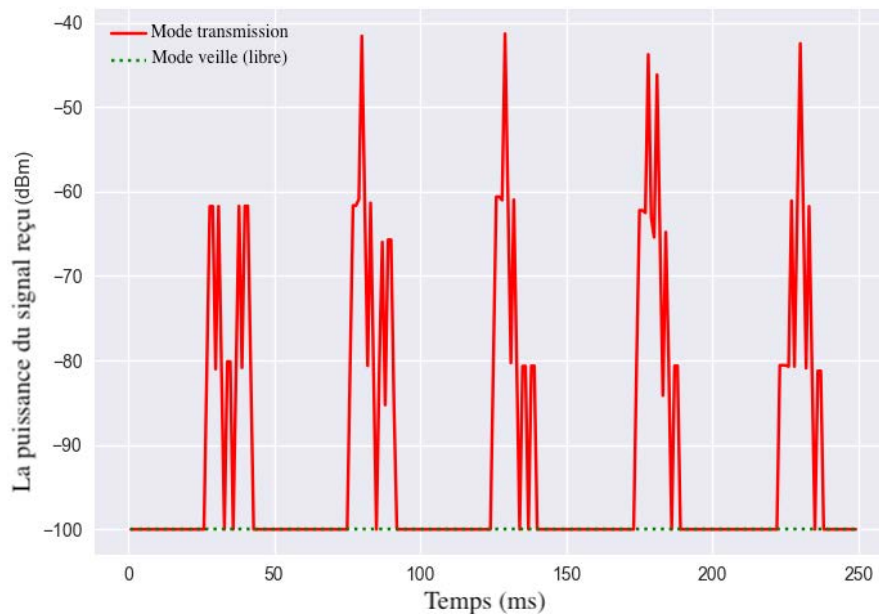


FIGURE 5.12 – Vérification de l'état de canal.

La figure 5.12 montre l'état du canal en transmission et en mode veille. En mode veille (ligne verte en pointillés), la puissance du signal reçu est toujours autour de $-100dBm$ puisque l'environnement du CorteXlab est isolé (environnement intérieur), alors qu'en mode transmission (ligne rouge continue), il y a quatre niveaux de puissance du signal reçu. Le premier niveau se situe autour de $-100dBm$ et indique qu'aucune transmission n'est en cours à ce moment-là (ou qu'il n'y a pas d'activité). Les autres niveaux (environ $-80dBm$, $-60dBm$ et $-40dBm$, respectivement pour une puissance de signal faible, moyenne et élevée) indiquent qu'une transmission est en cours. Dans nos expériences, nous considérons la puissance moyenne du signal ($-60dBm$) comme un seuil indiquant que le canal est occupé.

Les performances du protocole DNCP sont évaluées pour les trois topologies en utilisant **TWRC**, **Line** et **Full** et sont comparées au protocole MAC CSMA/CA convention-

nel en utilisant quatre métriques : le *throughput*, le *délat*, le *taux de perte de paquets* et le *taux d'abandon de paquets* puisque ces métriques sont les plus affectées par la technique PNC. Chaque expérience a duré 50 minutes et a été répétée cinq fois.

5.4.2 Analyse des résultats

Le *throughput* moyen de tous les nœuds est exprimé en *Kbits/s* et mesure le nombre total de bits des paquets reçus par chaque nœud pendant la période d'expérimentation.

Afin d'évaluer le délai global induit par le protocole DNCP proposé, nous estimons le délai local moyen de chaque trame de données pour chaque expérience. Ce délai identifie le temps moyen entre l'entrée dans la mémoire tampon de la couche MAC locale (de l'émetteur) et la transmission du signal correspondant par la couche physique au cours d'une transmission réussie de paquets de données entre deux nœuds quelconques. Nous supposons qu'il n'y a pas de délai de mise en mémoire tampon dans la couche physique, de sorte que la trame de données reçue de la couche MAC est immédiatement transmise. En outre, nous n'avons compté que les transmissions réussies pour lesquelles le nœud émetteur a reçu un accusé de réception positif. Cette période inclut tous les délais potentiels pour les files d'attente, l'accès au canal, la transmission des trames de contrôle, les espaces inter-frames, etc.

La troisième mesure est le taux de perte de paquets, qui est calculé sur la base du rapport entre le nombre de paquets perdus et le nombre total de paquets envoyés. Cette perte peut être causée par une erreur, une corruption de données, une interférence destructrice ou une rupture de lien.

Finalement, la quatrième mesure est le taux d'abandon des paquets qui représente le ratio des paquets abandonnés par rapport à l'ensemble des paquets envoyés. Nous considérons qu'un paquet n'est abandonné que si la mémoire tampon de la couche MAC est pleine ou si le nombre maximal de tentatives d'envoi est atteint. Cette mesure permet d'évaluer l'impact des transmissions PNC sur les transmissions ordinaires.

Les résultats de performance du protocole DNCP proposé et du protocole MAC CSMA/CA bien connu sur les topologies mentionnées sont présentés dans les sections suivantes.

5.4.3 Résultats de la topologie *TWRC*

Cette section présente les résultats des protocoles DNCP et CSMA/CA sur le réseau *TWRC*.

Pour cette topologie simple, nous étudions d'abord l'impact de la technique de modulation sur les performances du réseau. Ce choix est motivé par l'analyse faite dans l'état de l'art présenté par le chapitre 2 et qui a révélé une corrélation importante entre la technique de modulation utilisée dans la couche physique et les performances obtenues avec la technique PNC. En effet, il a été prouvé que la technique PNC basée sur l'OFDM est vulnérable au décalage de fréquence porteuse (CFO « Carrier Frequency Offset »), qui peut être induit par la mobilité des nœuds et/ou la non-concordance de l'oscillateur local (LO « Local Oscillator ») entre les émetteurs et les récepteurs. Ce CFO ne peut pas être estimé et éliminé dans la transmission PNC au niveau du nœud relais, qui est généralement confronté à deux valeurs de CFO différentes provenant des nœuds feuilles *A* et *B*.

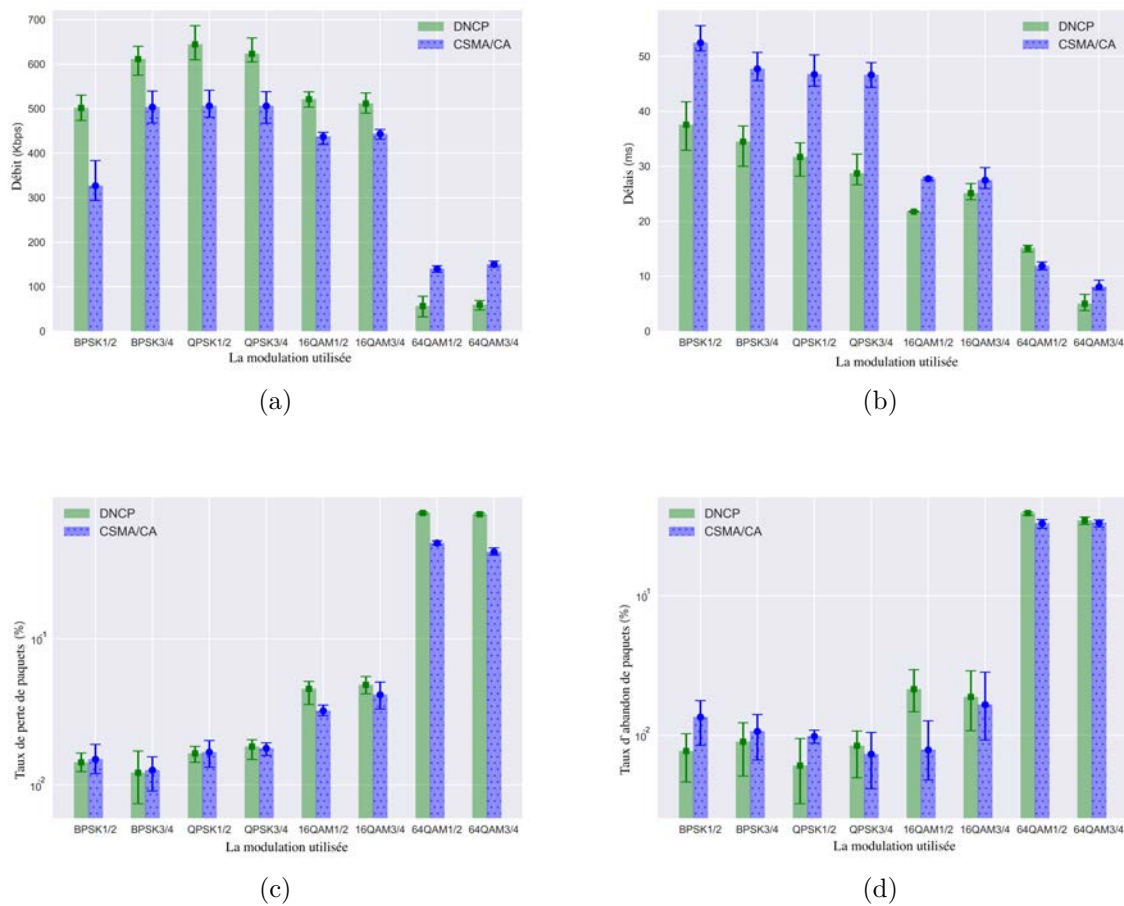
Le CFO avec la technique PNC entraîne non seulement l'interférence inter-porteuses (ICI « Inter-Carrier Interference ») entre les sous-porteuses des nœuds *A* et *B*, mais aussi un décalage de phase relatif entre les constellations reçues des nœuds *A* et *B*, et les deux causeront une perte baisse de performance dans la transmission PNC, en particulier pour les modulations d'ordre élevé, y compris *QPSK* [266] [267]. L'objectif de cette première série d'expériences est d'évaluer le protocole MAC proposé DNCP sous différentes modulations afin de déterminer la configuration physique la plus appropriée pour obtenir les meilleures performances.

Les résultats de cinq expériences de chaque configuration sont pris en compte. Chaque expérience de composition a duré deux minutes : par exemple, le taux d'échantillonnage « Sample Rate » $10MHz$ avec la modulation *BPSK* $1/2$, etc.

Pour avoir une vision plus large, les figures 5.13(a), 5.13(b), 5.13(c) et 5.13(d) montrent la moyenne des résultats de toutes les modulations utilisées pour le *throughput*, le délai, le taux de perte de paquets et le taux d'abandon de paquets, respectivement.

En ce qui concerne le *throughput*, le DNCP surpasse le protocole CSMA/CA quelle que soit la modulation utilisée, à l'exception de la modulation *64QAM*.

Pour toutes les métriques de performance, nous constatons que la modulation *QPSK* donne les meilleures performances. Les résultats montrent également que plus l'ordre de modulation *M-PSK* est élevé, plus les performances sont élevées, alors que pour la modulation *M-QAM*, plus l'ordre de modulation est élevé, plus les performances sont

FIGURE 5.13 – Résultats de performance pour la topologie *TWRC*.

faibles. La raison en est que la modulation M -QAM est fortement affectée par le rapport signal/bruit (SNR « Signal Noise Ratio ») ou le rapport signal/interférence plus bruit (SINR « Signal to Interference plus Noise Ratio »), ce qui nécessite des niveaux plus élevés de puissance d'émission et de gain de réception, en particulier avec les transmissions PNC, où deux signaux sont reçus en même temps, contrairement à la modulation M -PSK, qui est très résistante face au SNR ou SINR [268, 269, 163, 270, 271, 272].

Il est facile de constater que pour toutes les métriques de performance, le protocole DNCP est plus performant que le protocole CSMA/CA conventionnel, sauf pour la modulation M -QAM.

Cela est dû à la méthode *décoder et transmettre* (DAF « Decode-and-forward ») utilisée pour les transmissions PNC. En effet, lors de l'utilisation de la méthode DAF avec des modulations Binary Phase-Shift Keying (BPSK) ou Quadrature Phase-Shift Keying (QPSK), le signal superposé peut être mappé au signal codé à l'aide de l'opération XOR.

Toutefois, la méthode de mappage XOR peut ne pas convenir aux modulations plus élevées [268].

Ainsi, dans certains cas, en utilisant cette modulation, le processus de codage/décodage conduira à des paquets erronés, donc retransmis ou ignorés, ce qui explique la baisse de performance du protocole proposé dans ces scénarios.

5.4.4 Résultats de la topologie *Full*

Dans cette section, nous présentons les résultats des protocoles DNCP et CSMA/CA sur la topologie *Full* pour voir l'effet des stations cachées sur le réseau TWRC.

Comme nous l'avons présenté précédemment (dans la section 5.4.3), la modulation la plus appropriée pour le système présenté est la modulation QPSK3/4. Par conséquent, outre les paramètres indiqués dans le tableau 5.3, nous avons utilisé la modulation QPSK3/4 et la fréquence d'échantillonnage « Sample Rate » 10MHz.

Pour les figures 5.14 (a), 5.14 (b), 5.14 (c), et 5.14 (d), les résultats représentent les valeurs minimales (Min), moyennes (Avg), et maximales (Max) de cinq expériences pour le *throughput*, le délai, le taux de perte de paquets et le taux d'abandon de paquets, respectivement. Chaque expérience a duré 50 minutes, et toutes les 10 minutes, les valeurs des résultats ont été prises pour voir la stabilité des protocoles MAC dans le temps.

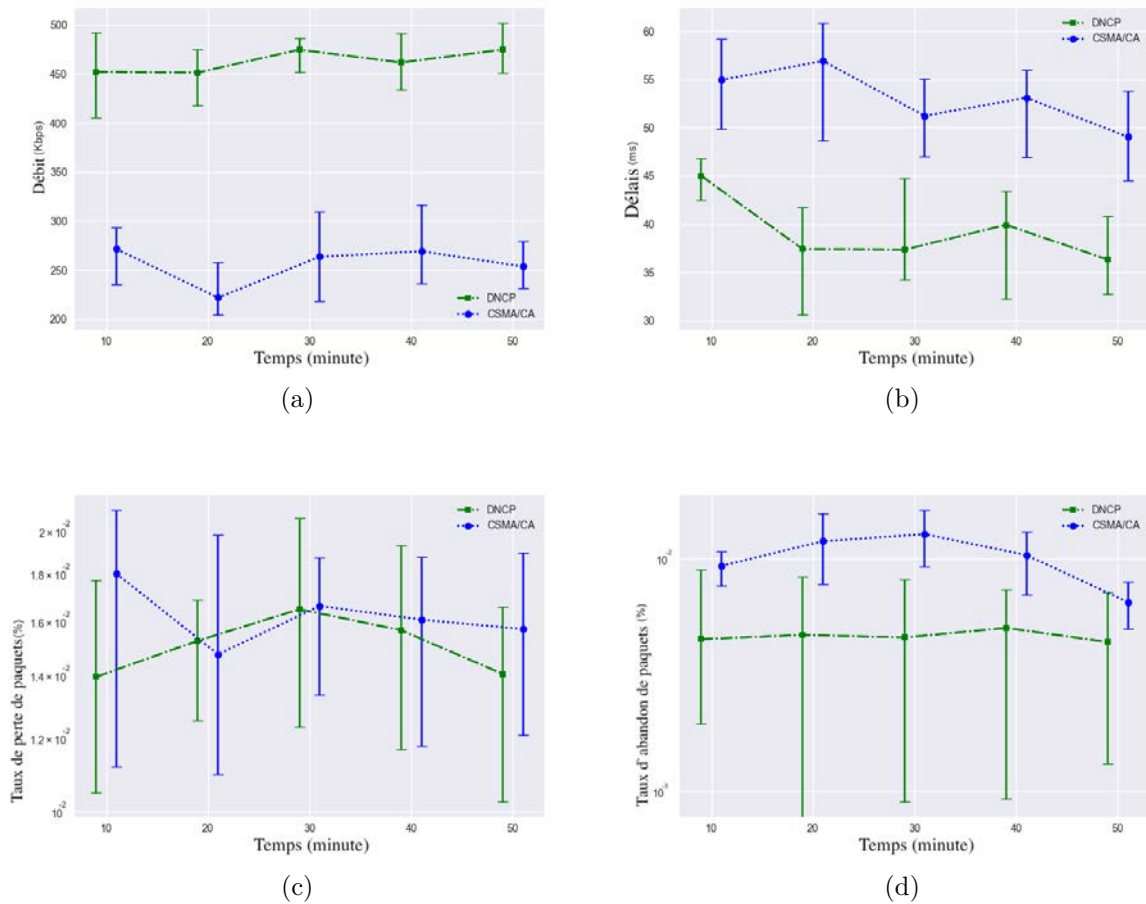
Pour toutes les métriques de performance, nous pouvons remarquer que le DNCP est toujours plus performant que le protocole MAC CSMA/CA conventionnel, sauf pour la métrique du taux de perte de paquets, pour laquelle les résultats des deux protocoles MAC sont presque identiques.

Cette figure montre que le gain de *throughput* du DNCP par rapport au CSMA/CA est d'environ 1,87 fois, ce qui se rapproche du résultat théorique de 2 fois, comme indiqué par l'état de l'art dans le chapitre 2.

Par rapport au *throughput* obtenu avec la topologie TWRC simple, dans la topologie *full*, le *throughput* diminue légèrement en raison des collisions ou de ce que nous appelons *interférence destructive* causée par la contention du canal, qui devient intense avec l'augmentation du nombre de nœuds.

Les barres d'erreur montrent également que les résultats du protocole MAC DNCP ne sont pas très éloignés, ce qui indique la stabilité de la solution proposée.

En termes de délai, lorsqu'il s'agit d'une transmission ordinaire, le DNCP a le même comportement que le CSMA/CA conventionnel et permet donc d'obtenir le même dé-

FIGURE 5.14 – Résultats de performance pour la topologie *Full*.

lai. Cependant, lorsqu'il s'agit d'opportunités de PNC, le DNCP nécessite un échange supplémentaire de messages de contrôle afin de coordonner les deux transmissions simultanément, d'où des retards supplémentaires. En outre, l'augmentation du *throughput* obtenue par le DNCP permet à un plus grand nombre de paquets de contrôle d'entrer dans le réseau (la période de concours pour l'accès au canal) et, par conséquent, les paquets peuvent devoir attendre plus longtemps dans la file d'attente. Mais ce délai est compensé par l'utilisation d'un nouveau contrôle d'accès qui autorise deux transmissions simultanées (la technique PNC), ce qui explique le gain de délai apporté par le protocole DNCP proposé par rapport au CSMA/CA.

La perte de paquets est faible et presque identique pour les deux protocoles. Cela est dû à une couche physique robuste utilisant la technique de modulation *QPSK* (Pour plus d'informations sur le taux d'erreur sur les bits « Bit Error Rate » (BER) et le taux d'erreur sur les symboles « Symbol Error Rate » (SER) des différentes modulations avec

la technique PNC, le lecteur est référé à [268, 269, 163, 270, 271, 272]) associée à une gestion fiable des nœuds cachés au niveau de la couche MAC, qui réduit considérablement les pertes de paquets causées par des erreurs de transmission ou des interférences.

5.4.5 Résultats de la topologie *Line*

La topologie *Line* est utilisée pour étudier le comportement du DNCP lorsque des nœuds de relais successifs sont ajoutés au système.

La figure 5.15 montre que le DNCP est plus performant que le protocole CSMA/CA classique, avec un gain de *throughput* moyen de 1,78 fois et une amélioration considérable du délai. Toutefois, par rapport aux topologies *TWRC* et *Full*, les performances globales diminuent légèrement car le traitement supplémentaire des relais peut entraîner plus de délai de bout en bout, ce qui réduit par conséquent le nombre de paquets transmis.

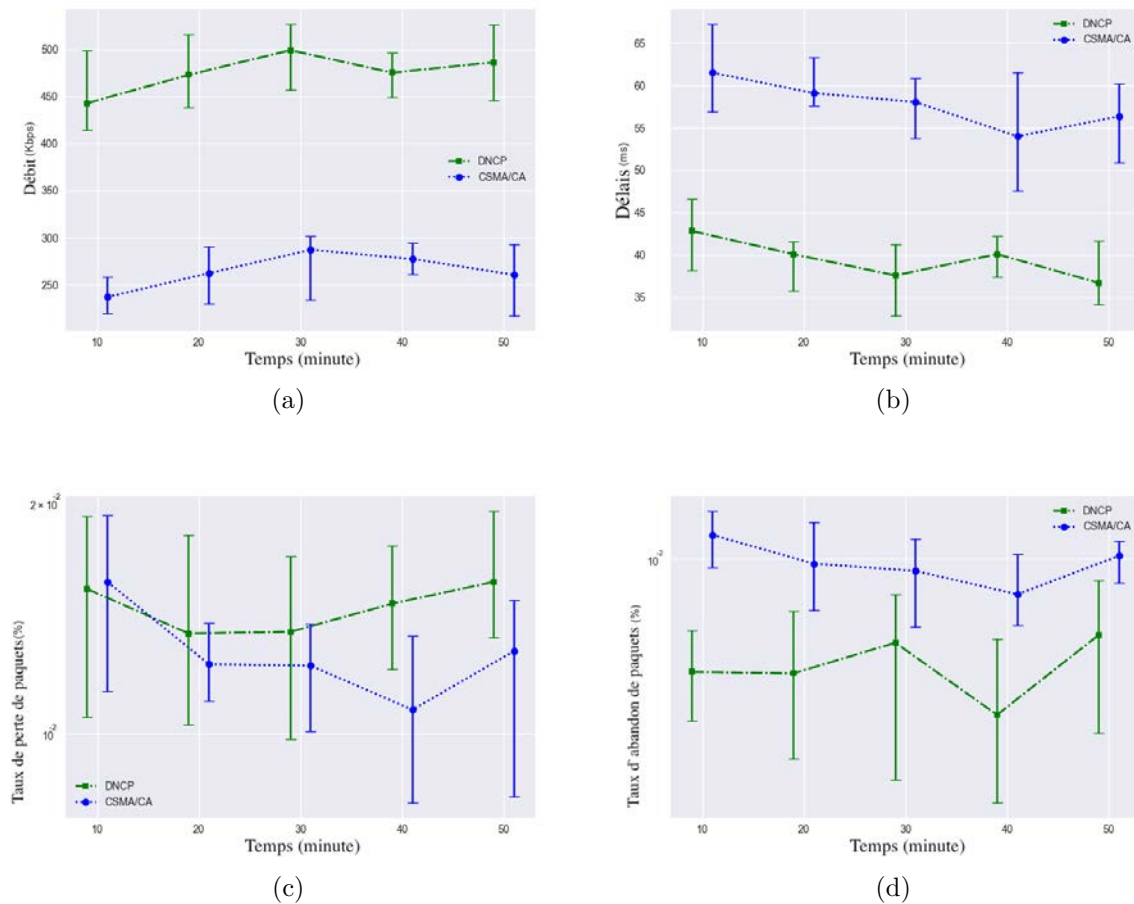


FIGURE 5.15 – Résultats de performance pour la topologie *Line*.

Néanmoins, le fait de considérer une seule opportunité de PNC entre les nœuds A et F réduit considérablement le risque de collisions, la perte et l'abandon de paquets, ce qui justifie la stabilité de ces résultats par rapport aux topologies précédentes. De plus, comme nous considérons des réseaux statiques (car les problèmes de routage doivent être pris en compte dans un réseau avec mobilité, ce qui dépasse le cadre de cette thèse et sera plutôt considéré dans nos perspectives), il est peu probable d'avoir une défaillance de liaison pour les protocoles DNCP et CSMA/CA, ce qui explique les valeurs assez faibles des taux de perte.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé le Distributed Physical-Network Coding MAC Protocol (DNCP), qui étend le protocole MAC IEEE 802.11 pour supporter la technique PNC.

L'idée de base de notre proposition était de détecter les opportunités de PNC en utilisant des trames RTS/CTS conventionnelles et de coordonner l'accès au canal entre les nœuds sources concernés par un nœud relais commun afin d'assurer des transmissions simultanées.

Le protocole proposé se concentre sur la compatibilité avec d'autres schémas de relais conventionnels afin que les transmissions de données ordinaires (qui ne font pas partie d'une opportunité de PNC) se déroulent toujours correctement. Plusieurs mécanismes ont été proposés pour résoudre le problème du nœud caché, tels que l'amélioration du NAV et la diversité de l'ACK, ce qui a permis un échange de paquets fiable qui évite les *interférences destructrices*.

Afin d'obtenir une solution pratique, nous avons considéré des hypothèses efficaces liées aux exigences matérielles et à la topologie du réseau, et nous avons effectué une évaluation réelle à l'aide d'un testbed basé sur des SDRs. Les performances du PNC sont évaluées pour les topologies *TWRC*, *Line* et *Full* et sont comparées au protocole CSMA/CA conventionnel en utilisant quatre métriques : le *throughput*, le délai, le taux de perte de paquets et le taux d'abandon de paquets car ces mesures sont les plus affectées par la technique PNC.

Les résultats de l'expérimentation montrent que le protocole DNCP proposé apporte une amélioration considérable du *throughput* dans divers scénarios tout en maintenant une tendance similaire des résultats de perte de paquets. Il s'ensuit que le DNCP est avantageux, en particulier pour les applications des réseaux sans fil sensibles au *throughput*.

Une analyse plus approfondie de la topologie *Line* multi-relais mérite d'être étudiée dans le futur. En outre, comme nous avons considéré, dans ce travail, un routage statique, nous avons l'intention, dans le futur, de coupler et d'adapter la technique PNC et l'ordonnancement au niveau MAC pour avoir un routage opportuniste capable de diriger les paquets de données sur les chemins qui supportent plus d'opportunités de PNC.

De plus, nous avons l'intention d'utiliser tous les nœuds du testbed FIT/CorteXlab pour tester le protocole DNCP proposé dans ce chapitre et le protocole DSNCP proposé dans le chapitre 3, où on aura ainsi plusieurs "étoiles" enchevêtrées.

Conclusion et Perspectives

Un réseau sans fil multi-saut est un ensemble d'entités souvent mobiles inter-connectées par l'intermédiaire d'une technologie sans fil et formant un réseau dynamique temporaire sans l'aide de toute administration centralisée ou de tout support fixe. Les réseaux de capteurs, les réseaux maillés sans fil et les réseaux ad hoc constituent des exemples de réseaux multi-sauts. Face au nombre croissant d'applications disponibles sur ces réseaux, ceux-ci connaissent un essor fulgurant et prennent une place de plus en plus importante dans les communications personnelles, civiles ou d'entreprises. Du fait que les échanges entre paires de nœuds sont relayés de proche en proche, il a été communément admis que les débits atteignables dans de tels réseaux sont particulièrement limités dès lors que le nombre d'utilisateurs augmente. En effet, d'une part, les nœuds intermédiaires, équipés d'une seule interface radio, ne peuvent pas normalement recevoir et émettre simultanément des paquets sur le support radio. D'autre part, étant donné l'aspect partagé du canal de transmission, les nœuds sont souvent amenés à une forme de compétition pour y accéder. Une telle compétition implique que certaines stations en train d'émettre peuvent soit empêcher d'autres stations d'accéder au support radio en même temps et sur la même bande de fréquence, soit interférer avec elles. Ces interférences entraînent la réception de données corrompues et impliquent, généralement, la retransmission de ces données pour y remédier ce qui impacte fortement les performances des communications multi-sauts et sous-exploite les ressources réseaux disponibles.

Cette gestion d'interférences a souvent défini les contours des principales méthodes de gestion d'accès encore en vigueur et qui proposent un ordonnancement adéquat des transmissions de façon à séparer ces échanges dans le temps ou dans l'espace fréquentiel et éviter ainsi les collisions. Cependant, grâce aux progrès considérables dans le domaine des télécommunications, de nouveaux paradigmes ont émergé et ont bouleversé ces visions par l'avènement de nouvelles techniques dites de traitement d'interférences. Ces techniques visent à autoriser les transmissions simultanées dans le même domaine fréquentiel, mais au prix d'algorithmes de codage/décodage complexes ou d'investissement matériel coûteux.

Contributions

Dans cette thèse, nous nous sommes donc intéressés à l'une de ces techniques en vue de son intégration dans les réseaux sans-fil multi-sauts : le Physical-layer Network Coding (PNC), qui remplit les objectifs d'augmenter les débits résultants tout en favorisant la réutilisation spatiale. Cette technique, a été conçue principalement pour le modèle minimaliste Two-Way Relay Channel (TWRC) et permet à un nœud de décoder au niveau binaire une combinaison linéaire de deux paquets reçus simultanément.

Nous avons proposé, dans ces travaux de thèse, d'étendre l'utilisation de cette solution dans un réseau sans fil multi-saut et déployé en large échelle. L'objectif était de contribuer à l'élaboration de solutions physiques et MAC permettant une intégration réelle de cette technique et traitant les principaux verrous qui freinent son exploitation dans un contexte distribué et élargi.

Pour ce faire, nous avons tout d'abord, proposé une solution de gestion d'accès dynamique basé sur le standard TDMA et qui favorise la détection et l'exploitation des opportunités PNC dans le réseau. En ayant recours à la notion de *mini slots* et grâce à une politique d'ordonnancement efficace, nous avons réussi à atteindre des gains importants en *throughput* (débit) et en délai avoisinant les 50% en comparaison aux systèmes sans interférence basés sur le TDMA conventionnel et le CSMA/CA.

Dans un deuxième temps, nous avons cherché à adapter la couche physique pour supporter le PNC et garantir ainsi la synergie inter-protocolaire dans un contexte réel. Plus explicitement, nous avons conçu une couche physique dédiée capable de supporter les scénarios PNC sur des équipements radio hétérogènes. Les composants *Software Defined Radio (SDR)* utilisés ont posé différentes contraintes que nous avons tenu à résoudre d'une façon efficace sans surcoût majeur.

Afin de mettre en évidence l'utilité de cette couche physique conçue dans la contribution précédente, nous avons proposé une nouvelle solution d'accès distribuée et aléatoire inspiré de standard CSMA/CA et qui s'adapte mieux à l'aspect autonome et flexible des réseaux sans fil multi-sauts. En effet, grâce à un mécanisme *handshake* adapté, les nœuds sont capables de détecter les opportunités de PNC et coordonner, ainsi, leurs transmissions de données tout en évitant les problèmes de stations cachés. Une implémentation réelle couplée à une couche physique dédiée a fait l'objet d'une évaluation extensive des performances sous plusieurs topologies, différentes conditions de trafic et diverses configurations physiques. Cette étude des performances a donné lieu à des résultats prometteurs en termes de délai et de *throughput* en se comparant au CSMA/CA conventionnel.

Perspectives

Dans l'étude des performances menée, nous nous sommes limités à la topologie multi-relais *line* et *full* avec un seul relai en plus du scénario TWRC primaire. Cependant, les topologies *full* et multi-relais, censées étendre la notion d'atomes déjà évoquée, méritent une meilleure investigation car elles sont plus représentatives pour les réseaux sans fil multi-sauts maillés à large échelle.

En remontant dans les couches protocolaires, il est légitime de souligner que, dans nos travaux, nous avons considéré un routage statique, selon lequel les nœuds sources connaissent, à priori et de façon figée, les relais avec lesquels ils devraient orchestrer leurs transmissions. Nous pensons, ainsi, que les mécanismes de la couche physique et de la couche d'accès proposés doivent être complétés par de nouveaux protocoles de routage afin d'exploiter efficacement cette technique PNC. Un tel routage devrait permettre aux nœuds de chercher les chemins qui maximisent les opportunités de *network coding* et favoriser les scénarios d'échanges bidirectionnels à travers un relai commun.

Là aussi, il sera intéressant de travailler tout d'abord sur des simulations, plus de les validées par une implémentation sur un *testbed* réel de grande envergure.

Cette thèse s'est focalisée sur une couche radio WiFi. Cette dernière est utilisée dans les réseaux de type IoT, mais souffre encore d'une trop grande consommation énergétique. Elle est ainsi souvent remplacée par d'autres technologies de transmission sans fil mieux adaptées à l'IoT : IEEE 802.15.4, LoRa, SigFox, Bluetooth, BLE, et bientôt MATTE qui devrait unifier et rendre interopérables ces couches immatérielles variées. Il serait intéressant en perspective, de transposer les approches innovantes proposées dans cette thèse à ces nouveaux réseaux sans fil.

Liste des publications

Papier Journal soumis

1. Aissaoui, M., Houaidia, C., Van Den Bossche, A., Val, T., and Azouz Saidane, L. "Distributed Physical-layer Network Coding MAC Protocol", Ad Hoc Networks Journal (**Q1, I.F : 4,816**), Elsevier. (**Accepté avec *minor revision***)

Articles publiés dans des Conférences Internationales

1. Aissaoui, M., Houaidia, C., Van Den Bossche, A., Val, T., and Azouz Saidane, L. "Dynamic slotted network coding protocol" 17th International Conference on Software Technologies ICSoft 2022 (**Classe B**), pp : 579-590.
2. Aissaoui, M., Houaidia, C., Van Den Bossche, A., Val, T., and Azouz Saidane, L. "Physical-layer Network Coding : A Heterogeneous Software-Defined-Radio based Implementation" 11th IFIP/IEEE PEMWN 2022, pp:1-6.
3. Aissaoui, M., Houaidia, C., Van Den Bossche, A., Val, T., and Azouz Saidane, L. "A new taxonomy of physical-layer network coding techniques in two way relay channel model with single antenna" 10th IFIP/IEEE PEMWN 2021, pp:1-6.

Bibliographie

- [1] S. Basagni, M. Conti, S. Giordano, and I. Stojmenovic, *Mobile ad hoc networking*. John Wiley & Sons, 2004.
- [2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks : a survey,” *Computer networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.
- [3] I. F. Akyildiz, X. Wang, and W. Wang, “Wireless mesh networks : a survey,” *Computer networks*, vol. 47, no. 4, pp. 445–487, 2005.
- [4] E. Schoch, F. Kargl, M. Weber, and T. Leinmuller, “Communication patterns in vanets,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 11, pp. 119–125, 2008.
- [5] Y. Yumen, S. Sakakura, K. Sanada, H. Hatano, and K. Mori, “Throughput analysis for wireless full-duplex multi-hop networks with rts/cts-based mac,” *Electronics*, vol. 11, no. 6, p. 892, 2022.
- [6] Z. Yang and J. Garcia-Luna-Aceves, “Hop-reservation multiple access (hrma) for ad-hoc networks,” in *IEEE INFOCOM’99. Conference on Computer Communications. Proceedings. Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. The Future is Now (Cat. No. 99CH36320)*, vol. 1, pp. 194–201, IEEE, 1999.
- [7] S.-W. Jeon and M. Gastpar, “A survey on interference networks : Interference alignment and neutralization,” *Entropy*, vol. 14, no. 10, pp. 1842–1863, 2012.
- [8] N. Zhao, F. R. Yu, M. Jin, Q. Yan, and V. C. Leung, “Interference alignment and its applications : A survey, research issues, and challenges,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1779–1803, 2016.
- [9] C. Jiang, Y. Shi, X. Qin, X. Yuan, Y. T. Hou, W. Lou, S. Kompella, and S. F. Midkiff, “Cross-layer optimization for multi-hop wireless networks with successive interference cancellation,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 8, pp. 5819–5831, 2016.

-
- [10] S. Sen, N. Santhapuri, R. R. Choudhury, and S. Nelakuditi, "Successive interference cancellation : A back-of-the-envelope perspective," in *Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks*, pp. 1–6, 2010.
- [11] O. Bazan and M. Jaseemuddin, "A survey on mac protocols for wireless adhoc networks with beamforming antennas," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 14, no. 2, pp. 216–239, 2011.
- [12] V. Jungnickel, M. Schellmann, A. Forck, H. Gäbler, S. Wahls, T. Haustein, W. Zirwas, J. Eichinger, E. Schulz, C. Juchems, *et al.*, "Demonstration of virtual mimo in the uplink," in *IET Smart Antennas and Cooperative Communications Seminar*, Citeseer, 2007.
- [13] A. Savard and L. Clavier, "On the two-way diamond relay channel with lattice-based Compress-and-Forward," in *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1–6, IEEE, 2018.
- [14] H. Yomo and Y. Maeda, "Distributed mac protocol for physical layer network coding," in *2011 The 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, pp. 1–5, IEEE, 2011.
- [15] J. He and S.-C. Liew, "Building blocks of physical-layer network coding," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 5, pp. 2711–2728, 2015.
- [16] S. Faruque, "Time division multiple access (tdma)," in *Radio Frequency Multiple Access Techniques Made Easy*, pp. 35–43, Springer, 2019.
- [17] C. Ciochina and H. Sari, "A review of ofdma and single-carrier fdma," in *2010 European Wireless Conference (EW)*, pp. 706–710, IEEE, 2010.
- [18] H. Jiang, P. Wang, W. Zhuang, and X. Shen, "An interference aware distributed resource management scheme for cdma-based wireless mesh backbone," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 12, pp. 4558–4567, 2007.
- [19] E. Ziouva and T. Antonakopoulos, "Csma/ca performance under high traffic conditions : throughput and delay analysis," *Computer communications*, vol. 25, no. 3, pp. 313–321, 2002.
- [20] D. Gesbert, M. Shafi, D.-s. Shiu, P. J. Smith, and A. Naguib, "From theory to practice : An overview of mimo space-time coded wireless systems," *IEEE Journal on selected areas in Communications*, vol. 21, no. 3, pp. 281–302, 2003.
- [21] H. Zeng, X. Yuan, X. Qin, Y. Shi, Y. T. Hou, and W. Lou, "Nullification in the air : Interference neutralization in multi-hop wireless networks," in *IEEE INFOCOM 2016-The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications*, pp. 1–9, IEEE, 2016.

- [22] S. Katti, H. Rahul, W. Hu, D. Katabi, M. Médard, and J. Crowcroft, “Xors in the air : Practical wireless network coding,” in *Proceedings of the 2006 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, pp. 243–254, 2006.
- [23] Q. Vey, F. Spies, B. Pestourie, D. Genon-Catalot, A. Van Den Bossche, T. Val, R. Dalce, and J. Schrive, “Poucet : A multi-technology indoor positioning solution for firefighters and soldiers,” in *2021 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp. 1–8, IEEE, 2021.
- [24] A. Van den Bossche, R. Dalce, I. Fofana, and T. Val, “Decaduino : An open framework for wireless time-of-flight ranging systems,” in *2016 Wireless Days (WD)*, pp. 1–7, IEEE, 2016.
- [25] J. R. Parvin, “An overview of wireless mesh networks,” *Wireless Mesh Networks-Security, Architectures and Protocols*, 2019.
- [26] J. Jubin and J. D. Tornow, “The darpa packet radio network protocols,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 75, no. 1, pp. 21–32, 1987.
- [27] D. B. Johnson and D. A. Maltz, “Dynamic source routing in ad hoc wireless networks,” in *Mobile computing*, pp. 153–181, Springer, 1996.
- [28] E. Hossain and K. K. Leung, *Wireless mesh networks : architectures and protocols*. Springer, 2007.
- [29] D. Benyamina, A. Hafid, and M. Gendreau, “Wireless mesh networks design—a survey,” *IEEE Communications surveys & tutorials*, vol. 14, no. 2, pp. 299–310, 2011.
- [30] H. Hartenstein and L. Laberteaux, “A tutorial survey on vehicular ad hoc networks,” *IEEE Communications magazine*, vol. 46, no. 6, pp. 164–171, 2008.
- [31] R. K. Ahiadormey, P. Anokye, H.-S. Jo, and K.-J. Lee, “Performance analysis of two-way relaying in cooperative power line communications,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 97264–97280, 2019. Publisher : IEEE.
- [32] P. Gupta and P. R. Kumar, “The capacity of wireless networks,” *IEEE Transactions on information theory*, vol. 46, no. 2, pp. 388–404, 2000.
- [33] J. Wildman and S. Weber, “On protocol and physical interference models in poisson wireless networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 2, pp. 808–821, 2017.
- [34] A. Ephremides, J. E. Wieselthier, and D. J. Baker, “A design concept for reliable mobile radio networks with frequency hopping signaling,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 75, no. 1, pp. 56–73, 1987.

- [35] Y. Liu, "Frequency hopping spread spectrum : An effective way to improve wireless communication performance," *Advanced Trends in Wireless Communications*, p. 187, 2011.
- [36] R. Zhi, L. Zhang, and Z. Zhou, "Cognitive frequency hopping," in *2008 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom 2008)*, pp. 1–4, IEEE, 2008.
- [37] M. Rahmanil, "Frequency hopping in cognitive radio networks : A survey," in *2015 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE)*, pp. 1–6, IEEE, 2015.
- [38] S. Kumar, V. S. Raghavan, and J. Deng, "Medium access control protocols for ad hoc wireless networks : A survey," *Ad hoc networks*, vol. 4, no. 3, pp. 326–358, 2006.
- [39] S. A. Saad, M. Ismail, and R. Nordin, "A survey on power control techniques in femtocell networks," *J. Commun.*, vol. 8, no. 12, pp. 845–854, 2013.
- [40] S. Lin, F. Miao, J. Zhang, G. Zhou, L. Gu, T. He, J. A. Stankovic, S. Son, and G. J. Pappas, "Atpc : Adaptive transmission power control for wireless sensor networks," *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, vol. 12, no. 1, pp. 1–31, 2016.
- [41] S. Haykin, "Cognitive radio : brain-empowered wireless communications," *IEEE journal on selected areas in communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, 2005.
- [42] T. V. Krishna and A. Das, "A survey on mac protocols in osa networks," *Computer Networks*, vol. 53, no. 9, pp. 1377–1394, 2009.
- [43] M. Kamruzzaman, N. I. Sarkar, and J. Gutierrez, "A dynamic algorithm for interference management in d2d-enabled heterogeneous cellular networks : Modeling and analysis," *Sensors*, vol. 22, no. 3, p. 1063, 2022.
- [44] S. Shamaei, S. Bayat, and A. M. A. Hemmatyar, "Interference management in d2d-enabled heterogeneous cellular networks using matching theory," *IEEE Transactions on mobile computing*, vol. 18, no. 9, pp. 2091–2102, 2018.
- [45] X. Liu, H. Xiao, and A. T. Chronopoulos, "Joint mode selection and power control for interference management in d2d-enabled heterogeneous cellular networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 9, pp. 9707–9719, 2020.
- [46] K. Navaie, "On the interference management in wireless multi-user networks," *Telecommunication Systems*, vol. 46, no. 2, pp. 135–148, 2011.
- [47] N. Gonzalez, A. Van Den Bossche, and T. Val, "Specificities of the loraTM physical layer for the development of new ad hoc mac layers," in *Ad-hoc, Mobile, and*

- Wireless Networks : 17th International Conference on Ad Hoc Networks and Wireless, ADHOC-NOW 2018, Saint-Malo, France, September 5-7, 2018. Proceedings 17*, pp. 163–174, Springer, 2018.
- [48] A. Ghaleb-Seddik, Y. Ghamri-Doudane, and S. M. Senouci, “Coupling loss and delay differentiation to enhance tcp performance within wireless multi-hop ad-hoc networks,” *Howard Journal of Communications*, vol. 7, no. 12, pp. 369–373, 2012.
- [49] Y. Peng, B. Tang, and M. Lü, “Fast method for spreading sequence estimation of dsss signal based on maximum likelihood function,” *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 21, no. 6, pp. 948–953, 2010.
- [50] F.-B. Lu, Z.-T. Huang, and W.-L. Jiang, “Blind estimation of spreading sequence of cdma signals based on fast-ica and performance analysis,” *Journal of China Institute of Communications*, vol. 32, no. 8, pp. 136–142, 2011.
- [51] W. Wang, Y. Wang, X.-Y. Li, W.-Z. Song, and O. Frieder, “Efficient interference-aware tdma link scheduling for static wireless networks,” in *Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 262–273, 2006.
- [52] L. Tassiulas and A. Ephremides, “Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum throughput in multihop radio networks,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 37, no. 12, pp. 1936–1948, 1992.
- [53] E. Plascencia, O. Shagdar, H. Guan, O. Barrois, and L. Chassagne, “Optical cdma mac evaluation in vehicle-to-vehicle visible light communications,” *Electronics*, vol. 11, no. 9, p. 1454, 2022.
- [54] S.-C. Kim and C.-W. Woo, “A scalability analysis of tdma-based ad hoc mac protocols,” in *Computational Science and Its Applications–ICCSA 2009 : International Conference, Seoul, Korea, June 29-July 2, 2009, Proceedings, Part I 9*, pp. 580–592, Springer, 2009.
- [55] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, “An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks,” *IEEE Transactions on wireless communications*, vol. 1, no. 4, pp. 660–670, 2002.
- [56] T.-H. Hsu and P.-Y. Yen, “Adaptive time division multiple access-based medium access control protocol for energy conserving and data transmission in wireless sensor networks,” *IET communications*, vol. 5, no. 18, pp. 2662–2672, 2011.
- [57] I. Demirkol, C. Ersoy, and F. Alagoz, “Mac protocols for wireless sensor networks : a survey,” *IEEE Communications magazine*, vol. 44, no. 4, pp. 115–121, 2006.

- [58] R. Yadav, S. Varma, N. Malaviya, *et al.*, “A survey of mac protocols for wireless sensor networks,” *UbiCC journal*, vol. 4, no. 3, pp. 827–833, 2009.
- [59] S. Kumar and S. Chauhan, “A survey on scheduling algorithms for wireless sensor networks,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 20, no. 5, pp. 7–13, 2011.
- [60] K. Chen, M. Ma, E. Cheng, F. Yuan, and W. Su, “A survey on mac protocols for underwater wireless sensor networks,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1433–1447, 2014.
- [61] T. Kaur and D. Kumar, “Tdma-based mac protocols for wireless sensor networks : A survey and comparative analysis,” in *2016 5th international conference on wireless networks and embedded systems (WECON)*, pp. 1–6, IEEE, 2016.
- [62] F. Ağgün, M. Çıbuk, and S. Ur-Rehman, “A new self-organizing multi-channel mac schema for rsu-centric vanets,” *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 551, p. 124098, 2020.
- [63] K. Sjoberg Bilstrup, E. Uhlemann, and E. G. Strom, “Scalability issues of the mac methods stdma and csma of ieee 802.11p when used in vanets,” in *2010 IEEE International Conference on Communications Workshops*, pp. 1–5, 2010.
- [64] U. A. Khan and S. S. Lee, “Multi-layer problems and solutions in vanets : A review,” *Electronics*, vol. 8, no. 2, p. 204, 2019.
- [65] M. Mohammadi, A. Balador, Z. Fernández, and I. Val, “Adaptive distributed beacon congestion control with machine learning in vanets,” in *2021 17th International Conference on Mobility, Sensing and Networking (MSN)*, pp. 766–771, IEEE, 2021.
- [66] C. Young, “Usap : a unifying dynamic distributed multichannel tdma slot assignment protocol,” in *Proceedings of MILCOM '96 IEEE Military Communications Conference*, vol. 1, pp. 235–239 vol.1, 1996.
- [67] C. Young, “Usap multiple access : dynamic resource allocation for mobile multihop multichannel wireless networking,” in *MILCOM 1999. IEEE Military Communications. Conference Proceedings (Cat. No.99CH36341)*, vol. 1, pp. 271–275 vol.1, 1999.
- [68] S. H. Supangkat *et al.*, “Survey on mac protocol of mobile ad hoc network for tactical data link system,” in *2022 International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI)*, pp. 134–137, IEEE, 2022.
- [69] F. Baccelli, B. Blaszczyszyn, and P. Muhlethaler, “An aloha protocol for multihop mobile wireless networks,” *IEEE transactions on information theory*, vol. 52, no. 2, pp. 421–436, 2006.

- [70] J. Bai and G. Ren, "Polarized mimo slotted aloha random access scheme in satellite network," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 26354–26363, 2017.
- [71] M. Ergen, D. Lee, R. Sengupta, and P. Varaiya, "Wtrp-wireless token ring protocol," *IEEE transactions on Vehicular Technology*, vol. 53, no. 6, pp. 1863–1881, 2004.
- [72] N. C. Strole, "The ibm token-ring network—a functional overview," *IEEE Network*, vol. 1, no. 1, pp. 23–30, 1987.
- [73] S. S. Lam, "A carrier sense multiple access protocol for local networks," *Computer Networks (1976)*, vol. 4, no. 1, pp. 21–32, 1980.
- [74] H. Wu, S. Cheng, Y. Peng, K. Long, and J. Ma, "Ieee 802.11 distributed coordination function (dcf) : analysis and enhancement," in *2002 IEEE International Conference on Communications. Conference Proceedings. ICC 2002 (Cat. No. 02CH37333)*, vol. 1, pp. 605–609, IEEE, 2002.
- [75] V. Garg, *Wireless communications & networking*. Elsevier, 2010.
- [76] G. Bianchi, L. Fratta, and M. Oliveri, "Performance evaluation and enhancement of the csma/ca mac protocol for 802.11 wireless lans," in *Proceedings of PIMRC'96-7th International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Communications*, vol. 2, pp. 392–396, IEEE, 1996.
- [77] S. Wu, W. Mao, and X. Wang, "Performance study on a csma/ca-based mac protocol for multi-user mimo wireless lans," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 6, pp. 3153–3166, 2014.
- [78] J. Peng and L. Cheng, "Revisiting carrier sense multiple access with collision avoidance (csma/ca)," in *2006 40th Annual Conference on Information Sciences and Systems*, pp. 1236–1241, IEEE, 2006.
- [79] J. H. Kim and J. K. Lee, "Performance of carrier sense multiple access with collision avoidance protocols in wireless lans," *Wireless Personal Communications*, vol. 11, no. 2, pp. 161–183, 1999.
- [80] J. Garcia-Luna-Aceves, "Carrier-sense multiple access with collision avoidance and detection," in *Proceedings of the 20th ACM international conference on modelling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pp. 53–61, 2017.
- [81] "Ieee 802.11 group web site." <https://grouper.ieee.org/groups/802/11/>.
- [82] L. Kleinrock and F. A. Tobagi, "Packet switching in radio channels : Part i - carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 23, pp. 1400–1416, 1975.

- [83] S. Jiang, J. Rao, D. He, X. Ling, and C. C. Ko, "A simple distributed prma for manets," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 51, no. 2, pp. 293–305, 2002.
- [84] K. Tokuda, M. Akiyama, and H. Fujii, "Dolphin for inter-vehicle communications system," in *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000 (Cat. No.00TH8511)*, pp. 504–509, 2000.
- [85] M. Miskowicz, M. Sapor, M. Zych, and W. Latawiec, "Performance analysis of predictive p-persistent csma protocol for control networks," *International Workshop on Factory Communication Systems*, Aug 2002.
- [86] I. C. S. L. M. S. Committee *et al.*, "Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications," *IEEE Std. 802.11-1997*, 1997.
- [87] N. Poojary, S. V. Krishnamurthy, and S. Dao, "Medium access control in a network of ad hoc mobile nodes with heterogeneous power capabilities," in *ICC 2001. IEEE International Conference on Communications. Conference Record (Cat. No. 01CH37240)*, vol. 3, pp. 872–877, IEEE, 2001.
- [88] T. Fujii, T. Takahashi, T. Bandai, T. Udagawa, and T. Sasase, "An efficient mac protocol in wireless ad-hoc networks with heterogeneous power nodes," in *The 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications*, vol. 2, pp. 776–780, IEEE, 2002.
- [89] E. Poon and B. Li, "Smartnode : Achieving 802.11 mac interoperability in power-efficient ad hoc networks with dynamic range adjustments," in *23rd International Conference on Distributed Computing Systems, 2003. Proceedings.*, pp. 650–657, IEEE, 2003.
- [90] E.-S. Jung and N. H. Vaidya, "A power control mac protocol for ad hoc networks," in *Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 36–47, 2002.
- [91] S.-J. Park and R. Sivakumar, "Load-sensitive transmission power control in wireless ad-hoc networks," in *Global Telecommunications Conference, 2002. GLOBECOM'02. IEEE*, vol. 1, pp. 42–46, IEEE, 2002.
- [92] "Ieee standard for telecommunications and information exchange between systems - lan/man specific requirements - part 15 : Wireless medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications for low rate wireless personal area networks (wpan)," *IEEE Std 802.15.4-2003*, pp. 1–680, 2003.

- [93] A. Ahmad and Z. Hanzálek, “An energy efficient schedule for ieee 802.15. 4/zigbee cluster tree wsn with multiple collision domains and period crossing constraint,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 1, pp. 12–23, 2017.
- [94] T.-J. Lee, H. R. Lee, and M. Y. Chung, “Mac throughput limit analysis of slotted csma/ca in ieee 802.15. 4 wpan,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 10, no. 7, pp. 561–563, 2006.
- [95] C. Y. Jung, H. Y. Hwang, D. K. Sung, and G. U. Hwang, “Enhanced markov chain model and throughput analysis of the slotted csma/ca for ieee 802.15. 4 under unsaturated traffic conditions,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 1, pp. 473–478, 2008.
- [96] B.-Y. Shih, C.-J. Chang, A.-W. Chen, and C.-Y. Chen, “Enhanced mac channel selection to improve performance of ieee 802.15. 4,” *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 6, no. 12, pp. 5511–5526, 2010.
- [97] A. Gezer and S. Okdem, “Improving ieee 802.15. 4 channel access performance for iot and wsn devices,” *Computers & Electrical Engineering*, vol. 87, p. 106745, 2020.
- [98] C.-s. Hwang and J. M. Cioffi, “Opportunistic csma/ca for achieving multi-user diversity in wireless lan,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 6, pp. 2972–2982, 2009.
- [99] J. Y. Ha, T. H. Kim, H. S. Park, S. Choi, and W. H. Kwon, “An enhanced csma-ca algorithm for ieee 802.15. 4 lr-wpans,” *IEEE Communications Letters*, vol. 11, no. 5, pp. 461–463, 2007.
- [100] M. Bertocco, G. Gamba, A. Sona, and S. Vitturi, “Performance measurements of csma/ca-based wireless sensor networks for industrial applications,” in *2007 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC 2007*, pp. 1–6, IEEE, 2007.
- [101] S. U. Rehman, S. Berber, and A. Swain, “Performance analysis of csma/ca algorithm for wireless sensor network,” in *TENCON 2010-2010 IEEE Region 10 Conference*, pp. 2012–2017, IEEE, 2010.
- [102] M. Cagalj, S. Ganeriwal, I. Aad, and J.-P. Hubaux, “On cheating in csma/ca ad hoc networks,” tech. rep., 2004.
- [103] B. Rankov and A. Wittneben, “Spectral efficient protocols for half-duplex fading relay channels,” *IEEE Journal on selected Areas in Communications*, vol. 25, no. 2, pp. 379–389, 2007.

- [104] S. Mohajer, S. N. Diggavi, C. Fragouli, and D. Tse, "Transmission techniques for relay-interference networks," in *2008 46th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, pp. 467–474, IEEE, 2008.
- [105] J. Chen, P. Elia, and R. Knopp, "Relay-aided interference neutralization for the multiuser uplink-downlink asymmetric setting," in *2011 IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings*, pp. 264–268, IEEE, 2011.
- [106] Z. Li, K. G. Shin, and L. Zhen, "When and how much to neutralize interference?," in *IEEE INFOCOM 2017-IEEE Conference on Computer Communications*, pp. 1–9, IEEE, 2017.
- [107] N. Lee and R. W. Heath Jr, "Advanced interference management technique : Potentials and limitations," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 3, pp. 30–38, 2016.
- [108] H. Zeng, X. Qin, X. Yuan, Y. Shi, Y. T. Hou, and W. Lou, "Cooperative interference neutralization in multi-hop wireless networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 2, pp. 889–903, 2017.
- [109] R. Hou, K.-S. Lui, and J. Li, "Scheduling in multihop wireless networks with zero-forcing precoding," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 12, pp. 5817–5830, 2015.
- [110] R. Naves, *Apport de la gestion des interférences aux réseaux sans-fil multi-sauts. Le cas du Physical-Layer Network Coding*. PhD thesis, 2018.
- [111] V. Menon and P. Selvaprabhu, "Blind interference alignment : A comprehensive survey," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 35, no. 8, p. e5116, 2022.
- [112] V. P. Vani, "Blind interference alignment simulation over rayleigh fading channel," in *2017 Ninth International Conference on Advanced Computing (ICoAC)*, pp. 46–50, IEEE, 2017.
- [113] J. G. Andrews, "Interference cancellation for cellular systems : a contemporary overview," *IEEE Wireless Communications*, vol. 12, no. 2, pp. 19–29, 2005.
- [114] P. Mitran, C. Rosenberg, and S. Shabdanov, "Throughput optimization in wireless multihop networks with successive interference cancellation," in *2011 Wireless Telecommunications Symposium (WTS)*, pp. 1–7, IEEE, 2011.
- [115] N. I. Miridakis and D. D. Vergados, "A survey on the successive interference cancellation performance for single-antenna and multiple-antenna ofdm systems," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 312–335, 2012.

- [116] J. Kim, D. Kim, and S. Yun, "Mitigating error propagation in successive interference cancellation," *IEICE transactions on communications*, vol. 89, no. 10, pp. 2956–2960, 2006.
- [117] P. Li, R. C. de Lamare, and J. Liu, "Adaptive decision feedback detection with parallel interference cancellation and constellation constraints for multiuser multi-input–multi-output systems," *IET Communications*, vol. 7, no. 6, pp. 538–547, 2013.
- [118] J. R. Sanchez, F. Rusek, O. Edfors, and L. Liu, "An iterative interference cancellation algorithm for large intelligent surfaces," *arXiv preprint arXiv:1911.10804*, 2019.
- [119] P. Raviteja, K. T. Phan, Y. Hong, and E. Viterbo, "Interference cancellation and iterative detection for orthogonal time frequency space modulation," *IEEE transactions on wireless communications*, vol. 17, no. 10, pp. 6501–6515, 2018.
- [120] C. Yang, X. Wang, B. Xia, and H. Ding, "Joint interference cancellation in cache- and sic-enabled networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 9, pp. 4155–4169, 2018.
- [121] T. Wu and X. Jing, "Exploration of multiple access interference suppression based on multi-user detection," *Chinese journal of electronics*, vol. 28, no. 4, pp. 835–840, 2019.
- [122] Q. He, T. Q. Quek, Z. Chen, Q. Zhang, and S. Li, "Compressive channel estimation and multi-user detection in c-ran with low-complexity methods," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 6, pp. 3931–3944, 2018.
- [123] L. Qu, J. He, and C. Assi, "Understanding the benefits of successive interference cancellation in multi-rate multi-hop wireless networks," *IEEE transactions on communications*, vol. 62, no. 7, pp. 2465–2477, 2014.
- [124] N. H. Mahmood, L. G. U. Garcia, P. Popovski, and P. E. Mogensen, "On the performance of successive interference cancellation in 5g small cell networks," in *2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1154–1159, IEEE, 2014.
- [125] Y. Liang, X. Li, J. Zhang, and Y. Liu, "A novel random access scheme based on successive interference cancellation for 5g networks," in *2017 IEEE wireless communications and networking conference (WCNC)*, pp. 1–6, IEEE, 2017.
- [126] N. Iswarya and L. Jayashree, "A survey on successive interference cancellation schemes in non-orthogonal multiple access for future radio access," *Wireless Personal Communications*, vol. 120, no. 2, pp. 1057–1078, 2021.

- [127] H. Li, C. Wu, D. Yu, Q.-S. Hua, and F. C. Lau, "Aggregation latency-energy tradeoff in wireless sensor networks with successive interference cancellation," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 24, no. 11, pp. 2160–2170, 2012.
- [128] P. Zhang, X. Ding, J. Xu, J. Wang, and L. Shi, "Successive interference cancellation based throughput optimization for multi-hop wireless rechargeable sensor networks," *Sensors*, vol. 20, no. 2, p. 327, 2020.
- [129] S. Hu and X. Wang, "Game theory on power control in wireless sensor networks based on successive interference cancellation," *Wireless Personal Communications*, vol. 111, pp. 33–45, 2020.
- [130] A. J. Paulraj, D. A. Gore, R. U. Nabar, and H. Bolcskei, "An overview of mimo communications—a key to gigabit wireless," *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, no. 2, pp. 198–218, 2004.
- [131] Q. Li, G. Li, W. Lee, M.-i. Lee, D. Mazzaresse, B. Clerckx, and Z. Li, "Mimo techniques in wimax and lte : a feature overview," *IEEE Communications magazine*, vol. 48, no. 5, pp. 86–92, 2010.
- [132] P. Hall and S. Vetterlein, "Review of radio frequency beamforming techniques for scanned and multiple beam antennas," in *IEE Proceedings H (Microwaves, Antennas and Propagation)*, vol. 137, pp. 293–303, IET, 1990.
- [133] G. Li, "Opportunities and challenges for mesh networks using directional antennas," *IEEE WiMesh 2005*, 2005.
- [134] S. Yi, Y. Pei, and S. Kalyanaraman, "On the capacity improvement of ad hoc wireless networks using directional antennas," in *Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pp. 108–116, 2003.
- [135] A. Spyropoulos and C. S. Raghavendra, "Capacity bounds for ad-hoc networks using directional antennas," in *IEEE International Conference on Communications, 2003. ICC'03.*, vol. 1, pp. 348–352, IEEE, 2003.
- [136] R. Ramanathan, "On the performance of ad hoc networks with beamforming antennas," in *Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pp. 95–105, 2001.
- [137] R. Ramanathan, J. Redi, C. Santivanez, D. Wiggins, and S. Polit, "Ad hoc networking with directional antennas : a complete system solution," *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 23, no. 3, pp. 496–506, 2005.

- [138] Y.-B. Ko, V. Shankarkumar, and N. H. Vaidya, "Medium access control protocols using directional antennas in ad hoc networks," in *Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No. 00CH37064)*, vol. 1, pp. 13–21, IEEE, 2000.
- [139] M. Asshad, S. A. Khan, A. Kavak, K. Küçük, and D. L. Msongaleli, "Cooperative communications using relay nodes for next-generation wireless networks with optimal selection techniques : A review," *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic engineering*, vol. 14, no. 5, pp. 658–669, 2019.
- [140] A. Nosratinia, T. E. Hunter, and A. Hedayat, "Cooperative communication in wireless networks," *IEEE communications Magazine*, vol. 42, no. 10, pp. 74–80, 2004.
- [141] J. N. Laneman, D. N. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks : Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Transactions on Information theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, 2004.
- [142] W. Zhuang and M. Ismail, "Cooperation in wireless communication networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 19, no. 2, pp. 10–20, 2012.
- [143] A. Scaglione, D. L. Goeckel, and J. N. Laneman, "Cooperative communications in mobile ad hoc networks," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 23, no. 5, pp. 18–29, 2006.
- [144] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Personal Communications*, vol. 6, pp. 311–335, 1998.
- [145] E. Telatar, "Capacity of multi-antenna gaussian channels," *European transactions on telecommunications*, vol. 10, no. 6, pp. 585–595, 1999.
- [146] Y. Yuan, Z. He, and M. Chen, "Virtual mimo-based cross-layer design for wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 55, no. 3, pp. 856–864, 2006.
- [147] A. K. Sadek, W. Su, and K. R. Liu, "Multinode cooperative communications in wireless networks," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 1, no. 55, pp. 341–355, 2007.
- [148] J. Jiang, *Virtual-mimo systems with compress-and-forward cooperation*. PhD thesis, University of Edinburgh, 2011.
- [149] S. Cho, B.-Y. Min, K. Huang, and D. K. Kim, "Virtual-mimo feedback and transmission for wireless ad hoc networks," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2016, no. 1, pp. 1–11, 2016.

- [150] P. Ju, W. Song, and D. Zhou, "Survey on cooperative medium access control protocols," *Iet Communications*, vol. 7, no. 9, pp. 893–902, 2013.
- [151] S. Zhang, S. C. Liew, and P. P. Lam, "Hot topic : Physical-layer network coding," in *Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 358–365, 2006.
- [152] S. C. Liew, S. Zhang, and L. Lu, "Physical-layer network coding : Tutorial, survey, and beyond," *Physical Communication*, vol. 6, pp. 4–42, 2013.
- [153] S. C. Liew, L. Lu, and S. Zhang, "A primer on physical-layer network coding," *Synthesis Lectures on Communication Networks*, vol. 8, no. 1, pp. 1–218, 2015.
- [154] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. Li, and R. W. Yeung, "Network information flow," *IEEE Transactions on information theory*, vol. 46, no. 4, pp. 1204–1216, 2000.
- [155] B. Rankov and A. Wittneben, "Spectral efficient signaling for half-duplex relay channels," in *Proc. Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, pp. 1066–1071, Citeseer, 2005.
- [156] B. Rankov and A. Wittneben, "Achievable rate regions for the two-way relay channel," in *2006 IEEE international symposium on information theory*, pp. 1668–1672, IEEE, 2006.
- [157] W. Liu, "Physical layer network coding schemes for two-way relay," in *2014 9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Sign (CSNDSP)*, pp. 710–715, IEEE, 2014.
- [158] S. Borade, L. Zheng, and R. Gallager, "Amplify-and-forward in wireless relay networks : Rate, diversity, and network size," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 53, no. 10, pp. 3302–3318, 2007.
- [159] S. Katti, S. Gollakota, and D. Katabi, "Embracing wireless interference : Analog network coding," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 37, no. 4, pp. 397–408, 2007.
- [160] S. Zhang, S. C. Liew, and L. Lu, "Physical layer network coding schemes over finite and infinite fields," in *IEEE GLOBECOM 2008 - 2008 IEEE Global Telecommunications Conference*, pp. 1–6, 2008.
- [161] B. Jiang, F. Gao, X. Gao, and A. Nallanathan, "Channel estimation and training design for two-way relay networks with power allocation," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 6, pp. 2022–2032, 2010.
- [162] B. Nazer and M. Gastpar, "Compute-and-forward : Harnessing interference through structured codes," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 57, no. 10, pp. 6463–6486, 2011.

- [163] Y. Tan, S. C. Liew, and T. Huang, "Mobile lattice-coded physical-layer network coding with practical channel alignment," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 17, no. 8, pp. 1908–1923, 2018. Publisher : IEEE.
- [164] R. Zamir, B. Nazer, Y. Kochman, and I. Bistriz, *Lattice Coding for Signals and Networks : A Structured Coding Approach to Quantization, Modulation and Multiuser Information Theory*. Cambridge University Press, 2014.
- [165] N. Sommer, M. Feder, and O. Shalvi, "Low-density lattice codes," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 54, no. 4, pp. 1561–1585, 2008.
- [166] Z. Lin, *Design of network coding schemes in wireless networks*. CRC Press, 2022.
- [167] S. J. Kim, N. Devroye, P. Mitran, and V. Tarokh, "Comparison of bi-directional relaying protocols," in *2008 IEEE Sarnoff Symposium*, pp. 1–5, 2008.
- [168] S. J. Kim, N. Devroye, P. Mitran, and V. Tarokh, "Achievable rate regions and performance comparison of half duplex bi-directional relaying protocols," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 57, no. 10, pp. 6405–6418, 2011.
- [169] W. Mao, X. Wang, A. Tang, and H. Qian, "Anc-era : Random access for analog network coding in wireless networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 15, no. 01, pp. 45–59, 2016.
- [170] X. Wang and W. Mao, "Analog network coding without restrictions on superimposed frames," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 24, no. 2, pp. 788–805, 2015.
- [171] E. Magli, M. Wang, P. Frossard, and A. Markopoulou, "Network coding meets multimedia : A review," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 15, no. 5, pp. 1195–1212, 2013.
- [172] R. Naves, H. Khalifé, G. Jakllari, V. Conan, and A.-L. Beylot, "A framework for evaluating physical-layer network coding gains in multi-hop wireless networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 18, no. 12, pp. 2725–2739, 2018.
- [173] Z. Zhao, Z. Ding, M. Peng, W. Wang, and K. K. Leung, "A special case of multi-way relay channel : When beamforming is not applicable," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 7, pp. 2046–2051, 2011.
- [174] T. Huang, J. Yuan, and Q. T. Sun, "Opportunistic pair-wise compute-and-forward in multi-way relay channels," in *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 4614–4619, IEEE, 2013.
- [175] W. Liu, "Joint channel coding network coding for multi-way relay systems," in *2016 SAI Computing Conference (SAI)*, pp. 615–621, IEEE, 2016.

- [176] M. Médard and A. Sprintson, *Network coding : Fundamentals and applications*. Academic Press, 2011.
- [177] S.-Y. Li, R. W. Yeung, and N. Cai, “Linear network coding,” *IEEE transactions on information theory*, vol. 49, no. 2, pp. 371–381, 2003.
- [178] S. Chachulski, M. Jennings, S. Katti, and D. Katabi, “Trading structure for randomness in wireless opportunistic routing,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 37, no. 4, pp. 169–180, 2007.
- [179] C. Zhang, C. Li, and Y. Chen, “Joint opportunistic routing and intra-flow network coding in multi-hop wireless networks : A survey,” *IEEE Network*, vol. 33, no. 1, pp. 113–119, 2018.
- [180] P. Ostovari and J. Wu, “Robust wireless transmission of scalable coded videos using two-dimensional network coding,” *Computer Networks*, vol. 95, pp. 115–126, 2016.
- [181] G. Kulkarni, R. Waghmare, R. Palwe, V. Waykule, H. Bankar, and K. Koli, “Cloud storage architecture,” in *2012 7th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA)*, pp. 76–81, IEEE, 2012.
- [182] H. Zhang, L. Zheng, and L. Cai, “Design and analysis of hierarchical physical layer network coding,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 12, pp. 7966–7981, 2017. Publisher : IEEE.
- [183] H. Zhang and L. Cai, “Design of channel coded heterogeneous modulation physical layer network coding,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 3, pp. 2219–2230, 2017. Publisher : IEEE.
- [184] W. Cui, C. Liu, H. Mosavat-Jahromi, and L. Cai, “Sigmix : Decoding superimposed signals for iot,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 4, pp. 3026–3040, 2020.
- [185] H. Wang, G. Wang, and B. Li, “Adaptive Transmission Combining Physical-Layer Network Coding and Successive Interference Cancellation for Two-Way Relay System,” in *ICCCSPS*, pp. 323–330, Springer, 2017.
- [186] L. Shi and S. C. Liew, “Complex linear physical-layer network coding,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 63, no. 8, pp. 4949–4981, 2017. Publisher : IEEE.
- [187] B. Li, X. Ding, H. Yang, G. Liu, and X. Peng, “Physical-layer network coding scheme over asymmetric Rayleigh fading two-way relay channels,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 23, no. 1, pp. 80–85, 2018. Publisher : Springer.
- [188] Z. Chen, P.-H. Ho, and L. Peng, “Optimal hybrid network coding scheme over two-way relaying,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 1, pp. 97–106, 2018. Publisher : IEEE.

- [189] H. Yang, B. Li, G. Liu, X. Liu, and X. Peng, "DNF-SC-PNC : A new physical-layer network coding scheme for two-way relay channels with asymmetric data length," *Wireless Networks*, vol. 25, no. 7, pp. 3727–3734, 2019. Publisher : Springer.
- [190] P. Chen, L. Shi, S. C. Liew, Y. Fang, and K. Cai, "Channel decoding for nonbinary physical-layer network coding in two-way relay systems," *IEEE TVT*, vol. 68, no. 1, pp. 628–640, 2018. Publisher : IEEE.
- [191] Y. You, Z. Xie, P. Chen, and Z. Lin, "Construction of Rate-Compatible Physical Layer Network Coding in Two-Way Relay Systems," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 24420–24429, 2019. Publisher : IEEE.
- [192] N. Sha, L. Chen, Y. Gao, M. Guo, and K. Xu, "Serially Concatenated CPM in Two-Way Relay Channels with Physical-Layer Network Coding," *IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. 102, no. 7, pp. 934–937, 2019. Publisher : The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers.
- [193] J. He, V. Tervo, X. Zhou, X. He, S. Qian, M. Cheng, M. Juntti, and T. Matsumoto, "A tutorial on lossy forwarding cooperative relaying," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 66–87, 2018. Publisher : IEEE.
- [194] V. Jeyalakshmi and S. T. Selvi, "Source compression in two-way two-relay network using compute-and-forward relaying," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 95, pp. 349–354, 2018. Publisher : Elsevier.
- [195] B. Li, H. Yang, G. Liu, and X. Peng, "The performance of physical-layer network coding in asymmetric Rayleigh fading two-way relay channels," *Mobile Networks and Applications*, vol. 23, no. 2, pp. 301–307, 2018. Publisher : Springer.
- [196] W. Liu, "A new channel coding network coding scheme for two-way relay," in *2015 Science and Information Conference (SAI)*, pp. 989–996, IEEE, 2015.
- [197] A. Mahdavi, A. Jamshidi, and A. Keshavarz-Haddad, "Selective physical layer network coding in bidirectional relay channel," *IET Communications*, vol. 11, no. 18, pp. 2691–2701, 2017. Publisher : IET.
- [198] Z. Wang, S. C. Liew, and L. Lu, "Noncoherent detection for physical-layer network coding," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 10, pp. 6901–6916, 2018. Publisher : IEEE.
- [199] A. Salim and T. M. Duman, "Exchange of correlated binary sources in two-way relay networks using LDPC codes," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 5, pp. 594–597, 2017. Publisher : IEEE.

- [200] S. Khosroazad, A. Abedi, and N. Neda, "On scalability of physical layer network coding with modulo-sum mapping over N-way relay channels," *International Journal of Communication Systems*, vol. 31, no. 11, p. e3596, 2018. Publisher : Wiley Online Library.
- [201] H. Zhang and L. Cai, "Bi-directional multi-hop wireless pipeline using physical-layer network coding," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 12, pp. 7950–7965, 2017. Publisher : IEEE.
- [202] R. Naves, G. Jakllari, H. Khalife, V. Conan, and A.-L. Beylot, "When analog meets digital : Source-encoded physical-layer network coding," *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 58, p. 101021, 2019.
- [203] C. Y. Ho and C. Y. Leow, "Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access With Physical Layer Network Coding," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 44894–44902, 2019. Publisher : IEEE.
- [204] X. J. Tan, W. Gao, and X. Zhang, "A novel two-way multihop relay scheme based on decode-and-forward and network coding," in *2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall)*, pp. 1–7, IEEE, 2020.
- [205] R. Naves, G. Jakllari, H. Khalifé, V. Conan, and A.-L. Beylot, "A physical-layer network coding aware distributed scheduling policy," in *2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pp. 1576–1581, IEEE, 2017.
- [206] Q. Yang, *Wireless communication by exploiting multi-user interference*. The Chinese University of Hong Kong (Hong Kong), 2015.
- [207] X. Dang, Q. Li, and X. Yu, "Symbol timing estimation for physical-layer network coding," *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 5, pp. 755–758, 2015. Publisher : IEEE.
- [208] Y. Shao, S. C. Liew, and L. Lu, "Asynchronous physical-layer network coding : Symbol misalignment estimation and its effect on decoding," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 10, pp. 6881–6894, 2017. Publisher : IEEE.
- [209] Y. Shao, D. Gunduz, and S. C. Liew, "Federated edge learning with misaligned over-the-air computation," *arXiv preprint arXiv:2102.13604*, 2021.
- [210] M. Hayashi, T. Wadayama, and Á. Vázquez-Castro, "Secure computation-and-forward with linear codes," *IEEE Journal on Selected Areas in Information Theory*, vol. 2, no. 1, pp. 139–148, 2021.
- [211] T. Issariyakul, E. Hossain, T. Issariyakul, and E. Hossain, *Introduction to network simulator 2 (NS2)*. Springer, 2009.

- [212] G. F. Riley and T. R. Henderson, "The ns-3 network simulator," *Modeling and tools for network simulation*, pp. 15–34, 2010.
- [213] E. Inc, "Universal software radio peripheral." <https://www.ettus.com>.
- [214] G. FSF, "Gnu radio - gnu fsf project." <https://www.gnuradio.org>.
- [215] L. Lu, L. You, Q. Yang, T. Wang, M. Zhang, S. Zhang, and S. C. Liew, "Real-time implementation of physical-layer network coding," in *Proceedings of the second workshop on Software radio implementation forum*, pp. 71–76, 2013.
- [216] L. You, S. C. Liew, and L. Lu, "Reliable physical-layer network coding supporting real applications," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 16, no. 8, pp. 2334–2350, 2017.
- [217] L. Lu, T. Wang, S. C. Liew, and S. Zhang, "Implementation of physical-layer network coding," *Physical Communication*, vol. 6, pp. 74–87, 2013.
- [218] K. H. Ngo and Q. T. Nguyen, "Implementation of network coding scheme in universal software radio peripheral," in *ICDV : The 5th International Conference on Integrated Circuits, Design, and Verification*, 2014.
- [219] N. K. Hoang, *SDR IMPLEMENTATION OF OFDM-BASED PHYSICAL LAYER NETWORK CODING*. PhD thesis, VIETNAM NATIONAL UNIVERSITY, HANOI UNIVERSITY OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY, 2014.
- [220] D. Kramarev, A. Sakzad, and E. Viterbo, "Implementation of a two-way relay network with compute-and-forward in gnu radio," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 27, no. 4, pp. 484–493, 2016.
- [221] T. T. T. Quynh, T. V. Khoa, L. Van Nguyen, and N. Linh-Trung, "Network coding with multimedia transmission : A software-defined-radio based implementation," in *2019 3rd International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing (SigTelCom)*, pp. 109–113, IEEE, 2019.
- [222] T. T. T. Quynh, N. K. Hoang, N. Van Ly, N. L. Trung, N. Q. Tuan, E. Bastug, S. Azarian, V. N. Q. Bao, T. X. Nam, M. Debbah, *et al.*, "Network coding with multimedia transmission and cognitive networking : An implementation based on software-defined radio," *REV Journal on Electronics and Communications*, vol. 10, no. 3-4, 2021.
- [223] Nuand, "bladerf." <https://www.nuand.com>.
- [224] Z. Shengli, S.-C. Liew, and P. P. Lam, "Physical layer network coding," *arXiv preprint arXiv:0704.2475*, 2007.

- [225] K. Samarasinghe, “Network coding with limited overhearing in wireless sensor networks,” 2011.
- [226] F. Gao, K. Xu, D. Zhang, and Y. Xu, “Wireless network coding via mac/phy : Design and implementation on usrp,” in *2014 IEEE International Wireless Symposium (IWS 2014)*, pp. 1–4, IEEE, 2014.
- [227] L. Silveira, R. M. Oliveira, M. V. Ribeiro, L. F. Vieira, M. A. Vieira, and A. B. Vieira, “Codeplc : A network coding mac protocol for power line communication,” in *2016 IEEE 41st conference on local computer networks (LCN)*, pp. 643–646, IEEE, 2016.
- [228] R. M. De Oliveira, L. F. M. Vieira, M. A. M. Vieira, and A. B. Vieira, “A dynamic network coding mac protocol for power line communication,” *Telecommunication Systems*, vol. 77, no. 2, pp. 359–375, 2021.
- [229] Q. F. Zhou, L. Zhao, M. Peng, X. Liu, and L. Fan, “Tdma-based cooperative nc mac scheme for two-way relaying networks,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 7123–7133, 2018.
- [230] A. Argyriou, “Mac protocol for wireless cooperative physical-layer network coding,” in *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1596–1601, IEEE, 2012.
- [231] S. Wang, Q. Song, X. Wang, and A. Jamalipour, “Distributed mac protocol supporting physical-layer network coding,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 5, no. 12, pp. 1023–1036, 2013.
- [232] Q. Hoang, T. Xuan Nam, and L.-T. Nguyen, “Cross-layer design of bidirectional-traffic supported cooperative mac protocol,” in *International Conference on Advanced Technologies for Communications*, vol. 2015, pp. 586–593, IEEE Computer Society, 2015.
- [233] Q. T. Hoang, “Phy-mac cross-layer cooperative protocol supporting physical-layer network coding,” 2020.
- [234] I. C. S. L. M. S. Committee *et al.*, “Wireless lan medium access control and physical layer specification,” *IEEE 802.11 Standard*, 1999.
- [235] S. Lam, “Delay analysis of a time division multiple access (tdma) channel,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 25, no. 12, pp. 1489–1494, 1977.
- [236] L. Lu and S. C. Liew, “Asynchronous physical-layer network coding,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 2, pp. 819–831, 2011.

- [237] Y. Huang, S. Wang, Q. Song, L. Guo, and A. Jamalipour, "Synchronous physical-layer network coding : A feasibility study," *IEEE transactions on wireless communications*, vol. 12, no. 8, pp. 4048–4057, 2013.
- [238] Y. Huang, Q. Song, S. Wang, and A. Jamalipour, "Phase-level synchronization for physical-layer network coding," in *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 4423–4428, IEEE, 2012.
- [239] Y. Chen, D. Haley, and Q. B. Nguyen, "Frequency offset compensation in physical-layer network coding systems," in *2013 Australian Communications Theory Workshop (AusCTW)*, pp. 146–151, IEEE, 2013.
- [240] D. Kramarev, *Practical physical layer network coding*. PhD thesis, Monash University, 2016.
- [241] O. Hotescu, K. Jaffrès-Runser, A. Van Den Bossche, and T. Val, "Synchronizing tiny sensors with sisp : a convergence study," in *Proceedings of the 20th ACM International Conference on Modelling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pp. 279–287, 2017.
- [242] S. Khosroazad, A. Abedi, and N. Neda, "On scalability of physical layer network coding with modulo-sum mapping over n-way relay channels," *International Journal of Communication Systems*, vol. 31, no. 11, p. e3596, 2018.
- [243] J. Yang, X. Shen, X. Cheng, and L. Yang, "Full space-time network code," in *2014 Sixth International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, pp. 1–6, IEEE, 2014.
- [244] A. Van den Bossche, T. Val, and R. Dalce, "Sisp : a lightweight synchronization protocol for wireless sensor networks," in *ETFA2011*, pp. 1–4, IEEE, 2011.
- [245] S. Krco and M. Dupcinov, "Improved neighbor detection algorithm for aodv routing protocol," *IEEE Communications Letters*, vol. 7, no. 12, pp. 584–586, 2003.
- [246] P. Roshan and J. Leary, *802.11 Wireless LAN fundamentals*. Cisco press, 2004.
- [247] A. Ganz and K. Wongthavarawat, "Ieee 802.11 wireless lan association procedure for multimedia applications," in *MILCOM 1999. IEEE Military Communications Conference Proceedings (Cat. No. 99CH36341)*, vol. 2, pp. 1287–1291, IEEE, 1999.
- [248] G. Athanasiou, T. Korakis, O. Ercetin, and L. Tassiulas, "Dynamic cross-layer association in 802.11-based mesh networks," in *IEEE INFOCOM 2007-26th IEEE International Conference on Computer Communications*, pp. 2090–2098, IEEE, 2007.
- [249] F. Serkin and N. Vazhenin, "Ushr platform for communication systems research," in *2013 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pp. 1–4, IEEE, 2013.

- [250] M. Ossmann, “hackrf.” <https://greatscottgadgets.com/sdr/>.
- [251] “Rtl-sdr.” <https://www.rtl-sdr.com>.
- [252] E. Research, “Usrp b210.” <https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/>.
- [253] A. DEVICES, “Adalm-pluto.” <https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/adalm-pluto.html#eb-overview>.
- [254] T. M. Schmidl and D. C. Cox, “Robust frequency and timing synchronization for ofdm,” *IEEE transactions on communications*, vol. 45, no. 12, pp. 1613–1621, 1997.
- [255] K. Bansal and V. Tripathi, “Ofdm transmission and reception of packets using gnu-radio and usrp-communications lab project,” 2012.
- [256] Pothosware, “Soapysdr.” <https://github.com/pothosware/SoapySDR>.
- [257] Pothosware, “Soapyuhd.” <https://github.com/pothosware/SoapyUHD>.
- [258] EttusResearch, “Uhd.” <https://github.com/EttusResearch/uhd/wiki>.
- [259] “Heterogeneous pnc implementation source code.” <https://cloud.irit.fr/index.php/s/yCYovJA7RJrBTqD>.
- [260] M. Gast, *802.11 wireless networks : the definitive guide*. ”O’Reilly Media, Inc.”, 2005.
- [261] A. Massouri, L. Cardoso, B. Guillon, F. Hutu, G. Villemaud, T. Risset, and J.-M. Gorce, “Cortexlab : An open fpga-based facility for testing sdr & cognitive radio networks in a reproducible environment,” in *2014 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pp. 103–104, 2014.
- [262] B. Bloessl, M. Segata, C. Sommer, and F. Dressler, “An ieee 802.11 a/g/p ofdm receiver for gnu radio,” in *Proceedings of the second workshop on Software radio implementation forum*, pp. 9–16, 2013.
- [263] B. Bloessl, M. Segata, C. Sommer, and F. Dressler, “gr-ieee802-11 : Ieee 802.11 a/g/p ofdm receiver for gnu radio,” 2013.
- [264] A. Gomes, “gr-macprotocols : Gnu radio csma/ca mac protocol,” 2018.
- [265] B. Bloessl, A. Puschmann, C. Sommer, and F. Dressler, “Timings matter : Standard compliant ieee 802.11 channel access for a fully software-based sdr architecture,” *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 18, no. 3, pp. 81–90, 2015.
- [266] O. A. Surti and J. Gomes, “Impact of high speed modulation technique on wireless network,” vol. 4, 2015.

-
- [267] J. S. Yeom, K. Ko, H. Jin, and B. C. Jung, "Performance analysis of physical-layer network coding with qpsk modulation in wireless iot networks," *ICT Express*, vol. 8, no. 3, pp. 419–423, 2022.
- [268] S. Wang, Q. Song, L. Guo, and A. Jamalipour, "Constellation mapping for physical-layer network coding with m-qam modulation," in *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 4429–4434, 2012.
- [269] F. Wang, Q. Song, S. Wang, and L. Guo, "Rate and power adaptation for physical-layer network coding with m-qam modulation," in *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 5508–5513, 2014.
- [270] H. Haboobi and M. R. Kadhum, "Impact study and evaluation of higher modulation schemes on physical layer of upcoming wireless mobile networks," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 10, no. 5, 2019.
- [271] H. Otsuka, R. Tian, and K. Senda, "Transmission performance of an ofdm-based higher-order modulation scheme in multipath fading channels," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 8, no. 2, p. 19, 2019.
- [272] P. K. Singya, P. Shaik, N. Kumar, V. Bhatia, and M.-S. Alouini, "A survey on design and performance of higher-order qam constellations," *arXiv preprint arXiv:2004.14708*, 2020.