



HAL
open science

Étude de relais multi-mode sous contrainte d'énergie dans un contexte de radio logicielle

Cédric Lévy-Bencheton

► **To cite this version:**

Cédric Lévy-Bencheton. Étude de relais multi-mode sous contrainte d'énergie dans un contexte de radio logicielle. Autre. INSA de Lyon, 2011. Français. NNT : 2011ISAL0047 . tel-00679722

HAL Id: tel-00679722

<https://theses.hal.science/tel-00679722>

Submitted on 16 Mar 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Thèse

Étude de relais multi-mode sous contrainte d'énergie dans un contexte de radio logicielle

Présentée devant

L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON

École Doctorale Infomaths

pour l'obtention du

GRADE DE DOCTEUR

Spécialité Informatique

par

Cédric LÉVY-BENCHETON

soutenue le 28 Juin 2011

Devant le jury composé de

Président :	Bruno ALLARD,	Professeur,	INSA de Lyon
Rapporteurs :	Laurent CLAVIER,	Maître de conférences,	TELECOM Lille 1
	Olivier SENTIEYS,	Professeur,	Université de Rennes
Examineurs :	Bruno ALLARD,	Professeur,	INSA de Lyon
	Cyril DECROZE,	Maître de conférences,	Université de Limoges
Directeurs :	Tanguy RISSET,	Professeur,	INSA de Lyon
	Guillaume VILLEMAUD,	Maître de conférences,	INSA de Lyon

Thèse effectuée au sein du Centre d'Innovation en Télécommunications et Intégration de Services (CITI)
de l'INSA de Lyon et de l'équipe Smart Wireless Networking (SWING) de l'INRIA Rhône-Alpes

INSA Direction de la Recherche - Ecoles Doctorales – Quinquennal 2011-2015

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	<u>CHIMIE DE LYON</u> http://www.edchimie-lyon.fr Insa : R. GOURDON	M. Jean Marc LANCELIN Université de Lyon – Collège Doctoral Bât ESCPE 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43 13 95 directeur@edchimie-lyon.fr
E.E.A.	<u>ELECTRONIQUE,</u> <u>ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE</u> http://edeea.ec-lyon.fr Secrétariat : M.C. HAVGOUDOUKIAN eea@ec-lyon.fr	M. Gérard SCORLETTI Ecole Centrale de Lyon 36 avenue Guy de Collongue 69134 ECULLY Tél : 04.72.18 60 97 Fax : 04 78 43 37 17 Gerard.scorletti@ec-lyon.fr
E2M2	<u>EVOLUTION, ECOSYSTEME,</u> <u>MICROBIOLOGIE, MODELISATION</u> http://e2m2.universite-lyon.fr Insa : H. CHARLES	Mme Gudrun BORNETTE CNRS UMR 5023 LEHNA Université Claude Bernard Lyon 1 Bât Forel 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cédex Tél : 04.72.43.12.94 e2m2@biomserv.univ-lyon1.fr
EDISS	<u>INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-</u> <u>SANTE</u> http://ww2.ibcp.fr/ediss Sec : Safia AIT CHALAL Insa : M. LAGARDE	M. Didier REVEL Hôpital Louis Pradel Bâtiment Central 28 Avenue Doyen Lépine 69677 BRON Tél : 04.72.68 49 09 Fax :04 72 35 49 16 Didier.revel@creatis.uni-lyon1.fr
INFOMATHS	<u>INFORMATIQUE ET</u> <u>MATHEMATIQUES</u> http://infomaths.univ-lyon1.fr	M. Johannes KELLENDONK Université Claude Bernard Lyon 1 LIRIS - INFOMATHS Bâtiment Nautibus 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72. 43.19.05 Fax 04 72 43 13 10 infomaths@bat710.univ-lyon1.fr
Matériaux	<u>MATERIAUX DE LYON</u>	M. Jean-Yves BUFFIERE Secrétaire : Mériem LABOUNE INSA de Lyon École Doctorale Matériaux Mérim LABOUNE Bâtiment Antoine de Saint-Exupéry 25bis Avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Tel : 04 72 43 71 70 Fax : 04 72 43 72 37 ed.materiaux@insa-lyon.fr
MEGA	<u>MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE</u> <u>CIVIL, ACOUSTIQUE (ED n°162)</u>	M. Philippe BOISSE Secrétaire : Mériem LABOUNE Adresse : INSA de Lyon École Doctorale MEGA Mérim LABOUNE Bâtiment Antoine de Saint-Exupéry 25bis Avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Tel : 04 72 43 71 70 Fax : 04 72 43 72 37 mega@insa-lyon.fr Site web : http://www.ed-mega.com
ScSo	<u>ScSo*</u> M. OBADIA Lionel Sec : Viviane POLSINELLI Insa : J.Y. TOUSSAINT	M. OBADIA Lionel Université Lyon 2 86 rue Pasteur 69365 LYON Cedex 07 Tél : 04.78.69.72.76 Fax : 04.37.28.04.48 Lionel.Obadia@univ-lyon2.fr

Remerciements

Je tiens à remercier Laurent CLAVIER et Olivier SENTIEYS d'avoir pris le temps de rapporter cette thèse, et de m'avoir prodigué leurs conseils et leurs remarques.

Je remercie également Bruno ALLARD et Cyril DECROZE d'avoir accepté d'être membre de mon Jury de thèse.

Je n'oublie pas mes encadrants, Guillaume VILLEMAUD et Tanguy RISSET, que je remercie chaleureusement de m'avoir guidé tout au long de ma recherche, en ouvrant de nouvelles perspectives et en me permettant d'arriver à l'aboutissement de ce travail dans des conditions idéales.

Je pense aussi à mes collègues du Laboratoire CITI et de l'INSA, actuels et anciens. Ils se reconnaîtront. Sans oublier mes étudiants, qui m'ont permis d'apprécier l'enseignement à sa juste valeur.

Je remercie mes parents, mon frère, ma sœur et plus particulièrement Emmanuelle pour leur présence de tous les jours.

Résumé

La réduction d'énergie apparaît comme un besoin crucial dans les télécommunications modernes, tant au niveau des terminaux que des réseaux. Dans les réseaux modernes, un terminal peut se connecter à Internet via d'autres terminaux ou infrastructures à proximité, appelés relais. Bien que les relais offrent une solution intéressante pour limiter la puissance de transmission des terminaux, il n'est pas simple de garantir une réduction de la consommation d'énergie globale. Il devient alors nécessaire de développer des outils pour évaluer et quantifier la consommation d'énergie.

Un terminal moderne dispose de plusieurs interfaces de communications, ce qui lui permet d'utiliser plusieurs standards. Sachant qu'un standard dispose de différents modes de communications, un terminal est multi-mode lorsqu'il possède cette capacité à communiquer sur les différents standards et modes disponibles. Nous nous sommes alors intéressés à l'utilisation du multi-mode dans le cadre des relais. Nous nous positionnons dans un contexte de radio logicielle, où la couche physique d'un terminal est représentée par des blocs programmables, ce qui facilite l'implémentation du multi-mode. Afin d'estimer la consommation d'énergie d'une radio logicielle, nous avons calculé la complexité algorithmique pour les couches physiques du 802.11g (ou Wi-Fi), de l'UMTS et du 802.15.4 (ou Zigbee).

Dans cette thèse, nous avons développé des outils nous permettant d'évaluer l'intérêt d'un relais multi-mode dans la réduction d'énergie. Nous avons proposé un modèle d'énergie réaliste pour le multi-mode, qui prend en compte la couche d'accès au medium des protocoles considérés. Dans un but de réalisme accru, nous avons implémenté le multi-mode au sein de WSNNet, un simulateur réseau précis, grâce auquel nous avons déterminé les paramètres ayant un impact sur la consommation d'énergie. Puis, nous avons proposé et validé des stratégies permettant de minimiser l'influence de ces paramètres.

Suite à cela, nous avons évalué l'apport du multi-antenne au sein d'un relais multi-mode, toujours dans le but de réduire la consommation d'énergie. Après avoir modifié notre modèle d'énergie et notre simulateur réseau pour y intégrer le multi-antenne, nous avons évalué les gains énergétiques du multi-antenne pour un lien de communication, puis pour un relais multi-mode.

Mots clés : consommation d'énergie, relais, multi-mode, multi-antenne, radio logicielle

Abstract

Energy reduction appears as a crucial need in modern telecommunications, be it for the terminals or the network. In modern networks, a terminal can connect to the Internet through other terminals or infrastructures in their proximity, called relays. Even though these relays appear as an interesting solution by limiting the terminals transmission power output, the reduction of energy consumption is not a simple task to ensure. Hence, it becomes necessary to develop adapted tools in order to evaluate and quantify the energy consumption.

A modern terminal features several communication interfaces, which allows it to use different standards. With each standard featuring different communication modes, a multi-mode terminal has the capacity to communicate on these different modes and standard available. Hence, we have been studying how this multi-mode property can lead to energy reduction in combination with relaying. Our study is realized in the context of software defined radio, in which the physical layer is represented by programmable software blocks. Thus, software defined radio allows an eased implementation of multi-mode. In order to estimate the energy consumption of a software defined radio, we have evaluated the algorithmic complexity for the physical layers of the following standards : 802.11g (or Wi-Fi), UMTS and 802.15.4 (or Zigbee).

In this thesis, we have developed the tools to evaluate the energy consumption of a multi-mode relay. Firstly, we have proposed a realistic energy model for multi-mode, which takes into account the media access control layer of the protocols studied. In order to increase realism, we have implemented multi-mode in WSN_{et}, a precise network simulator, which we have used to determine the parameters impacting the energy consumption. Then, we have proposed and validated different strategies allowing us to minimize the influence of these parameters.

On a second hand, we have evaluated the combination of multi-antenna and a multi-mode relay, with the purpose to reduce the energy consumption. We have modified our energy model and our network simulator to integrate multi-antenna, and we have evaluated the gains brought by multi-antenna to both a communication link and a multi-mode relay.

Keywords : energy consumption, relay, multi-mode, multi-antenna, software defined radio

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Problématique des réseaux de communication modernes	1
1.1.1	Postulat	1
1.1.2	Quelques solutions intéressantes	2
1.2	But de la thèse	2
1.2.1	Aspects étudiés	3
1.2.2	Outils développés	3
2	État de l'art	5
2.1	Présentation des réseaux modernes	5
2.1.1	Qu'est-ce qu'une communication moderne ?	6
2.1.2	Quelles évolutions pour des réseaux intelligents ?	21
2.2	Réduction de la consommation dans les communications modernes	24
2.2.1	Idées générales pour des réseaux à faible consommation	24
2.2.2	Réduction de la consommation grâce aux relais	26
2.2.3	Présentation du multi-mode pour réduire la consommation d'énergie	30
2.2.4	Plusieurs pistes pour réduire l'énergie grâce au multi-antenne	32
2.2.5	Impact énergétique des radios logicielles	34
3	Méthodologie suivie	39
3.1	Présentation du problème	39
3.1.1	Contexte d'étude	40
3.1.2	Apports de la thèse	41
3.2	Évaluation analytique de la consommation d'énergie par bit	42
3.2.1	Modèle d'énergie réaliste pour le multi-mode	43
3.2.2	Évaluation de l'énergie numérique d'un mode	43
3.2.3	Évaluation de l'énergie radio d'un mode	44
3.2.4	Modèles de canaux utilisés	44
3.2.5	Adaptation de la puissance d'émission	47
3.3	Évaluation analytique de la consommation d'un terminal multi-mode	48
3.3.1	Calcul de la consommation pour un terminal multi-mode	48
3.3.2	Évaluation de la consommation d'un scénario	48
3.4	Simulations réseaux pour un réalisme accru	49
3.4.1	Prise en compte de la couche MAC	49
3.4.2	Présentation de WSNets	51
3.4.3	Discussion sur l'apport des simulations réseaux	54
3.5	Synthèse	54

4	Étude de la complexité d'un terminal radio logicielle	57
4.1	Complexité algorithmique d'un terminal radio logicielle	57
4.1.1	Impact de l'architecture	57
4.1.2	Impact de l'implémentation	58
4.1.3	Étude de la complexité des standards cibles	59
4.2	Évaluation de la consommation d'énergie d'un mode	68
4.2.1	Présentation du terminal choisi	68
4.2.2	Évaluation de la consommation pour un lien de communication	68
5	Réduction d'énergie grâce au multi-mode	73
5.1	Présentation des scénarios	73
5.1.1	Définition des termes employés	74
5.1.2	Calcul de l'énergie globale du réseau pour les scénarios choisis	75
5.2	Simulations Matlab	76
5.2.1	Présentation des résultats	76
5.2.2	Intérêt d'une prise en compte de la couche MAC	82
5.3	Intégration du multi-mode dans un simulateur réseau	83
5.3.1	Paramètres importants pour réaliser un simulateur multi-mode	83
5.3.2	Implémentation du multi-mode dans WSNNet	85
5.4	Simulations réseaux	89
5.4.1	Influence de différents paramètres	90
5.4.2	Contrôle de puissance	95
5.4.3	Suppression de l'écoute passive	96
5.5	Synthèse	97
6	Réduction d'énergie grâce au multi-antenne	101
6.1	Modèle d'énergie réaliste pour un terminal multi-antenne et multi-mode	101
6.1.1	Présentation d'un terminal multi-antenne	102
6.1.2	Calcul du Taux d'Erreur Binaire	103
6.1.3	Énergie numérique	104
6.1.4	Énergie radio	105
6.2	Intégration du multi-antenne dans un simulateur réseau	105
6.2.1	Communications et nœuds multi-antenne	105
6.2.2	Communication multi-antenne dans WSNNet	106
6.3	Étude de la consommation d'énergie d'un lien multi-antenne	109
6.3.1	Prise en compte des retransmissions	109
6.3.2	Comparaison entre le multi-antenne et le mono-antenne	109
6.4	Réduction de l'énergie du réseau grâce à un relais multi-antenne multi-mode	112
6.4.1	Rappel des scénarios	112
6.4.2	Consommation d'un relais multi-antenne multi-mode	112
6.4.3	Augmentation du nombre de voisins	114
6.4.4	Prise en compte des interférences	119
7	Conclusion	125
7.1	Synthèse	125
7.2	Perspectives	127
7.2.1	Perspectives à court terme	127

Table des matières

7.2.2	Proposition d'algorithmes de reconfiguration d'un terminal	128
7.2.3	Relais coopératif	128
7.2.4	Les évolutions futures des terminaux	129

Table des figures

2.1	Architecture d'un terminal radio	7
2.2	Exemples de constellations pour différentes modulations	9
2.3	Techniques de transmissions	10
2.4	Un relais de communication	12
2.5	Possibilités de communications d'un terminal multi-mode	14
2.6	Types de communications multi-antenne	16
2.7	Structure d'une radio logicielle multi-mode	20
2.8	Évolution de la capacité des batteries et du poids des téléphones	23
3.1	Modèles d'atténuation du canal en 802.11g et 802.15.4	47
3.2	Transmission de données avec prise en compte de la couche MAC	49
3.3	Processus de communication en CSMA/CA	50
3.4	Exemple de configuration multi-mode sous WSNNet	52
4.1	Bande de Base du 802.11g	59
4.2	Bande de Base de l'UMTS	62
4.3	Bande de Base du 802.15.4	66
4.4	Évaluation détaillée de E_{bit} (en Joule par bit)	69
5.1	Représentation schématique des scénarios étudiés	74
5.2	Consommation globale d'énergie normalisée en 802.11g-vers-UMTS, pour 1 SU	77
5.3	Consommation globale d'énergie en 802.11g-vers-UMTS, pour u SUs	79
5.4	Règles de relais et « Zone de Non-Relais »	80
5.5	Consommation globale d'énergie en 802.15.4-vers-802.11g, pour 1 SU (Matlab)	81
5.6	Structure d'un bundle multi-mode (terminal) sous WSNNet	87
5.7	Consommation globale d'énergie en 802.15.4-vers-802.11g, pour 1 SU (WSNet)	91
5.8	Avec évanouissement de Rayleigh, pour 1 SU (WSNet)	93
5.9	Résultats de simulations WSNNet : Consommation pour $u = 3, 5$ et 7 SUs	93
5.10	Consommation pour u SUs, puissance des paquets de contrôle limitée (WSNet)	95
5.11	Consommation pour u SUs, interface inactive désactivée (WSNet)	97
6.1	Représentation d'un terminal multi-antenne MIMO	102
6.2	Évaluation du Taux d'Erreur Binaire en fonction du Rapport Signal à Bruit	103
6.3	Canaux indépendants dans une communication multi-antenne	105
6.4	Exemple de réplification des données sous WSNNet en MIMO	107
6.5	Matrice des interférences sous WSNNet	108
6.6	Gestion des interférences sous WSNNet	108
6.7	Retransmission MAC entre deux terminaux τ_s et τ_d	109
6.8	Consommation d'un terminal sur un lien de communication MIMO	111
6.9	Comparaison de E_{global} , en MIMO et SISO, pour $u = 1$ SU (WSNet)	113

Table des figures

6.10	Comparaison de E_{global} , en MIMO et SISO, pour $u = 3, 7$ SUs (WSNet) . . .	115
6.11	Comparaison de E_{global} , en MIMO, stratégie d'écoute passive MISO (WSNet)	116
6.12	Comparaison de E_{global} , en MIMO, interface inactive désactivée (WSNet) . .	118
6.13	Zone d'interférences entre deux réseaux A et B	120
6.14	Représentation schématique du scénario avec interférences sous WSNet	121
6.15	Comparaison de E_{global} avec et sans interférences pour $u = 5$ SUs	122

Liste des tableaux

2.1	Caractéristiques de la couche physique des standards choisis	11
4.1	Caractéristiques de la couche physique 802.11g [1]	60
4.2	Complexité algorithmique pour des modes 802.11g, en opérations par bit . . .	61
4.3	Caractéristiques de la couche physique UMTS dans le sens montant [2]	63
4.4	Complexité algorithmique pour des modes UMTS, en opérations par bit	65
4.5	Caractéristiques de la couche physique 802.15.4 [3]	66
4.6	Complexité algorithmique du 802.15.4 à 20 kbps, en opérations par bit	67
4.7	Paramètres à considérer dans la consommation d'énergie	68
5.1	Exemple d'une table de routage (extrait)	86
5.2	Paramètres de simulation WSNNet	90
6.1	Rappel des paramètres énergétiques des terminaux pour les modes choisis . .	110
6.2	Nombre d'opérations par bits pour une couche physique MIMO à 2 antennes	110
6.3	Consommation numérique pour un terminal MIMO à 2 antennes (nJ/bit) . .	110

Introduction

1.1	Problématique des réseaux de communication modernes	1
1.1.1	Postulat	1
1.1.2	Quelques solutions intéressantes	2
1.2	But de la thèse	2
1.2.1	Aspects étudiés	3
1.2.2	Outils développés	3

1.1 Problématique des réseaux de communication modernes

1.1.1 Postulat

L'utilisation d'Internet revêt une importance prépondérante dans la vie de tous les jours. Depuis peu, l'essor de la mobilité en a grandement modifié les usages : Internet prend alors le rôle d'un outil dédié au travail, à la communication, au divertissement, tout en demeurant une source d'information universelle privilégiée. Partant de ce postulat, les constructeurs ont mis sur le marché des terminaux mobiles toujours plus puissants, véritables outils à tout faire. L'utilisation de ces terminaux mobiles connaît une forte croissance, notamment poussée par le développement d'applications reposant sur une connexion permanente.

Ce constat est fortement lié au déploiement des réseaux de communication modernes, qui offrent à l'utilisateur un débit proche des connexions fixes. Ces réseaux fournissent une connexion rapide, toujours disponible, afin de répondre aux besoins des utilisateurs. Pourtant, quelques problèmes subsistent. L'utilisation d'un réseau est conditionnée par la présence d'un point d'accès, et nécessite souvent l'abonnement à un opérateur. De même, le besoin d'être connecté en permanence est restreint par l'énergie limitée des terminaux mobiles. Les progrès technologiques récents essayent de répondre à cette problématique, en proposant des processeurs basse consommation et des batteries à la capacité toujours plus élevée, mais l'augmentation de la puissance des terminaux et de leurs usages n'entraîne pas automatiquement une réduction de la consommation d'énergie.

1 Introduction

Ainsi, nous résumons notre problématique par la question suivante : « Comment garantir une consommation d'énergie réduite tout en prenant en compte les contraintes de mobilité et de connectivité des réseaux modernes ? ».

1.1.2 Quelques solutions intéressantes

Depuis plusieurs années, la recherche vise à améliorer les communications mobiles. Nous présentons quelques solutions existantes qui proposent des réponses à la problématique des réseaux modernes, à savoir : la connectivité et la consommation.

Les relais Les *relais* proposent d'utiliser des communications multi-saut pour se connecter à Internet. Les relais peuvent prendre la forme d'infrastructures déployées, ou de communications ad-hoc avec d'autres utilisateurs mobiles. D'un point de vue de la connectivité, le relais augmente la portée des communications et donc, le nombre d'utilisateurs potentiels.

De plus, les relais visent à réduire la consommation d'énergie des terminaux mais aussi du réseau. En se positionnant à proximité des utilisateurs, la puissance de transmission s'en trouve réduite. Les utilisateurs augmentent leur autonomie, tandis que les opérateurs font des économies sur leur consommation énergétique.

Le multi-mode Les terminaux mobiles actuels ont la possibilité de communiquer sur plusieurs standards, ou modes, comme l'UMTS et le 802.11g par exemple. Ces terminaux sont appelés *multi-mode*. Chaque mode possède ses propres caractéristiques, comme la capacité ou la consommation d'énergie. Il est alors possible de choisir le mode de communication en fonction de critères permettant d'optimiser le débit, l'énergie, etc.

Le multi-antenne Les nouveaux protocoles de communication sont exploités par des terminaux disposant de plusieurs antennes pour atteindre un débit élevé. De plus, l'utilisation du multi-antenne augmente la portée des communications. Couplés à la mobilité, ces avantages répondent aux problématiques de capacité et de connectivité, et participent à l'amélioration des conditions de communication. Il devient alors envisageable d'utiliser le multi-antenne pour réduire la consommation d'énergie.

1.2 But de la thèse

Dans cette thèse, nous nous intéressons à réduire la consommation d'énergie de la couche physique en combinant plusieurs technologies existantes. Nous étudions l'impact des terminaux multi-mode sur la consommation d'énergie d'un relais, de la manière la plus réaliste possible. Puis, nous nous intéressons à la combinaison du multi-mode et du multi-antenne

au sein d'un relais. Pour cela, nous commençons par étudier la consommation d'énergie d'un terminal, puis d'un réseau en fonction de scénarios prédéfinis. Nous développons des outils essentiels à l'évaluation réaliste de la consommation d'énergie : un modèle d'énergie adapté au multi-mode et au multi-antenne, ainsi que l'intégration de ce modèle dans un simulateur réseau.

1.2.1 Aspects étudiés

Consommation d'un terminal Nous proposons d'utiliser le concept de « *Radio Logicielle* » (noté RL) pour représenter les terminaux multi-mode. Une radio logicielle se compose d'une partie numérique et d'une partie analogique. La partie numérique d'un terminal radio logicielle est représentée par un processeur générique programmable, utilisé pour implémenter la couche physique d'un protocole. La partie analogique, ou radio, est représentée par le frontal radio-fréquence, qui permet de transmettre et recevoir les signaux analogiques dans l'environnement. Ce frontal est le plus souvent agile en fréquence, ce qui permet son utilisation au sein de plusieurs modes. Le concept de radio logicielle offre donc une flexibilité intéressante quant à l'implémentation des différents modes sous la forme de composants programmables et réutilisables. Nous étudions alors la consommation d'énergie d'un terminal RL pour différents modes. Nous choisissons d'étudier les consommations de l'UMTS, du 802.11g et du 802.15.4 afin de disposer d'un panel de solutions complémentaires.

Consommation d'un relais Après avoir étudié la consommation de chaque mode au niveau d'un terminal, nous nous intéressons à un lien de communication. Puis nous présentons des scénarios simples afin d'identifier avec discernement les paramètres influençant la consommation d'énergie d'un réseau. Ces scénarios nous autorisent à comparer la consommation d'énergie d'un relais par rapport à des connexions directes, en considérant des terminaux multi-mode et/ou multi-antenne.

1.2.2 Outils développés

Modèle d'énergie réaliste Dans un premier temps, nous proposons une méthodologie d'évaluation réaliste de la consommation d'énergie d'un terminal pour un mode. Cette évaluation explore la consommation d'un terminal RL, tant du point de vue numérique qu'analogique. Elle prend en compte l'évaluation de la complexité algorithmique pour un terminal RL multi-mode. Ce modèle d'énergie réaliste permet aussi de comparer différents modes de communication d'un point de vue énergétique. Il prend en compte le multi-mode et le multi-antenne, et permet d'évaluer la consommation d'énergie de différents scénarios.

1 Introduction

Implémentation dans un simulateur réseau Notre étude suit deux approches. Dans un premier temps, une approche analytique modélise l'énergie d'une communication au sein d'un mode. Dans un second temps, la prise en compte de la couche MAC augmente le réalisme dans l'évaluation de l'énergie. Dans ce but, nous utilisons un simulateur réseau, qui offre une implémentation aisée de la couche MAC. Nous implémentons des composantes multi-mode et multi-antenne au sein d'un simulateur réseau, en expliquant les points clés de ces développements. Puis, le comportement des scénarios est étudié au travers de ces simulations réseaux.

Plan de la thèse Cette thèse s'organise comme suit : le chapitre 2 présente un état de l'art des technologies utilisées, notamment les recherches visant à réduire la consommation d'énergie. Le chapitre 3 présente la méthodologie suivie, et introduit un modèle d'énergie réaliste pour le multi-mode. Le chapitre 4 étudie la complexité de l'UMTS, du 802.11g et du 802.15.4 pour un terminal radio logicielle. Il estime aussi la consommation d'un lien de communication dans chacun de ces modes. Le chapitre 5 évalue la consommation globale d'énergie d'un relais multi-mode, après une présentation des scénarios étudiés. Il définit des règles permettant d'optimiser la consommation, puis se concentre sur le développement d'un simulateur multi-mode dans le but d'augmenter le réalisme des simulations, avec une prise en compte de la couche MAC. Les résultats de simulations évaluent l'impact de différentes stratégies sur la consommation d'énergie d'un relais multi-mode. Le chapitre 6 s'intéresse au multi-antenne. Après avoir présenté une adaptation du modèle d'énergie au multi-antenne, il s'intéresse aux spécificités d'une implémentation du multi-antenne au sein d'un simulateur réseau. Puis il évalue l'impact du multi-antenne sur un lien de communication, puis sur un relais multi-mode. Finalement, le chapitre 7 conclut et présente quelques perspectives à ce travail.

2.1	Présentation des réseaux modernes	5
2.1.1	Qu'est-ce qu'une communication moderne?	6
2.1.1.1	Description technologique	7
2.1.1.2	Qu'est-ce qu'un relais?	11
2.1.1.3	Qu'est-ce que le multi-mode?	14
2.1.1.4	Qu'est-ce que le multi-antenne?	16
2.1.1.5	Qu'est-ce que la radio logicielle?	19
2.1.2	Quelles évolutions pour des réseaux intelligents?	21
2.1.2.1	Vers une convergence technologique	21
2.1.2.2	Un besoin de réduire la consommation d'énergie	22
2.2	Réduction de la consommation dans les communications modernes	24
2.2.1	Idées générales pour des réseaux à faible consommation	24
2.2.2	Réduction de la consommation grâce aux relais	26
2.2.2.1	Évaluation de la consommation d'énergie des relais	26
2.2.2.2	Comment relayer pour réduire la consommation?	28
2.2.3	Présentation du multi-mode pour réduire la consommation d'énergie	30
2.2.3.1	Quelques architectures multi-mode à faible consommation	30
2.2.3.2	Scénarios bénéficiant du multi-mode	31
2.2.3.3	Apport des relais multi-mode dans la réduction d'énergie	32
2.2.4	Plusieurs pistes pour réduire l'énergie grâce au multi-antenne	32
2.2.4.1	Réduction de la consommation d'un terminal multi-antenne	33
2.2.4.2	Réduction de la consommation d'un relais multi-antenne	33
2.2.5	Impact énergétique des radios logicielles	34
2.2.5.1	Architectures logicielles basse consommation	34
2.2.5.2	Radio logicielle multi-mode et réduction d'énergie	35

2.1 Présentation des réseaux modernes

Aujourd'hui, les télécommunications prennent une part importante dans nos vies. Elles nous permettent de rester en contact à tout moment, de travailler, de se distraire... Pourtant, cette utilisation n'est pas sans générer de nouveaux problèmes. Cette partie présente quelques

technologies et architectures employées dans les réseaux modernes. Elle introduit plusieurs problématiques qui sont au cœur de cette thèse.

2.1.1 **Qu'est-ce qu'une communication moderne ?**

L'usage des télécommunications est en perpétuelle évolution. Les avancées au cours des dernières décennies ont rendu possible l'utilisation de terminaux mobiles haut débit, aux capacités de calcul se rapprochant des ordinateurs fixes. Dans cette partie, nous nous plaçons au niveau d'un utilisateur et de son terminal radio.

Une communication mobile à haut débit Aujourd'hui, il est possible d'utiliser une connexion à Internet sans contrainte de lieu ni de temps. Pour Neil Reid, responsable du développement chez Cisco, les communications mobiles ont changé sa vision du monde au cours de la dernière décennie [4]. En effet, la mobilité est entrée au cœur des usages quotidiens, tant dans nos vies privées que professionnelles. Cette évolution a engendré des gains économiques substantiels tant pour les opérateurs et fournisseurs d'accès que pour les entreprises, qui ont bénéficié d'un regain de productivité. Pour Reid, cette tendance est en plein essor, avec un nombre toujours plus conséquent d'appareils utilisant les communications sans fil.

Cependant, la généralisation des communications sans fil entraîne une dégradation de la qualité de ces dernières. En effet, plus le nombre d'utilisateurs augmente, plus le débit par utilisateur est faible. Pour répondre à ces contraintes, les recherches actuelles tentent de prédire l'évolution des mœurs des utilisateurs, qui possèdent des terminaux toujours plus puissants. Les usages actuels demandent une connexion toujours disponible, avec une qualité de service proche d'une connexion fixe, malgré des contraintes de mobilité. Il est alors important de concilier les attentes des utilisateurs aux exigences des opérateurs, qui cherchent à réduire leurs coûts liés aux télécommunications, sans dégrader la qualité du service proposé.

Nous pouvons donc considérer qu'une communication moderne est mobile, potentiellement à haut débit et avec une très grande disponibilité. Toutes ces garanties ont un coût : financier certes, mais aussi énergétique. Financier de par les technologies employées, qui demandent des délais de développement, de production et de maintenance de plus en plus importants. Financier aussi de par leur coût opérationnel, qui fait appels à la fois à des ressources humaines et informatiques, mais surtout à une consommation toujours plus élevée d'énergie.

Apport des nouvelles technologiques Nombre d'inconvénients mettent en péril les communications mobiles à haut débit : distorsion du signal à cause des effets Doppler, chemins multi-trajets, interférences. Pour y remédier, les recherches menées dans les domaines du traitement du signal et de la théorie de l'information proposent des solutions pour réduire le taux d'erreur des communications à haut débit.

Du côté de l'industrie, les vingt dernières années ont vu éclore des évolutions majeures au niveau matériel, avec des architectures radio et des processeurs toujours plus puissants, de taille toujours plus réduite. Cette base matérielle offre la puissance nécessaire à l'implémentation d'algorithmes adaptés aux communications à haut débit. L'utilisation de plusieurs antennes accélère encore plus le débit des communications. Aujourd'hui, il est parfaitement possible en théorie d'effectuer une communication de l'ordre du Gigabit par seconde en utilisant des codes convolutifs couplés à une modulation élevée sur plusieurs antennes.

Domaines d'intérêt De nos jours, ces technologies sont maîtrisées et intégrées au sein des réseaux actuels. Dans cette partie, nous verrons comment garantir des communications à haut débit quasi-permanentes grâce aux relais. Les terminaux actuels pouvant communiquer sur plusieurs modes, nous montrerons les avantages du multi-mode dans l'accès au réseau. Nous expliquerons aussi comment l'utilisation de plusieurs antennes bénéficie aux communications modernes. Puis, nous présenterons le paradigme de la radio logicielle, qui apporte la flexibilité nécessaire à un terminal moderne dans l'utilisation de ces technologies. Dans un second temps, nous montrerons que la tendance est à la convergence technologique, en vue de mutualiser les différents avantages acquis. Mais tout d'abord, nous nous intéressons aux différentes technologies utilisées par les terminaux de télécommunications modernes du point de vue de la couche physique.

2.1.1.1 Description technologique

Les progrès technologiques ont rendu possible l'évolution des télécommunications en répondant aux contraintes du haut débit et de la mobilité. Dans cette partie, nous présentons succinctement les technologies utilisées par un terminal de communication moderne au niveau de la couche physique.

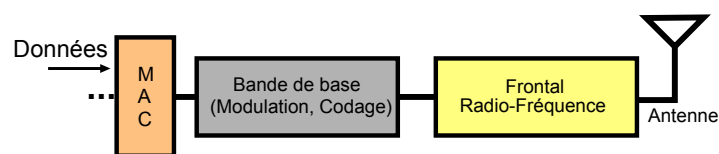


FIGURE 2.1: Architecture d'un terminal radio

Architecture d'un terminal radio Dans les communications modernes, l'envoi et la réception d'informations se réalisent en plusieurs étapes. Au niveau de la couche physique, les données provenant de la couche MAC arrivent en général sous la forme d'une trame, dont la taille est fixée. Au sein d'un terminal mobile, ces données subissent plusieurs traitements consécutifs afin de rendre possible leur envoi et leur réception sur un canal de communication.

2 État de l'art

Nous séparons ces étapes en trois catégories, à la fonction bien distincte :

- La *bande de base*, qui regroupe les opérations réalisées sur les données numériques,
- Le *frontal radio-fréquence*, qui rassemble l'ensemble des traitements analogiques appliqués à un signal,
- L'*antenne*, qui réalise la transmission et la réception de signaux analogiques sur un canal de communication.

Ces différentes étapes sont représentées à la Figure 2.1.

En transmission, la bande de base prépare les données avant leur modulation. Les opérations réalisées, comme l'entrelacement ou le codage des données apportent une protection contre les modifications subies par le signal au cours de son envoi sur le canal de communication. Avant leur transmission, les bits de données sont mis en relation avec les opérations de modulation via le *mapping*. En réception, les opérations inverses permettent de retrouver les données originales.

La modulation est un processus qui consiste à former un signal analogique dans le but de l'envoyer. Le signal analogique est généré par un oscillateur à une certaine fréquence, puis il est amplifié avant d'être transmis sur le canal par l'antenne. La démodulation reçoit ce signal analogique en provenance de l'antenne. Les différentes composantes à la base de ces étapes fonctionnent sur une certaine gamme de fréquence, avec une largeur de bande associée.

Codage convolutif Les communications modernes sont à la fois mobiles et à haut débit. Dans ces conditions, la mobilité est source de nombreux problèmes qui peuvent nuire à la bonne réception des données. Le *codage* introduit de l'information pour préserver les données d'origine, même en présence d'erreurs de transmissions [5]. En réception, le *décodage* vérifie l'intégrité des données et les corrige dans une certaine proportion. Ce décodage se réalise en contrepartie d'une forte complexité, tant en puissance de calcul qu'en mémoire.

Grâce à l'évolution des architectures, la puissance de calcul des terminaux modernes permet d'utiliser des codes toujours plus efficaces, mais aussi toujours plus complexes à décoder. Nous pouvons citer le *codage convolutif*, qui est employé dans plusieurs protocoles de télécommunications modernes. Son principe se base sur des opérations récursives simples qui génèrent de l'information en fonction des données codées. Son décodage se réalise suivant l'algorithme de Viterbi, qui vise à minimiser l'incertitude des données reçues.

La puissance des circuits rend possible l'implémentation d'autres codes correcteurs d'erreurs, avec des techniques de décodage tout aussi complexes. Nous pouvons citer les turbo-codes, qui se basent sur des codages convolutifs en parallèle, ou encore les codes LDPC (*Low Density Parity Check codes*), créés en 1962 et qui utilisent les propriétés des graphes bipartis. Mais les codes convolutifs restent largement utilisés dans les communications modernes, grâce à la rapidité de leur décodage sur les architectures actuelles.

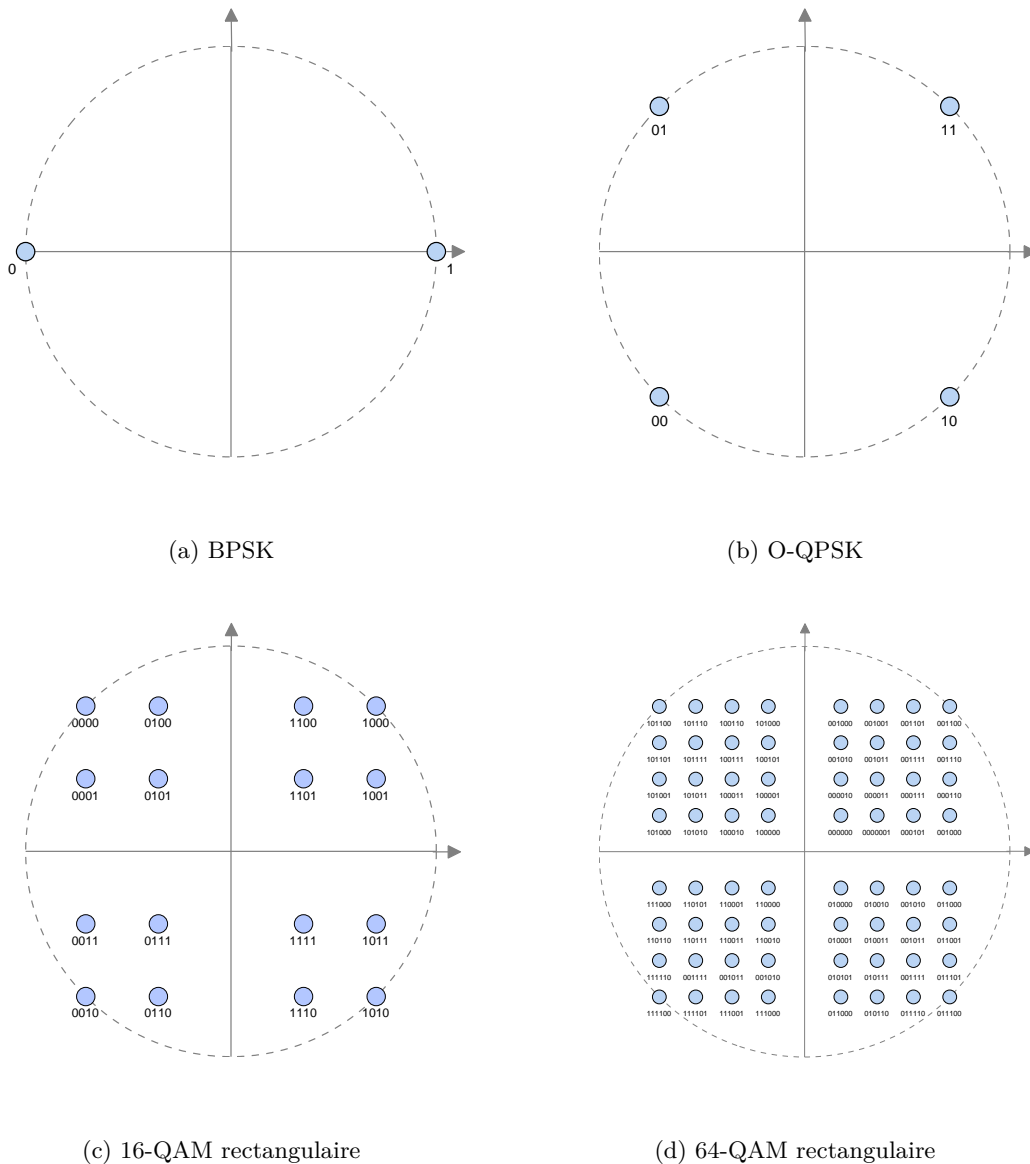


FIGURE 2.2: Exemples de constellations pour différentes modulations

Techniques de modulation L'augmentation des débits passe par la transmission d'une plus grande quantité d'information sur une bande passante définie. Cette évolution se réalise principalement par le biais de la modulation.

La modulation d'un signal consiste à envoyer des informations sous la forme d'un signal analogique, en jouant sur sa fréquence, sa phase, son amplitude. Dans les communications modernes, les modulations peuvent prendre des formes simples, comme la BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), ou plus complexes comme la modulation d'amplitude en quadrature (QAM, ou *Quadrature Amplitude Modulation*). Une modulation QAM combine deux porteuses, dont le déphasage de l'une par rapport à l'autre permet de représenter plusieurs bits de données

2 État de l'art

sur un point de la constellation : une quantité d'information identique est alors transmise dans un temps réduit. La Figure 2.2 présente différents types de modulations utilisés dans les communications modernes.

Nous remarquons que pour BPSK (Figure 2.2(a)) ou O-QPSK (Figure 2.2(b)), chaque point de la constellation représente respectivement un et deux bits. Pour 16-QAM (Figure 2.2(c)) et 64-QAM (Figure 2.2(d)) chaque point de la constellation représente respectivement 4 et 6 bits. Cependant, plus la taille de la constellation augmente, plus la probabilité d'erreur en réception s'en trouve affectée : il est alors nécessaire de transmettre avec une puissance plus élevée pour réduire cet effet. De même, les modulations QAM sont plus sensibles aux modifications de phases et de fréquences.

L'évolution des architectures de frontaux radio et de leurs composants permet de profiter des modulations QAM grâce à une sensibilité de réception plus élevée, une capacité de filtrage plus grande et des algorithmes de synchronisation qui corrigent les modifications en phase et en fréquence. De plus, la combinaison du codage aux modulations QAM améliore la réception des constellations de grande taille. Pour plus d'informations sur les différentes techniques de modulation et les algorithmes utilisés, se référer à [6].

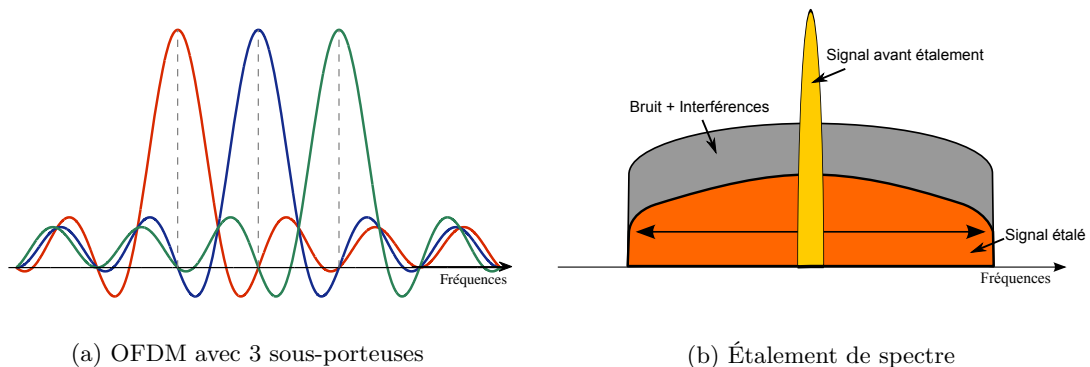


FIGURE 2.3: Techniques de transmissions

Techniques de multiplexage La transmission de données modulées se fait au travers d'un signal analogique transmis sur une certaine plage de fréquences. Dans les télécommunications modernes, plusieurs techniques cherchent à optimiser cette bande passante, comme présenté à la Figure 2.3. En particulier, nous distinguons les techniques basées sur l'utilisation conjointe de plusieurs porteuses, de celles basées sur l'étalement du spectre.

Dans le premier cas présenté Figure 2.3(a), nous pensons à l'*OFDM* (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), où les données sont transmises sur plusieurs porteuses orthogonales. Grâce à cette orthogonalité, l'OFDM maximise l'utilisation du spectre avec un nombre élevé de bit par Hertz, ce qui entraîne des débits élevés sur une bande passante réduite. Malgré

quelques contraintes énoncées dans [7], l'OFDM demeure particulièrement attrayant dans les réseaux locaux.

Dans le second cas présenté Figure 2.3(b), nous pensons à l'étalement d'un signal, où des codes sont utilisés pour transmettre les données sur une large bande passante. Un avantage majeur de l'étalement de spectre est la possibilité de transmettre un signal sous le niveau de bruit, grâce aux codes d'étalement. Cette technique est utilisée dans les communications 3G, qui l'implémentent au travers du *WCDMA* (*Wideband Code Division Multiple Access*). Le WCDMA est plus approprié à la mobilité avec une forte résistance au bruit et aux interférences. Il reste très employé par les réseaux mobiles actuels et futurs [8].

Présentation des couches physiques utilisées Une couche physique se définit comme la combinaison des différentes techniques présentées ci-dessus. Dans cette partie, nous présentons succinctement ces différentes caractéristiques pour trois standards : le 802.11g, l'UMTS et le 802.15.4. Le 802.11g, norme à l'heure actuelle la plus répandue dans les réseaux locaux de type Wi-Fi, est un standard pour les réseaux locaux haut débit proposé par l'IEEE [1]. Il utilise l'OFDM pour transmettre des données. L'UMTS est un standard de télécommunication mobile proposé par le consortium 3GPP, dont les débits atteignent une centaine de kilobits par seconde dans sa version de base [2]. Le 802.15.4, ou Zigbee, est un standard basse consommation dédié aux réseaux personnels, lui aussi proposé par l'IEEE [3]. L'UMTS et le Zigbee utilisent l'étalement de spectre pour transmettre des données. Le Tableau 2.1 représente le codage, la modulation, la bande passante, la fréquence de porteuse et la méthode d'accès utilisés dans chacun de ces standards.

TABLE 2.1: Caractéristiques de la couche physique des standards choisis

	802.11g	UMTS	802.15.4
Débits données	6 à 54 Mbps	64 à 384 kbps	20, 40, 250 kbps
Codage	Convolutif	Convolutif	Différentiel (XOR)
Taux de codage	1/2, 2/3, 3/4	1/2	1
Modulation	BPSK, QPSK, 16 ou 64-QAM	QPSK	BPSK ou O-QPSK
Fréquences	2,4 GHz	1,9 et 2,1 GHz	868 MHz, 928 MHz, 2,4 GHz
Bande passante	20 MHz	5 MHz	600 kHz, 2 MHz

2.1.1.2 Qu'est-ce qu'un relais ?

Définitions Un *relais* est un appareil de communication sans-fil, qui reçoit les données d'utilisateurs et les retransmet vers une destination donnée. En général, cette destination est connectée à Internet, et prend la forme d'un point d'accès ou d'une station de base. L'utilisation de relais est de plus en plus prisée par les opérateurs, qui y voient une alternative

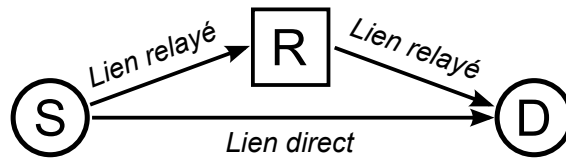


FIGURE 2.4: Un relais de communication

économique au déploiement de leur réseau. Les relais améliorent les conditions de communications des utilisateurs grâce à leur proximité. Ils offrent une solution qui élargit la portée du réseau, en offrant un accès aux utilisateurs hors de portée du point d'accès ou de la station de base.

La Figure 2.4 présente le principe du relais. Une source S contacte une destination D. Le relais R retransmet les informations reçues de S vers D. Lorsque la communication a lieu au travers de plusieurs relais consécutifs, on parle d'une communication *multi-saut*.

Un relais peut être fixe ou mobile. Fixe, il s'agit d'une infrastructure déployée par les opérateurs. Mobile, il peut s'agir du terminal d'un autre utilisateur ou d'un appareil situé dans un véhicule. L'utilisation des relais, qu'ils soient fixes ou mobiles, permet de réduire les coûts d'infrastructure et de déploiement du réseau, tout en fournissant une qualité de service comparable [9, 10]. Cependant, de nouveaux problèmes apparaissent. Afin de minimiser les coûts opérationnels, il est nécessaire d'optimiser le placement des relais fixes en fonction de critères annexes, comme la capacité du réseau [11, 12, 13]. Pour les relais mobiles, le coût de maintenance est plus faible, mais il existe des problématiques liées à la mobilité et au routage. Dans ce but, Conti et al. proposent plusieurs solutions pour optimiser l'utilisation des relais mobiles [14].

Techniques de relais La mise en place de relais facilite les communications. Lorsqu'un utilisateur communique avec un relai, ce dernier retransmet les données vers la destination suivant plusieurs techniques. Il existe deux techniques principales, à la base de tout système de relais :

- Le *Decode and Forward* (ou *Décoder et Retransmettre*, noté DF), où le relais décode les trames reçues avant de les retransmettre,
- L'*Amplify and Forward* (ou *Amplifier et Retransmettre*, noté AF), où le relais est un simple répéteur analogique.

Dans DF, le relais décode l'information, la corrige, puis la retransmet, ce qui entraîne un coût de traitement et une latence associée. Dans AF, un relais retransmet immédiatement tout signal reçu. Ce signal est alors envoyé à la puissance de transmission du relais ; il est donc « amplifié » par rapport à un signal non relayé. Dans ce cas, les données retransmises subissent un bruit plus important, ce dernier étant aussi amplifié lors de la retransmission.

Dans [15], Yu et Li comparent AF et DF dans un canal à évanouissement de Rayleigh. Malgré le coût important du décodage des données, DF permet de corriger les erreurs au niveau de la trame grâce au codage. Ceci est d'autant plus vrai lorsque les conditions de canal sont soumises à un fort évanouissement. Cependant, lorsqu'on s'intéresse à la capacité du canal, AF et DF sont équivalents.

Plusieurs évolutions proposent des techniques hybrides pour améliorer AF et DF. Généralement, ces techniques hybrides visent à trouver un compromis entre la capacité et les retransmissions. Dans [16], Souryal et Vojcic proposent une technique *Hybrid Decode and Forward* qui utilise DF par défaut. Lorsque le relais ne peut décoder correctement un paquet, ce dernier est tout de même retransmis en utilisant AF. Cette technique hybride améliore le taux d'erreur de bout en bout, pour un rapport signal à bruit identique. Dans [17], Gomadam et Jafar proposent une technique *Estimating and Forward* (ou Estimer et Retransmettre, EF), où le relais encode l'estimation d'erreur avant de retransmettre l'information. De cette façon, la destination peut estimer la probabilité d'erreur avant de décoder les informations. L'utilisation de EF offre des gains peu significatifs par rapport à AF et DF dans le cadre d'un relais multi-saut classique. Pour des relais multi-saut en parallèle, EF apporte des gains importants en capacité.

Les avantages liés au choix du relais Les relais offrent de nombreuses possibilités pour améliorer les communications sans-fil, en dépit des nombreuses difficultés présentées dans [18]. Ils augmentent la portée du réseau et la capacité [18], tout en minimisant la probabilité de coupure [19]. Il convient alors de s'intéresser aux critères permettant de choisir un relais en fonction des paramètres à optimiser.

Comme présenté par Cavalcanti et al. dans [20], l'utilisation de relais mobiles sur plusieurs sauts permet d'améliorer l'efficacité d'un réseau. Chaque nœud peut contacter un relais en fonction de son « opportunité de connectivité ». Elle est calculée en fonction des conditions de canal, du débit requis, et de paramètres spécifiés par l'utilisateur. Ainsi, la Qualité de Service nécessaire à une application donnée est garantie et le terminal bénéficie à la fois d'une couverture réseau étendue, de gains non négligeables en capacité et d'un taux d'erreur réduit.

Chen et al. développent un modèle d'évaluation des interférences liées aux accès multiples pour des relais multi-saut utilisant AF dans un réseau Ultra Large Bande [21]. Ils montrent que le taux d'erreur par bit dépend du nombre de sauts, du bruit ambiant et du nombre moyen d'utilisateurs qui peuvent agir comme des interférents. Ainsi, l'utilisation d'un relais multi-saut AF étant conditionnée par ces paramètres, il est plus intéressant de relayer en présence d'un nombre d'interférents et d'un bruit peu élevés.

Dans [22], Kashyap et al. développent un algorithme de placement des relais, qui optimise la connectivité au sein d'un réseau hiérarchique. L'algorithme proposé évalue le nombre optimal

de relais et leur position en fonction de la topologie et de la densité du réseau. Dans [23], Florea et Yanikomeroglu évaluent le nombre optimal de sauts en fonction de l'efficacité spectrale. Un seul relais suffit lorsque le rapport signal à bruit est élevé. Sinon des relais équidistants garantissent un optimum en considérant des conditions de canal identiques sur chaque lien. De la même manière, Herhold et al. comparent les performances de plusieurs techniques de relais suivant la capacité, l'efficacité spectrale et la probabilité de coupure [24]. Les auteurs expliquent que l'utilisation d'un système à deux sauts est la plus intéressante à tous les niveaux, sachant qu'un faible nombre de relais est d'autant plus préférable que les conditions de canal sont favorables.

Il est aussi possible de considérer des relais placés en parallèle, où l'information est mutualisée [18, 24]. Dans ce cas, AF limite la capacité si le gain d'amplification est trop élevé, ce qui cause des interférences [25]. Liang et Kramer montrent que la capacité d'un tel réseau coopératif utilisant DF est bornée [26]. Shi et al. optimisent le nombre de relais nécessaires pour fournir une capacité supérieure aux connexions directes [27].

2.1.1.3 Qu'est-ce que le multi-mode ?

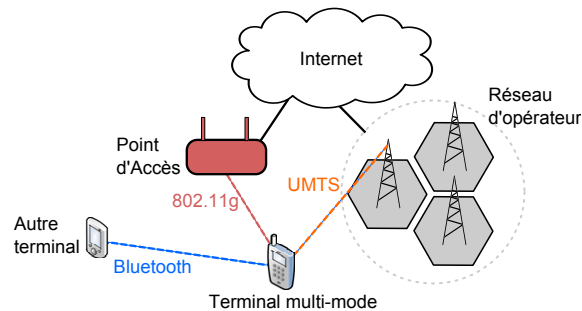


FIGURE 2.5: Possibilités de communications d'un terminal multi-mode

Définitions Dans les communication modernes, un protocole propose plusieurs *modes* de communication, qui disposent chacun de paramètres propres, comme le codage et la modulation. De plus, un mode communique sur une fréquence donnée. Ainsi, un *mode* représente les différents paramètres d'une couche physique associés à un débit donné.

Les terminaux actuels ont la possibilité de communiquer sur plusieurs standards, simultanément ou non. Cette propriété est appelée *multi-mode*. La Figure 2.5 présente différentes possibilités de communication pour un terminal multi-mode. Ce dernier peut se connecter à Internet soit par un point d'accès 802.11g, soit en utilisant un réseau cellulaire en UMTS. Il peut aussi communiquer en Bluetooth avec d'autres terminaux.

Depuis plus de dix ans, le multi-mode est considéré comme une brique primordiale aux communications modernes. En 1997, Hoffmeyer et Bonser s'intéressaient déjà aux challenges

posés par l'utilisation du multi-mode dans les terminaux mobiles [28]. En 1999, Agrawal et Famolari considéraient que les terminaux évolueront inévitablement vers le multi-mode, au vue de la prolifération des standards de communication mobile [29]. Au cours des dernières années, de nombreuses recherches ont permis d'appréhender le multi-mode au niveau des technologies utilisées et de leurs emplois.

Architectures multi-mode Un terminal multi-mode implémente des couches physiques distinctes qui font appel à des traitements parfois diamétralement opposés. Tout cela, dans des composants miniatures, intégrables sans difficulté au sein d'un équipement mobile. De plus, un terminal multi-mode doit pouvoir communiquer simultanément sur plusieurs fréquences. Il est alors nécessaire de concevoir des architectures adaptées au multi-mode.

Un terminal radio multi-mode repose sur des architectures lui offrant la possibilité de communiquer sur plusieurs modes simultanément. Il possède un frontal radio-fréquence agile, afin de transmettre et recevoir sur une large gamme de fréquences, avec une bande passante variable. Cette agilité requiert des amplificateurs adaptés au multi-mode, fournissant la même efficacité sur des plages de fréquences étendues. Le développement de telles architectures nécessite de mutualiser les ressources entre les différents modes au travers de l'utilisation de composants adaptables. En transmission, le frontal radio est équipé de circuits adaptés au multi-mode, comme des modulateurs [30] et oscillateurs [31], des amplificateurs [32, 33] et des convertisseurs numériques/analogiques [34].

De la même manière, la réception de plusieurs modes nécessite des traitements adéquats, au travers de chaînes de traitement programmables. Par exemple [35, 36] proposent des architectures de filtres capables de fonctionner sur plusieurs bandes de fréquences. L'intégration de tels composants est réalisée dans [37], qui introduit une architecture basée sur des blocs partagés entre plusieurs standards de communication mobiles (GSM, UMTS) et locales (Bluetooth et Wi-Fi).

Le multi-mode pour une meilleure connectivité Le multi-mode ouvre la porte à de nouveaux usages, grâce à des possibilités de connectivité étendue. Les terminaux mobiles actuels peuvent déjà bénéficier de plusieurs réseaux. Par exemple, il est possible de communiquer à loisir sur un réseau cellulaire, en ville ou en voiture, et de basculer sur une connexion Wi-Fi reliée à l'ADSL à la maison. Mais ce choix reste conditionné aux décisions de l'utilisateur.

Plusieurs solutions cherchent à automatiser le basculement entre différents modes de manière efficace, comme Izumikawa et al. qui se basent sur un signal GPS [38]. La solution proposée vise une transition en douceur d'un réseau 3G vers un réseau WLAN (et vice-versa), sans interruption de service. Pour cela, la corrélation entre la puissance reçue des signaux 3G et GPS agit comme critère de décision dans le changement de point d'accès. En effet, une forte

réduction de la puissance des signaux reçus 3G et GPS indique avec une forte probabilité que l'utilisateur se trouve dans un bâtiment. Ainsi, un terminal mobile communiquera en priorité sur une connexion WLAN à l'intérieur d'un bâtiment, et en 3G à l'extérieur.

Dans le même registre, Kalokylos et al. [39] proposent un algorithme pour choisir automatiquement un réseau d'accès, en fonction des préférences de l'utilisateur, de la batterie du terminal, de l'état du canal de communication ainsi que des ressources du réseau. De cette façon, un terminal multi-mode dispose d'une liste de priorité des modes, qui évolue suivant les réseaux disponibles.

Il est cependant nécessaire d'harmoniser ces différentes solutions existantes. Dans ce but, le groupe de travail IEEE 802.21 réfléchit à un standard utilisant les possibilités multi-mode d'un terminal pour garantir la continuité de service en cas de changement de point d'accès (ou *handover*), ces points d'accès pouvant fonctionner sur des modes de communication différents [40]. Ainsi l'utilisateur bénéficie d'un accès au service sans interruption et sans intervention de sa part.

2.1.1.4 Qu'est-ce que le multi-antenne ?

Les communications modernes bénéficient d'évolutions intéressantes grâce à l'utilisation de plusieurs antennes. Un terminal est *multi-antenne* lorsqu'il utilise plusieurs antennes pour communiquer au sein d'un mode donné.

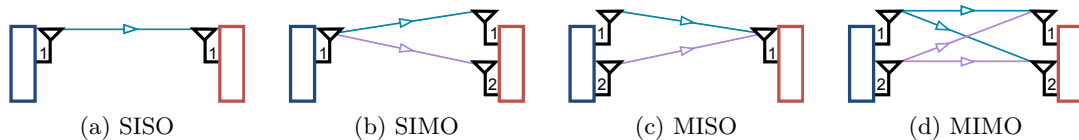


FIGURE 2.6: Types de communications multi-antenne

Définitions Lors des communications multi-antenne, les informations sont transmises et/ou reçues par plusieurs antennes. Nous distinguons alors plusieurs types de communications multi-antenne [41], comme présenté à la Figure 2.6 :

- Le *MIMO* (*Multiple Input, Multiple Output*, Figure 2.6(d)), où chaque terminal possède plusieurs antennes. Dans ce cas là, l'émetteur transmet l'information sur $M^{\text{TX}} > 1$ antennes, et le récepteur utilise $M^{\text{RX}} > 1$ antennes.
- Le *MISO* (*Multiple Input, Single Output*, Figure 2.6(c)), où $M^{\text{TX}} > 1$ et $M^{\text{RX}} = 1$.
- Le *SIMO* (*Single Input, Multiple Output*, Figure 2.6(b)), avec $M^{\text{TX}} = 1$ et $M^{\text{RX}} > 1$.
- Le *SISO* (*Single Input, Single Output*, Figure 2.6(a)), qui est un cas particulier où $M^{\text{TX}} = M^{\text{RX}} = 1$.

En fonction du nombre d'antennes, la *diversité* apporte la redondance nécessaire pour palier aux aléas des canaux de communication. Cette diversité amène une meilleure robustesse, une plus grande capacité et une portée étendue [42, 43]. Elle peut s'obtenir par une combinaison de critères fréquentiels, spatiaux, ou temporels [44, 45]. Elle dépend du nombre d'antennes et de l'état du canal [46, Ch. 5].

La réception des signaux multi-antenne se base sur des algorithmes d'estimation de canal pour tirer partie de la diversité. En combinant les composantes reçues sur chaque antenne, il est alors possible de reconstituer les informations originales [47]. Sans entrer dans les détails, ces algorithmes minimisent l'erreur quadratique moyenne en réception, en exploitant la diversité [48, 49]. Cependant, leurs performances varient en fonction des conditions de canal et des techniques multi-antenne utilisées [50, 51, 52, 53].

Afin d'exploiter cette diversité de manière optimale, les terminaux MIMO répartissent le signal sur les différentes antennes en fonction de codes spatiotemporels. L'emploi de ces codes est décrit par une matrice de corrélation, avec une composante spatiale et une composante temporelle. Concrètement, le signal à transmettre est alors réparti sur les différentes antennes au cours du temps. Le plus connu d'entre eux est le code d'Alamouti [54]. D'autres codes visent à augmenter la capacité d'un canal multi-antenne en multiplexant les données sur les antennes disponibles, comme V-BLAST [55]. Pour plus d'information sur les différents types de codes applicables au multi-antenne, il est possible de se référer à [56].

Avantages des communications multi-antenne Le multi-antenne, et le MIMO en particulier, sont un des éléments clés des systèmes de communication à très haut débit, avec des débits atteignables de l'ordre du gigabit par seconde [57, 58]. Les protocoles nouvelle génération, comme le LTE (*Long Term Evolution*) [59], tirent partie de ces communications multi-antenne pour améliorer les performances de la transmission.

Les avantages des communications multi-antenne sont nombreux : elles augmentent le rapport signal à bruit du signal reçu, et donc la capacité du canal [50, 60]. Cette capacité est fortement liée aux gains en diversité et en multiplexage [45, 48, 49]. L'ajout de relais dans des communications multi-antenne augmente aussi la capacité [61].

Les communications multi-antenne sont très efficaces pour réduire les interférences grâce à la diversité. Plusieurs techniques permettent à un terminal multi-antenne de réduire les interférences, notamment dans les réseaux 4G [62, 63].

Un système de relais coopératifs peut aussi être considéré comme du multi-antenne virtuel [64, 65]. Cette solution est privilégiée dans les réseaux de capteurs, où les terminaux n'utilisent qu'une seule antenne, à cause de contraintes d'encombrement. La diversité est alors assurée par la multiplication des relais. Les performances de tels relais sont limitées par la technique de relais utilisée [65], mais une coopération hiérarchique permet d'obtenir de très

bons résultats dans l'augmentation de la capacité [66].

Terminaux multi-antenne Le développement d'architectures multi-antenne intégrées apporte tous ces avantages aux terminaux mobiles. Cependant, les communications multi-antenne sont soumises à plusieurs contraintes.

En transmission, le MIMO permet soit d'augmenter les débits, soit de renforcer la qualité d'un signal. Dans [67], Sugiura et al. réalisent un compromis entre multiplexage et diversité en proposant une transmission MIMO STSK (*Space-Time Shift Keying*). Le STSK est une méthode de transmission MIMO hybride, où l'information est multiplexée sur plusieurs antennes suivant des matrices de dispersion, puis répétée dans le temps grâce à des codes spatiotemporels. Cette méthode offre l'avantage d'une complexité de décodage réduite par rapport aux approches classiques (comme V-BLAST et Alamouti). Cependant, elle se destine aux terminaux disposant d'un nombre d'antennes en transmission supérieur à la taille des codes spatiotemporels.

En réception, le décodage des signaux MIMO fait appel à des algorithmes de détection du signal et d'estimation de canal qui possèdent une forte complexité. La réduction de cette complexité devient alors un objectif important dans l'adoption du MIMO. Dans [68], Souto et al. réduisent la complexité de la réception MIMO en décodant les signaux de manière hiérarchique dans un contexte de diffusion au sein d'un réseau cellulaire WCDMA. La modulation hiérarchique permet le décodage des informations les plus importantes par tous les utilisateurs dans des conditions de canal dégradées. En fonction de la classe des données à transmettre, Souto et al. assurent une protection aux informations importantes grâce à la combinaison du MIMO et de la modulation hiérarchique. De plus, les utilisateurs bénéficiant de bonnes conditions de canal peuvent profiter d'informations complémentaires. Cette méthode offre une bonne résistance aux interférences, mais elle nécessite l'utilisation d'un récepteur multi-antenne adapté au décodage hiérarchique des informations. Dans [69], Lin et Ma réalisent une architecture radio MIMO OFDM à faible complexité, qui fournit de très bonnes performances en réception. En transmission, l'architecture proposée offre une réduction des interférences grâce à des algorithmes d'estimation de canal et une assignation des canaux au préalable. En réception, les algorithmes utilisés offrent une complexité réduite par rapport aux méthodes existantes dans la littérature. De plus, cette architecture s'adapte aux communications SISO.

Toujours en réception, chaque antenne est généralement associée à une chaîne de traitement RF. Cette contrainte architecturale augmente d'autant plus la complexité de décodage. Dans [70, 71], Gautier et al. introduisent une méthode de multiplexage par code qui permet de mutualiser un frontal radio entre les différentes antennes. Pour cela, le récepteur associe un code orthogonal à chaque antenne afin de discriminer le décodage des différents signaux. Ainsi, la complexité de décodage s'en trouve réduite, avec un frontal radio unique et des per-

performances très proches des solutions classiques. Le seul inconvénient provient de l'utilisation d'un nombre d'antennes multiple de 2, à cause de la structure même des codes.

2.1.1.5 Qu'est-ce que la radio logicielle ?

La *radio logicielle* est une technologie qui vise à remplacer les différents circuits dédiés d'une couche physique par des blocs fonctionnels programmables. La radio logicielle est à la base de la conception d'un terminal radio universel, programmable et adaptable. Une radio logicielle est composée d'une partie numérique, réalisant les traitements du signal et de la bande de base, et d'une partie analogique, qui assure la transmission et la réception du signal sur le canal. La partie numérique prend la forme d'un processeur programmable, qui exécute des blocs logiciels afin de réaliser les opérations d'une couche physique. Son architecture n'est pas fixée. Le frontal radio-fréquence est quant à lui agile. Il est basé sur de composants programmables qui s'intègrent parfaitement dans la chaîne radio, comme présenté dans [72, 73].

Depuis l'introduction du concept par Mitola [74], l'évolution de la technologie a permis le développement de terminaux radio logicielle. Un terminal radio logicielle dispose de nombreux avantages quant à son adaptabilité et sa reconfiguration. Pour cela, la radio logicielle a été envisagée comme une solution aux problèmes des architectures figées, comme les ASICs (*Application-Specific Integrated Circuit* ou Circuit Intégré Spécifique à une Application). Elle permet une réduction des coûts grâce à l'implémentation des nouveaux modes de communication dans un circuit « universel », et la résolution des bugs de manière logicielle [75, 76].

L'exemple le plus probant vient de la NASA, avec la mission Cassini, lancée en 1997. Lors de la descente de la sonde Huygens sur Titan, l'intensité de l'effet Doppler n'était pas pris en compte par le récepteur de Cassini. Mais ce paramètre était impossible à modifier, car programmé en dur [77]. Pour éviter de perdre des années de travail, la NASA réunit une équipe international d'experts qui décida de changer la trajectoire de Huygens après de longs et coûteux calculs. Une radio logicielle aurait apporté une solution plus économique et simplifiée, avec la reconfiguration à distance du circuit concerné. Depuis lors, la NASA considère la radio logicielle comme une technologie clé de l'exploration spatiale [78].

De nos jours, les radio logicielles sont principalement employées dans les stations de base [79]. Leur flexibilité permet aux opérateurs de s'adapter rapidement aux évolutions d'un standard, tout en minimisant les coûts matériels. De même, il devient possible de partager le matériel entre différents opérateurs en créant des stations de base virtuelles, qui communiquent sur un ou plusieurs standards [80, 81, 82]. Ces évolutions sont considérables par rapport à Speakeasy [83], précurseur des systèmes de radio logicielle multi-mode.

L'intérêt majeur d'une radio logicielle vient de ses possibilités d'adaptation : il est possible de changer dynamiquement le mode de communication. Ainsi, la radio logicielle est à la base du concept de radio cognitive, où chaque terminal adapte ses capacités de communication en

fonction des ressources disponibles et des besoins de l'utilisateur [84]. Le logiciel GNU Radio¹ est une solution efficace pour créer des radio logicielles adaptables en fréquence. Par exemple, Leising et al. l'utilisent pour mettre en œuvre un réseau cognitif composé de radio logicielles, avec la possibilité de communiquer sur 64 canaux [85].

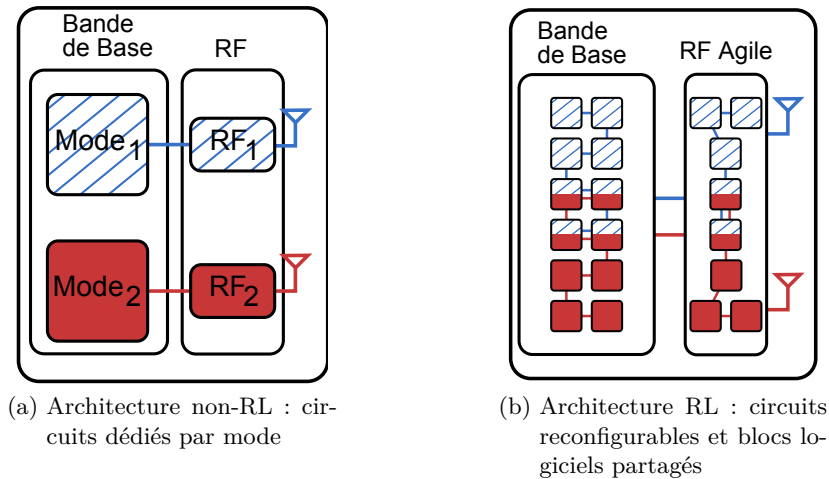


FIGURE 2.7: Structure d'une radio logicielle multi-mode

La radio logicielle pour le multi-mode Grâce à ses nombreux avantages, la radio logicielle se retrouve à la base de la conception d'un terminal multi-mode moderne [86, 87]. Comme schématisé à la Figure 2.7, une radio logicielle apporte un gain de flexibilité non négligeable. Dans une radio non-logicielle, chaque mode utilise des composants dédiés tant pour la bande de base que pour le frontal radio, comme présenté à la Figure 2.7(a). Au contraire, une radio logicielle utilise des circuits génériques programmables, et donc reconfigurables en fonction du contexte. La Figure 2.7(b) présente un exemple de radio logicielle où la bande de base est implémentée sous la forme de blocs logiciels, dont certains sont partagés entre deux modes. Le frontal radio est lui-aussi agile et commun aux deux modes, via des composants adaptables.

Une radio logicielle peut donc se reconfigurer en modifiant le comportement de chaque bloc indépendamment des autres. Dans ce but, Lallet et al. proposent des méthodes de reconfiguration rapide des blocs basée sur le contexte d'exécution [88]. Cette méthode, validée par l'implémentation de l'UMTS sur un FPGA, assure une reconfiguration dynamique en un temps réduit, avec une complexité et un encombrement réduits.

Shao et Liang implémentent une couche physique reconfigurable sur un FPGA [89]. Dutta et al. proposent une architecture de radio logicielle pour la radio cognitive, reprogrammable en fonction du contexte [90]. Quant à Palkovic et al., ils proposent d'utiliser un processeur multi-cœur au sein des radio logicielles multi-mode [91]. Pour cela, ils utilisent une méthodologie

1. <http://gnuradio.org>

qui facilite l'implémentation des nouveaux modes et la reconfiguration d'une radio logicielle multi-cœur.

En réception, la radio logicielle multi-mode a recours à un frontal agile, dont la partie filtre doit posséder une forte capacité de rejection d'image [92]. Dans ce but, Tobias et al. développent une méthode de conception des filtres FIR pour la radio logicielle multi-mode [93], tandis que Tachwali et al. implémentent un synchroniseur multi-mode sur un FPGA [94]. De même, [95] détaille le développement d'un récepteur radio logicielle multi-mode sur un FPGA. Après une analyse de la complexité de différents filtres, les solutions retenues sont implémentées sous la forme de blocs reconfigurables.

Évolutions futures de la radio logicielle Dans un futur proche, un terminal radio logicielle fournira à son utilisateur un accès constant à Internet de par ses capacités multi-mode. Cette possibilité sera offerte par l'application de règles communes à tous les terminaux.

La proposition de standard IEEE SCC41 (ex-P1900) spécifie des règles dans la conception de radio logicielles [96, 97, 98]. En particulier, ce standard s'intéresse à la reconfiguration de la couche physique d'une radio logicielle cognitive, en se basant sur un fichier nommé « activateur radio » (*radio enabler*). Ce fichier décrit les caractéristiques et les règles d'utilisation d'un réseau d'accès, en particulier sa couche physique (types d'opérations et leur complexité). Le terminal peut alors se reconfigurer pour utiliser le réseau choisi en fonction de son architecture et des besoins de l'utilisateur.

Le standard 802.22 [99] est complémentaire et se concentre sur la gestion des fréquences disponibles. Suivant ce standard, une radio logicielle a la possibilité de se reconfigurer pour communiquer sur des fréquences libres, tant qu'elle n'interfère pas avec d'autres utilisateurs. Pour cela, le 802.22 requiert un terminal cognitif, qui prend en compte son environnement dans le processus de décision.

2.1.2 Quelles évolutions pour des réseaux intelligents ?

Les réseaux du futur seront intelligents et s'adapteront aux besoins des utilisateurs. Ils mêleront les technologies actuelles au sein de nouveaux concepts, afin d'atteindre des très hauts débits et une connectivité importante, tout en favorisant la mobilité avec une consommation d'énergie réduite.

2.1.2.1 Vers une convergence technologique

En 1996, Yrjö Neuvo, Vice-Président de la recherche du groupe Nokia, exprimait sa vision du futur pour les communications mobiles dans [100]. Il y voyait une généralisation de la mobilité, dont l'un des principaux challenge résiderait dans la réduction de la consommation des terminaux. En 2000, Weinberger prévoyait la convergence des systèmes de communication

2 État de l'art

au sein d'un terminal mobile multi-mode [101]. Aujourd'hui, nous constatons la justesse de ces prédictions, avec des technologies qui ont tendance à s'intégrer les unes aux autres.

Les évolutions futures gardent cette tendance à intégrer les technologies actuelles les unes aux autres. Nous parlons alors de *convergence*. Cette convergence est facilitée par l'utilisation de radio intelligentes, basées sur le principe de la radio cognitive [102]. Pour arriver à cela, les terminaux mobiles utiliseront la radio logicielle, qui bénéficiera de processeurs toujours plus puissants [103]. À terme, un tel terminal vise à supprimer les contraintes liées à la mobilité.

Dans ce but, la mise en place de relais se généralise. Dans un futur proche, les relais seront multi-mode et auto-organisés. Ils permettront de construire des réseaux maillés étendus à très haut débit, comme dans la solution *MCube* qui propose une gestion améliorée du *handover* [104].

Les terminaux multi-antenne seront généralisés, afin d'atteindre les débits requis par les standards de communication 4G. En effet, l'utilisation des relais et du multi-antenne est directement énoncée dans le standard LTE [105]. L'attrait de relais multi-antenne se justifie par des communications plus fiables. Il existe alors un degré de liberté dans le choix du nombre d'antenne et des relais. Un tel compromis est étudié dans [106]. De plus, la combinaison du multi-antenne avec du codage distribué (*network coding*) augmente la capacité et l'efficacité spectrale du réseau [107].

Dans ces communications multi-antenne collaboratives, une radio cognitive tirera pleinement partie des capacités du terminal en fonction des besoins [108]. Ainsi, elle choisira d'utiliser plusieurs antennes ou de collaborer avec les autres utilisateurs pour optimiser la capacité du réseau [109].

2.1.2.2 Un besoin de réduire la consommation d'énergie

Il est désormais acquis que les réseaux du futur seront intelligents et adaptatifs, qu'ils communiqueront à très hauts débits et disposeront d'une puissance de calcul se rapprochant des ordinateurs fixes [103]. Il est alors urgent de maîtriser la consommation d'énergie de ces terminaux pour répondre aux attentes des utilisateurs. En effet, cette problématique est de plus en plus cruciale pour les consommateurs, qui considèrent l'autonomie comme un critère majeur dans l'achat d'un terminal mobile nouvelle génération [110]. C'est d'autant plus vrai dans les pays comme l'Inde [111], où l'accès au réseau électrique peut se révéler difficile et cher, mais où le pouvoir d'achat ne cesse de croître.

Vers des terminaux efficaces en énergie Depuis plusieurs années, l'évolution vers des terminaux efficaces en énergie se mène sur plusieurs fronts. Comme expliqué dans [113], la consommation d'énergie d'un terminal mobile reste majoritairement associée à ses composants radio. C'est pourquoi les constructeurs se concentrent sur le développement de nouvelles

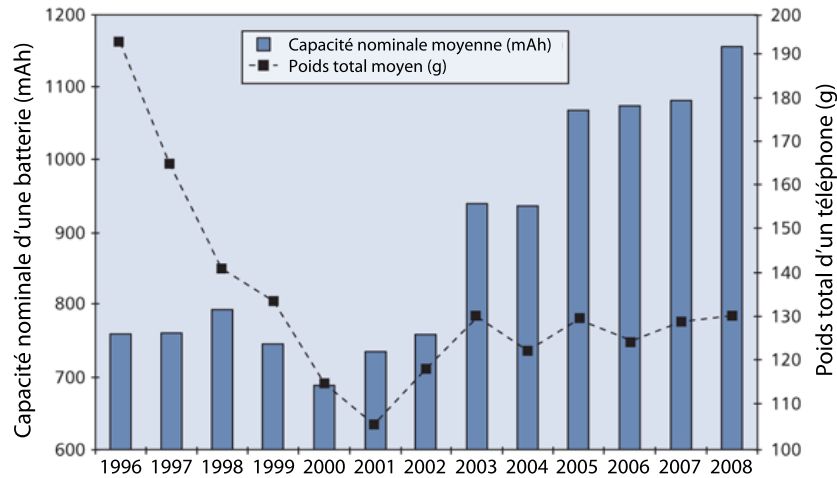


FIGURE 2.8: Évolution de la capacité des batteries et du poids des téléphones [112]

architectures basse consommation, tout en ne négligeant pas les performances. La réduction d'énergie est dorénavant prise en compte dans la conception des micro-processeurs [114], des FPGAs [115], des réseaux sur puce (ou *Network on Chip*) [116], et des architectures radio [117].

Cette consommation d'énergie s'impose comme une composante importante au niveau applicatif, avec le développement d'intergiciels prenant en compte l'énergie, comme GREEN [118]. Plus proche de nous apparaissent des modes de communication « basse consommation », comme le Zigbee [3] ou le Bluetooth Low Energy [119].

L'évolution passe aussi par les batteries, dont la capacité a fortement augmenté avec l'introduction de la technologie Lithium-Ion au début des années 2000. Afin d'optimiser l'autonomie, plusieurs approches adaptent les fonctionnalités d'un téléphone mobile en fonction de statistiques d'utilisation [120, 121], mais cette réduction d'énergie ne prend pas en compte le contexte ou l'application utilisée. De plus, la durée de vie d'un téléphone mobile moderne en communication est inférieure aux téléphones d'il y a cinq ans. Ceci est lié à l'utilisation toujours plus importante de fonctionnalités toujours plus nombreuses dans un terminal toujours plus puissant. C'est pourquoi les batteries actuelles ne pallient pas à l'augmentation de la puissance des composants, comme expliqué par Pentikousis dans [112]. La Figure 2.8 présente l'évolution du poids des téléphones mobiles et de la capacité nominale des batteries. Nous constatons que depuis 2005, le poids moyen d'un terminal mobile ne dépasse pas les 130 g. De fait, l'autonomie des téléphones modernes stagne, la taille et le poids de la batterie étant limitée, avec une capacité nominale n'augmentant que très faiblement.

D'après ce que nous venons de voir, il est peu envisageable de n'espérer réduire la consommation d'énergie qu'à un niveau local. Il est alors nécessaire de considérer des solutions extérieures au terminal qui pourront garantir une meilleure autonomie.

2.2 Réduction de la consommation dans les communications modernes

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'application des techniques présentées ci-dessus dans le but de réduire l'énergie des communications modernes.

2.2.1 Idées générales pour des réseaux à faible consommation

Un problème déjà étudié La réduction d'énergie revêt une importance considérable dans la conception des réseaux modernes [122]. Ces problématiques ont longtemps été associées aux réseaux de capteurs. Un capteur est un appareil de télécommunication fonctionnant sur batterie, qui communique par le biais d'un réseau ad-hoc. Le rôle d'un capteur est de remonter des informations vers un point d'accès appelé le *puits*.

La consommation d'énergie d'un réseau de capteurs étant intimement liée à sa topologie [123], il est nécessaire de garantir la durée de vie du réseau tout en conservant sa connectivité. Les recherches dans ce domaine sont variées, et les solutions ne manquent pas, comme présenté dans [124, 125]. Au niveau matériel, il est possible d'intégrer des techniques de récupération d'énergie dans les capteurs [126]. Au niveau réseau, il est important d'optimiser les techniques de routage et d'accès au réseau [127].

De plus, l'efficacité de ces techniques augmente avec l'agrégation des données [128] ou la gestion des temps de réveil des capteurs [129, 130]. À noter qu'un puits mobile permet aussi de réduire la consommation globale d'un réseau de capteurs en minimisant la puissance de transmission des nœuds [131, 132]. Cependant, les puits mobiles ne sont pas soumis aux mêmes contraintes que les capteurs, notamment du point de vue de la consommation d'énergie. En effet, ces puits mobiles peuvent prendre la forme de terminaux embarqués au sein de véhicules et peuvent donc être rechargés une fois la collecte des données terminée. Dans un réseau de capteurs, les puits mobiles ne jouent pas non plus le rôle de relais, qui sont la plupart du temps fixes. De même, les nœuds sont généralement mono-mode et ne disposent que d'une seule antenne pour des raisons de coût et d'encombrement.

Le concept de « *Green Radio* » Le coût énergétique nécessaire au fonctionnement des infrastructures prend un poids considérable dans les dépenses des opérateurs. Actuellement, les dépenses opérationnelles des opérateurs mobiles sont estimées à 10 milliards de dollars par an dans le monde [133, 134]. Les communications modernes en sont la cause principale, avec l'augmentation du trafic et de la puissance allouée à chaque utilisateur. Malgré les évolutions technologiques [135], cet état de fait n'est pas prêt de s'arrêter, ce qui risque de mener à des effets désastreux d'ici 2020, tant sur le plan économique qu'écologique [136].

Les opérateurs ont pris conscience des efforts à réaliser à tous les niveaux. C'est dans cette

2.2 Réduction de la consommation dans les communications modernes

optique qu'est né le concept de « *Green Radio* », qui vise à optimiser la consommation d'énergie d'un réseau au niveau global, en particulier en réduisant les coûts liés aux infrastructures des opérateurs. Mais avant de parvenir à réduire durablement ces coûts, il est nécessaire de suivre une ligne de conduite commune. En effet, l'institut des standards américain, le NIST, note que le terme « *Green Communication* » manque de clarté, car il englobe aussi bien les progrès réalisés au niveau du terminal, des protocoles, que des politiques d'utilisation et d'assignation des fréquences [137]. Le NIST s'attache alors à proposer différentes règles aboutissant à une standardisation des *communications vertes*. Le consortium Greentouch² réunit constructeurs et opérateurs dans ce but [135]. En Europe, le groupe de travail COST IC1004 vient de voir le jour. Il vise à déterminer les différents critères permettant de réduire la consommation d'un réseau et des terminaux, au travers de différents modèles et outils de simulation [138].

Solutions envisagées Aujourd'hui, plusieurs solutions sont envisagées pour réduire la consommation des réseaux du futur. La première solution consiste à utiliser les relais, qui sont amenés à être directement intégrés aux normes de communications modernes. Grâce à des relais couplés à une allocation de ressources dans un réseau LTE, Han et al. minimisent la consommation par cellule [139]. Ils proposent de réduire les effets des interférences et d'utiliser un routage efficace en énergie pour limiter la consommation des utilisateurs.

Une autre solution consiste à rapprocher les stations de base de l'utilisateur final. C'est le principe des *femto-cellules*. En effet, les communications modernes ont majoritairement lieu à l'intérieur des bâtiments [140]. Il est donc plus intéressant pour un opérateur d'augmenter le nombre de points d'accès en intérieur, ce qui a pour effet de réduire à la fois la consommation d'énergie des stations de base et des utilisateurs, tout en fournissant une meilleure couverture du réseau [140]. La puissance de transmission d'une femto-cellule est limitée, ce qui réduit aussi les interférences. Finalement, le déploiement de femto-cellules limite les investissements, avec des dépenses opérationnelles qui garantissent un retour sur investissement dans les trois années suivantes d'après [141].

Il est aussi intéressant de capitaliser sur les capacités d'adaptation des radio logicielles et cognitives. Pour Benedetto et Correia [142], l'intelligence ambiante pourra être employée pour optimiser la durée de vie d'un réseau opportuniste. Cependant, il est important de repenser les communications suivant plusieurs axes, notamment du point de vue de l'énergie. Pour Popovski, il est nécessaire de repartir sur des bases saines avant de développer les systèmes de télécommunications du futur. Dans [143], Popovski expose les principaux challenges à très long terme, en opposition aux contraintes actuelles, en particulier la rétrocompatibilité et la régulation des fréquences dont le but de contrôler les interférences. Il estime que les contraintes

2. <http://www.greentouch.org>

2 État de l'art

actuelles bloquent l'évolution, mais que paradoxalement, seule l'évolution peut faire changer ces contraintes en offrant de nouvelles possibilités de communication. Pour cela, il propose d'utiliser les radio cognitives comme une solution s'adaptant afin de réduire les interférences, voire d'en tirer partie en tant que monnaie d'échange.

Nous analysons maintenant différentes façons de réduire la consommation d'énergie grâce aux technologies présentées à la section 2.1.

2.2.2 Réduction de la consommation grâce aux relais

Cette partie s'intéresse à la réduction de la consommation grâce aux relais. Elle présente différentes utilisations des relais, toujours dans un but de réduction de la consommation.

2.2.2.1 Évaluation de la consommation d'énergie des relais

Les relais sont une des solutions pour réduire la consommation d'énergie au sein des communications modernes. En se rapprochant des utilisateurs, les relais offrent la possibilité de réduire la puissance de transmission, et donc la consommation d'énergie. Pour une évaluation précise des gains atteignables par un relais, il est nécessaire de modéliser les différents paramètres influençant la consommation d'énergie.

Modèles d'énergie analytiques pour les relais Un modèle d'énergie évalue l'influence de plusieurs paramètres sur la consommation d'énergie. Il permet de dégager les principaux critères à optimiser pour réduire la consommation en fonction du contexte étudié.

Kerasiotis et al. évaluent l'énergie d'un réseau de capteurs de manière réaliste [144]. Ils évaluent le taux de décharge de la batterie en fonction des opérations d'un capteur, et de sa configuration matérielle. Ils proposent d'augmenter la durée de vie d'un capteur via des modes d'opération qui réduisent l'activité du processeur, de la radio, des diodes électroluminescentes... Ce travail évalue la consommation au niveau de la couche physique, en fonction du matériel. Il ne prend pas en compte les problématiques liées au réseau de capteurs en lui-même, comme la couche MAC et le routage.

Dargie et al. évaluent le nombre de sauts optimal pour réduire la consommation d'énergie d'un réseau de capteurs utilisant des couches MAC et routage basse consommation [145]. Ils prennent en compte les retransmissions dues aux erreurs de transmission et aux collisions suivant une approche probabiliste. De même, ils considèrent les écoutes passives, caractérisées par la réception de données par un nœud qui n'en est pas le destinataire. Ce phénomène s'observe notamment avec les paquets de contrôle de la couche MAC, qui sont transmis à la puissance maximale. Les auteurs remarquent que la consommation d'énergie dépend fortement de la densité d'un réseau, et plus particulièrement de l'intervalle de transmission d'un nœud. En effet, plus cet intervalle est long, plus la consommation globale diminue, mais au détriment

2.2 Réduction de la consommation dans les communications modernes

de la latence. Cependant, la consommation d'énergie globale est évaluée comme la somme des puissances de transmission, sans tenir compte de la consommation matérielle des capteurs.

Ahmad et al. évaluent la consommation d'un système de relais 802.11g en régime saturé [146]. Pour ce faire, ils proposent un modèle d'énergie probabiliste qui prend en compte les paquets de contrôle et les collisions, au sein d'une couche MAC adaptée aux relais (rDCF). La consommation est évaluée pour un canal idéal, chaque nœud transmettant la même quantité de données. Les résultats montrent que l'énergie totale d'un réseau dépend fortement des écoutes passives.

Alam et al. proposent un modèle réaliste cross-layer pour évaluer la consommation d'énergie d'un capteur [147]. Ils prennent en compte l'impact de la couche MAC sur la consommation d'un capteur notamment via le réveil du nœud et la probabilité de collision (et donc les retransmissions). Ce modèle prend aussi en compte la consommation logicielle et matérielle du capteur. Alam et al. valident le réalisme de leur modèle grâce à des mesures expérimentales menées sur un banc de test, en utilisant une couche MAC optimisée (RICER3). Ils montrent que l'énergie consommée pour transmettre un bit avec succès dépend à la fois de la distance et de la puissance de transmission, mais aussi des paramètres de la couche MAC, comme le temps de réveil (lié à l'écoute du canal) et les collisions (liées au taux de retransmissions). Cependant, cette étude reste focalisée sur la consommation d'un nœud émetteur qui utilise une couche MAC bien précise.

Tran et al. présentent un modèle d'énergie pour des relais coopératifs [148]. Ils évaluent la consommation d'énergie d'un relais coopératif en fonction des paramètres de la couche physique. Le modèle d'énergie proposé prend en compte la consommation d'énergie par bit de la partie numérique et de la partie radio d'un nœud, avec une puissance de transmission qui s'adapte aux conditions de canal. Ce modèle est ensuite utilisé pour comparer différents algorithmes de transmission dans un scénario de relais coopératif, où le nœud source possède plusieurs antennes et où les autres nœuds n'ont qu'une seule antenne.

Simulations réseaux pour l'évaluation d'énergie des relais Contrairement aux approches analytiques pures, les simulations réseaux permettent d'intégrer plus facilement des paramètres réalistes. Plusieurs travaux se sont intéressés à la consommation d'énergie des relais. Zhang et al. évaluent un relais opportuniste du point de vue de la couche physique, tout en prenant en compte la couche MAC [149]. Au travers de simulations utilisant des modèles de canal réalistes, ils mettent en avant l'intérêt des communications opportunistes dans un canal à évanouissement de Rayleigh. Dans ce cas, un nœud peut bénéficier de conditions favorables en communiquant via un relais qui minimise alors le ratio d'énergie consommée par bit en fonction de la distance.

Gao et al. analysent les gains de l'agrégation au sein des relais coopératifs, en utilisant une

approche cross-layer et un modèle de canal réaliste [150]. Ils comparent plusieurs stratégies de relais, et montrent que la coalition de plusieurs nœuds en un système multi-antenne virtuel amène à une réduction de l'énergie plus importante qu'avec un relais unique. Cependant, ces résultats sont fortement dépendants des hypothèses choisies, la consommation numérique des capteurs n'étant pas prise en compte.

2.2.2.2 Comment relayer pour réduire la consommation ?

Dans un réseau composé de terminaux identiques, la mise en place de relais apporte une efficacité énergétique. Pour bénéficier de ces avantages, l'utilisation d'un relais est conditionnée à plusieurs critères. Dans cette partie, nous présentons tout d'abord des métriques de sélection du relais, puis des exemples tirant partie d'un relais, le tout dans un but de réduction de l'énergie.

Métriques génériques Le choix d'un relais est avant tout lié à une métrique. Il convient alors de s'intéresser à des métriques permettant de réduire la consommation d'énergie grâce aux relais. Madan et al. se basent sur les informations de canal au niveau de chaque nœud [151]. Les nœuds disposant du meilleur canal de communication sont supposés minimiser la consommation d'énergie : ils sont candidats à former un relais avec gestion de la forme d'onde (ou *beamforming*). Un relais choisi suivant cette métrique améliore la consommation d'énergie dans un réseau coopératif. Lorsque plusieurs relais sont sélectionnés, Madan et al. proposent une stratégie adaptée qui minimise la consommation d'énergie tout en optimisant le nombre de relais utilisés.

Suivant une approche similaire, Hwang et Ko [152] se basent sur des mesures périodiques du canal en vue d'augmenter la durée de vie du réseau. Dans cette méthode, un nœud écoute le canal avant de transmettre. Le « meilleur » relais sera choisi après mesure de l'évanouissement du canal. En particulier, Hwang et Ko montrent qu'une solution sous-optimale dans le choix du relais permet tout de même de réduire la consommation d'énergie d'un réseau.

Seeddik et al. minimisent la probabilité de coupure en ajustant la puissance de transmission dynamiquement pour des relais utilisant AF [153]. Suivant une stratégie adaptative, la réduction d'énergie d'un relais est plus importante qu'une simple allocation de puissance, et ce indépendamment de la distance avec le point d'accès.

Pour Lee et al., les nœuds possédant la plus grande autonomie deviennent des relais dans un réseau de capteurs multi-saut [154]. Cette sélection optimisée d'un relais permet de réduire la consommation d'énergie et d'augmenter la durée de vie du réseau.

Sélection basée sur la couche MAC Feng et al. visent à minimiser la puissance de transmission des terminaux grâce à la sélection d'un relais proche d'un point d'accès [155]. Pour

2.2 Réduction de la consommation dans les communications modernes

cela, ils modifient une couche MAC CSMA/CA, où chaque relais dispose d'un temps limité pour se porter candidat après détection de la demande d'accès au canal par un terminal source. Dans cette approche, les relais les plus proches du point d'accès disposent du laps de temps le plus court pour répondre à la requête. La première réponse correctement reçue par la source détermine le choix du relais et garantit son unicité. Suite à des simulations, Feng et al. montrent que les modes bas débit offrent une meilleure consommation ainsi qu'une meilleure portée, malgré le surcoût de la couche MAC proposée. Ils montrent que le compromis entre le nombre de relais candidats et l'énergie dépensée par un terminal est proche d'un optimal lorsque les paquets de contrôle sont transmis à la moitié de la puissance maximum autorisée. Cependant, cette constatation ne se base que sur la puissance de transmission, et nécessite de connaître la position des différents terminaux.

Dans des travaux similaires, Ben Nacef et al. adaptent une couche MAC CSMA/CA pour sélectionner un relais optimal en fonction de l'énergie et des conditions de canal [156]. Pour cela, ils utilisent un algorithme multi-critère qui tient compte de l'autonomie du relais en plus de la qualité du canal de communication. Après des simulations réseaux avec des hypothèses réalistes, la consommation d'un réseau de capteurs s'en trouve réduite de 25%, malgré un surcoût protocolaire important.

He et Li comparent la consommation d'énergie de plusieurs couches MAC, en considérant les retransmissions [157]. Ils montrent que les couches CoopMAC et EMR minimisent la consommation d'énergie d'un réseau indépendamment de sa topologie. Pour d'autres couches MAC, il est préférable de choisir un relais proche du point d'accès. De plus, la technique de « saut virtuel » minimise l'énergie en utilisant un relai lorsque la capacité du lien relayé est plus importante que pour un lien directe.

Relais opportunistes Dans un relais opportuniste, les terminaux utilisent des relais sporadiquement afin d'améliorer les conditions de communication et de réduire la consommation d'énergie. Lei et al. montrent les avantages d'un relais opportuniste pour réduire la consommation d'un réseau cellulaire [158]. En effet, l'énergie d'un terminal dépend à la fois de sa puissance de transmission et du débit de communication (la consommation étant plus importante dans les débits élevés). Pour Lei et al., un terminal communique avec un relais de manière opportuniste si ce dernier minimise la distance avec la station de base. Suite à des simulations en environnement réaliste qui prennent en compte les interférences, ils montrent qu'un tel relais améliore la consommation d'énergie si la source a peu de données à transmettre. De même, la consommation d'énergie est inversement proportionnelle au nombre de relais opportunistes utilisés; la combinaison de ces relais avec des stations de relais fixes améliore les performances énergétiques tout en optimisant l'accès au réseau.

En complément de ces travaux, Zhu et Han étudient l'existence d'une corrélation entre le

2 État de l'art

nombre de relais et la réduction d'énergie dans les réseaux de capteurs [159]. Ils proposent un algorithme qui optimise le compromis entre le nombre de relais et la consommation d'énergie. Ils montrent que le nombre optimal de relais pour minimiser la consommation d'énergie du réseau est faiblement supérieur au nombre de relais nécessaires pour maintenir la connectivité.

Chen et al. évaluent la consommation d'énergie d'un relais multi-saut utilisant AF dans un canal à évanouissement de Rice [160]. En fonction de la position des terminaux, ils montrent que le relais à deux sauts offre la meilleure réduction d'énergie dans un canal à bruit blanc gaussien additif, et le relais à trois sauts offre la meilleure réduction d'énergie dans un canal à évanouissement de Rice. Cependant, la zone d'intérêt d'un relais est liée à la consommation matérielle des nœuds et du niveau de bruit. De plus, lorsque l'atténuation du canal est faible, il est préférable d'utiliser des connexions directes pour minimiser l'énergie.

Relais mobiles Jiang et al. ont présenté un réseau de stations auto-organisées, qui peuvent se comporter comme des relais fixes au sein d'un réseau cellulaire [161]. Ces stations, utilisées comme relais fixes, évitent des transitions trop brusques en bordure de cellules (*handover*). Elles sont en communication avec le cœur du réseau cellulaire, ce qui leur permet d'évaluer les bénéfices d'un relais sur les utilisateurs. Cette technique réduit la puissance de transmission ainsi que les interférences inter-cellules.

Nourizadeh et al. comparent les avantages et inconvénients des relais fixes et mobiles [162]. En sus d'une plus grande capacité, les relais mobiles réduisent l'énergie utilisée pour relayer un seul utilisateur. De plus, le degré de satisfaction de cet utilisateur dans son utilisation du réseau est identique qu'il soit relayé ou directement connecté. Pour Wang et al., un relais mobile augmente la durée de vie d'un réseau de capteurs jusqu'à quatre fois grâce au contrôle de puissance [163]. Dans ce dernier cas, les relais choisis disposent d'une plus grande autonomie tout en étant parfaitement intégrés au réseau de capteurs. Finalement, les relais mobiles améliorent à la fois la couverture du réseau [164, 20], la capacité [165, 162] et la consommation d'énergie d'un réseau [166, 163], tout en réduisant les coûts d'infrastructure.

2.2.3 Présentation du multi-mode pour réduire la consommation d'énergie

Dans cette partie nous présentons les différents avantages des communications multi-mode pour réduire la consommation l'énergie des terminaux, en particulier via l'utilisation de relais.

2.2.3.1 Quelques architectures multi-mode à faible consommation

Le développement d'architectures multi-mode basse consommation est une étape nécessaire vers l'augmentation de la durée de vie d'un terminal. Nous rappelons que ces architectures sont capables de travailler sur plusieurs bandes de fréquences simultanément. C'est pourquoi, la réduction de la consommation se concentre sur les éléments cruciaux de la couche physique.

2.2 Réduction de la consommation dans les communications modernes

D'après Calhoun et al., la conception de circuits multi-mode basse consommation passe par la minimisation des contraintes liées aux architectures. En effet, la consommation d'énergie des circuits est intimement liée à leur tension d'entrée ainsi qu'au nombre de transistors utilisés (in extenso au nombre d'opérations réalisées) [167].

Actuellement, les architectures multi-mode basse consommation proposent une réutilisation des circuits dans le traitement des signaux. Ces architectures s'adaptent en fréquence, aussi bien en transmission qu'en réception, grâce à l'emploi de circuits adaptatifs. Paek et al. développent un modulateur multi-mode basse consommation compatible GSM, EDGE et WCDMA [168]. Chen et al. implémentent des circuits multi-fréquentiels basse consommation sur un FPGA [169]. Burciu et al. présentent une architecture de réception basse consommation pour la réception simultanée des normes 802.11g et 3G, qui a la particularité de recevoir sur plusieurs bandes non contiguës tout en garantissant une complexité réduite [170].

2.2.3.2 Scénarios bénéficiant du multi-mode

Plusieurs scénarios tendent à bénéficier du multi-mode dans l'optique de réduire la consommation d'énergie. Lorsqu'un terminal mobile multi-mode se déplace, il est amené à rencontrer différents types de réseaux : des réseaux cellulaires 3G accessibles en quasi-permanence, et des réseaux WLAN avec une portée moindre mais un meilleur débit. Suite à une étude préalable de la consommation d'énergie des modes disponibles, un terminal peut choisir de communiquer sur le mode qui lui permet d'augmenter sa durée de vie. Dans ce but, un terminal établit un classement des différents réseaux disponibles en fonction de leur consommation d'énergie. Pour ce faire, Kim et al. développent une heuristique de sélection suite à un scan régulier des réseaux disponibles [171]. Pour Kim et al., les réseaux avec la consommation la plus faible sont ceux qui minimisent la puissance de transmission. En contrepartie, leur portée est plus courte, ce qui implique de gérer le basculement vers d'autres modes en fonction des disponibilités.

Pour Inwhae et al., le multi-mode est aussi une solution pour réduire la consommation d'énergie des réseaux mobiles [172]. Pour cela, ils évaluent la consommation des couches physiques de plusieurs modes (CDMA, WiBro et 802.11g) pour un terminal mobile multi-mode, suivant des valeurs réalistes. En fonction de la qualité de service requise par une application, du prix d'accès au réseau et de la charge de la batterie, le terminal communique sur le mode le plus économe en énergie. Ainsi, la transmission de données se réalise en changeant d'interface de manière optimisée en énergie.

Un service ambiant est un service accessible dans un contexte de mobilité. Pour utiliser de tels services, il est nécessaire de les découvrir, au travers d'un processus consommateur d'énergie. L'utilisation du multi-mode permet d'optimiser ce processus de découverte comme présenté dans [173]. Afin de palier aux besoins énergétiques de ce processus de découverte, il est possible d'utiliser les capacités multi-mode d'un terminal. En fonction du type de service

2 *État de l'art*

requis, l'interface la plus économe en énergie répondant aux critères du service sera utilisée. Après une évaluation réaliste de plusieurs standards (802.11b, GPRS et Bluetooth), les auteurs notent qu'un mode « basse consommation » (ici Bluetooth) n'engendre pas une consommation réelle plus faible, en raison d'un coût énergétique plus élevé par paquet.

2.2.3.3 Apport des relais multi-mode dans la réduction d'énergie.

L'application du multi-mode aux relais permet de bénéficier de relais qui communiquent sur un mode avec les utilisateurs, et sur un autre mode avec le point d'accès (ou station de base).

Albiero et al. ont utilisé des terminaux mobiles qui partagent leur connexion au sein de groupes coopératifs [174, 175]. Ces relais mobiles apportent des gains en énergie non seulement pour un terminal donné, mais aussi pour la totalité du réseau coopératif. Bien que ces travaux n'explorent pas les communications multi-mode, ils utilisent des communications 802.11g avec un premier débit propre aux communications intra-groupe, et un second débit, plus élevé, pour connecter les relais au point d'accès. Néanmoins, les auteurs ne considèrent pas d'autres paramètres que la puissance de transmission dans leur évaluation énergétique. De plus, ils n'évaluent pas les gains du multi-mode lorsque plusieurs utilisateurs sont relayés.

Yamazaki et al. utilisent des relais multi-mode pour réduire la consommation d'énergie dans un réseau de capteurs [176]. Grâce à un protocole d'accès qui prend en compte la durée de vie des batteries, un nœud sélectionne un relais si le coût énergétique de la communication relayée est plus faible que celui d'une communication directe. Yamazaki et al. comparent la consommation d'énergie par bit d'un relais multi-mode, d'un relais mono-mode et d'une connexion directe en fonction des débits des modes utilisés et des interférences. Ils concluent qu'un relais mono-mode n'est pas forcément intéressant à cause d'une latence importante et d'une durée de vie réduite des nœuds proches du puits. Au contraire, un relais multi-mode réduit la consommation par rapport aux connexions directes avec le puits. En particulier, un tel relais est avantageux pour les nœuds au centre du réseau, qui réduisent leur consommation d'énergie grâce à une meilleure résistance aux interférences. Cependant, ce travail ne prend pas en compte l'architecture radio dans l'évaluation de la consommation.

2.2.4 Plusieurs pistes pour réduire l'énergie grâce au multi-antenne

Nous avons vu qu'un terminal multi-antenne bénéficie de performances de communications améliorées, notamment grâce à la diversité. Dans cette partie, nous nous intéressons aux éventuels gains énergétiques accessibles grâce au multi-antenne.

2.2.4.1 Réduction de la consommation d'un terminal multi-antenne

Nous rappelons que l'utilisation du multi-antenne augmente la capacité du canal, particulièrement dans un canal à évanouissement. Grâce à la diversité, les terminaux bénéficient de plusieurs sources d'information pour palier aux effets du canal.

Dans les communications multi-antenne, la diversité et la sensibilité de réception augmentent avec le nombre d'antennes. Ainsi, un terminal multi-antenne communique sur de plus grandes distances qu'un terminal mono-antenne pour une puissance de transmission équivalente. Réciproquement, la puissance de transmission d'un terminal multi-antenne s'en trouve réduite sur une distance fixée [177, 178].

Un terminal multi-antenne utilise de-facto plusieurs frontaux radio-fréquence, ainsi que des algorithmes permettant d'exploiter au mieux la diversité. La consommation d'énergie d'un terminal doit alors prendre en compte ces différentes parties dans son évaluation [179], de même que les caractéristiques des composants utilisés [177]. Il est alors possible de minimiser la consommation d'énergie par bit en optimisant la couche physique et le nombre d'antennes en transmission, comme proposé par [180, 181].

2.2.4.2 Réduction de la consommation d'un relais multi-antenne

Les terminaux multi-antenne offrent une opportunité de réduire la consommation des relais. Bravos et al. évaluent la consommation d'un réseau de capteurs au travers d'un modèle d'énergie réaliste [178]. Ils comparent l'utilisation du multi-saut avec des communications multi-antenne coopératives (comparables à une communication à deux sauts). Ils montrent que la consommation d'énergie est liée à la densité du réseau et aux conditions de canal. En effet, un relais multi-antenne réduit la consommation d'énergie lorsque la distance entre les nœuds augmente, alors que l'utilisation de sauts courts est plus performante en présence de conditions de canal difficiles.

De même pour Lo et al., la consommation d'énergie d'un relais multi-antenne et multi-saut dépend à la fois de la longueur de chaque saut et du nombre d'antennes au niveau de chaque terminal [182]. Ils montrent que le multi-antenne permet de réduire la consommation d'énergie en présence de conditions de canal difficiles, et qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser beaucoup d'antennes pour réduire cette consommation lorsque le relais se fait sur des petits sauts. De plus, la consommation d'un relais multi-antenne composé de petits sauts est plus intéressante qu'avec de grands sauts en dépit d'une latence plus élevée. Ce résultat est lié aux retransmissions. Cependant, Lo et al. n'en tirent aucune généralité.

Guo et al. proposent une méthode de sélection de relais coopératifs pour augmenter la consommation d'énergie d'un réseau de capteurs [183]. En prenant en compte la consommation numérique des capteurs, ils développent une méthode d'optimisation cross-layer qui adapte les paramètres de la communication (débit et nombre d'antennes). Finalement, ils construisent

2 *État de l'art*

une architecture distribuée de relais multi-antenne plus efficace d'un point de vue énergétique que les communications directes.

Nguyen et al. comparent les performances et la consommation d'un relais coopératif avec des transmissions MISO coopératives, où des nœuds sources transmettent simultanément, au sein d'un réseau de capteur [184]. Ils montrent que les communications MISO coopératives permettent de réduire la consommation d'énergie du réseau, que ce soit par rapport à un relais coopératif ou des connexions directes. Ce résultat est dû à la réduction de la puissance de transmission des nœuds en MISO. Cependant, les transmissions MISO coopératives nécessitent une synchronisation, elle-même soumise aux erreurs, auquel cas la consommation d'un relais coopératifs devient plus intéressante.

2.2.5 Impact énergétique des radios logicielles

Comme nous l'avons vu précédemment, une radio logicielle est basée sur des circuits électroniques. La consommation d'énergie de ces circuits est intimement liée au nombre de transistors actifs lors de l'exécution d'un programme. Au niveau logiciel, il convient d'améliorer l'utilisation de ces transistors via des algorithmes optimisés. D'un point de vue matériel, la réduction de la taille des transistors a permis d'obtenir des architectures basse consommation. Ainsi, il est intéressant d'appliquer ces techniques à la radio logicielle dans un but de réduction de la consommation. Cette partie se concentre sur l'utilisation de radios logicielles pour réduire la consommation d'énergie du terminal et du réseau.

2.2.5.1 Architectures logicielles basse consommation

Alors que le besoin de réduire l'énergie est un problème de plus en plus important, la radio logicielle se pose en acteur d'une consommation maîtrisée [185]. Noguét et al. présentent les besoins et les problématiques à résoudre dans l'utilisation de la radio logicielle comme base des technologies du futur [186]. Ils indiquent les précautions à prendre aux différents niveaux de la conception d'une radio logicielle : architecture des circuits, portabilité et efficacité énergétique du code, prise en compte des contraintes cross-layer et capacités de reconfiguration. Le tout permettant d'arriver à un compromis entre la flexibilité offerte par le terminal et son efficacité énergétique. Pour cela, Noguét et al. jugent critique l'utilisation d'une approche efficace en énergie dans la conception des circuits, d'autant plus que la taille des composants se rapproche des limites physiques (taille de l'atome).

Plusieurs architectures pour la radio logicielle se concentrent sur la réduction de la consommation. Ces architectures prennent la forme de systèmes sur puces qui intègrent à la fois la chaîne de traitement numérique et la partie radio sous forme de circuits programmables et réutilisables. Par exemple, SODA [187] et son successeur SODA 2 [188] sont des processeurs basse consommation adaptés au multi-mode. Ils proposent des performances énergétiques ré-

2.2 Réduction de la consommation dans les communications modernes

duites grâce à la réutilisation de circuits pour différentes fonctions. Ces processeurs permettent d'implémenter des couches physiques 802.11a et WCDMA simultanément sous la forme d'instructions SIMD *Single Instruction, Multiple Data*. Sandblaster est un processeur multi-thread qui suit une approche similaire à SODA [189]. Il propose des modes supplémentaires, comme le GPS et la radio FM via l'utilisation de blocs programmés en C. L'architecture RICA [190] est un processeur multi-mode 802.11g et UMTS intégrant un contrôleur ARM qui supporte des débits plus élevés que SODA pour une consommation moindre.

Toujours dans la problématique d'une couche physique reconfigurable, Montium propose une architecture radio logicielle reconfigurable, basse consommation, basée sur des blocs programmables, les « tuiles » [191]. Montium permet l'utilisation de plusieurs modes en parallèle, grâce au partage et au paramétrage des différents blocs. Ces blocs doivent être chargés dynamiquement par le cœur de l'architecture, en étant préinstallés ou téléchargés par les airs.

Ces architectures de radio logicielle fournissent les circuits adaptés aux opérations de la couche physique d'un protocole, qui sont programmées dans blocs logiciels. Néanmoins, une radio logicielle peut aussi être amenée à réaliser les opérations des couches MAC et réseaux, comme proposé dans [192], où Berlemann et al. réutilisent différents blocs programmables pour implémenter une pile protocolaire réaliste pour le 802.11g et l'UMTS.

2.2.5.2 Radio logicielle multi-mode et réduction d'énergie

Nous avons vu que la radio logicielle offre une solution de facilité pour implémenter le multi-mode. Nous nous intéressons maintenant à l'utilisation de la radio logicielle multi-mode dans le but de réduire la consommation d'énergie, tant pour un terminal que pour un réseau.

Prise en compte des contraintes énergétiques La conception d'une architecture radio logicielle multi-mode repose sur différents principes. Grâce aux facilités de programmation offertes par une radio logicielle, il devient facile d'adapter les composants aux modes choisis pour communiquer. Pour Laskar et Lim, cette reconfiguration permet de réduire la consommation grâce à des architectures multi-mode basse consommation [193]. Néanmoins, une radio logicielle multi-mode doit répondre à certains challenges pour atteindre les objectifs de consommation. En effet, la réduction de la consommation passe aussi bien par des circuits analogiques basse consommation que par des traitements numériques à faible complexité, le tout répondant aux problématiques générales du multi-mode.

Zlydareva et Sacchi proposent un modèle de programmation multi-couche pour faciliter l'implémentation du multi-mode dans les radio logicielles [194]. Dans ce modèle, chaque bloc logiciel effectue des traitements indépendamment des autres blocs, avec lesquels il interagit pour implémenter une couche physique. La reconfiguration d'un terminal passe par la redéfinition de la hiérarchie des blocs dans la chaîne de traitement. De plus, Zlydareva et Sacchi

expliquent la nécessité de réduire la complexité algorithmique des blocs pour améliorer les temps de calcul et les performances d'un système, et donc la consommation d'énergie.

Quelques exemples d'utilisation Les capacités de reconfiguration d'une radio logicielle multi-mode permettent de choisir un mode de communication dans le but de réduire la consommation d'énergie. Les différentes métriques présentée ci-dessus s'adaptent tout particulièrement à la radio logicielle, qui dispose aussi de la possibilité de télécharger de nouveaux modes. Grâce à cette flexibilité, les connexions permanentes deviennent envisageables. Pour Debaille et al., le choix du mode s'effectue en fonction des conditions de canal au moment de la communication [195]. Le groupe travail IEEE 802.22 se charge de standardiser la transition entre différents modes exploitant des fréquences non licenciées [99]. Bien que ces approches ne garantissent pas une réduction de la consommation à long terme, il est toutefois possible d'y intégrer une composante énergétique dans leurs critères d'évaluation.

Pour cela, Hong et Choi trouvent un compromis énergie/débit en minimisant la probabilité de coupure pour accéder à un réseau dans le cadre de la transition verticale [196]. Ils proposent des relais fixes basés sur des terminaux multi-mode radio logicielle. Les terminaux, eux-aussi multi-mode, sont relayés après s'être enregistrés auprès de la station de base. Cette sélection permet de maximiser le débit en présence de conditions de canal difficiles, mais elle nécessite que les relais connaissent les informations du canal.

L'apparition de radio logicielles multi-mode combinées aux méthodes présentées ci-dessus ouvre la voie à des réseaux basés sur la radio cognitive. Ganesan et Li proposent une métrique calculée localement par un terminal cognitif [197]. Dans le cadre de la radio cognitive, les utilisateurs cognitifs sont libres d'utiliser des fréquences tant qu'il ne causent pas d'interférences aux utilisateurs d'un réseau licencié (le plus souvent payant). Ainsi, deux terminaux cognitifs peuvent décider d'utiliser un mode donné sur une certaine fréquence, après avoir évalué que leur communication ne causera pas d'interférence aux terminaux licenciés. Dans le cas contraire, les terminaux cognitifs négocient pour utiliser une nouvelle fréquence.

La radio logicielle pour des relais multi-mode et multi-antenne Plusieurs travaux se rapprochent des objectifs de notre thèse, en combinant différentes méthodes présentées ci-dessus en vue de réduire la consommation d'énergie. Adinoyi et Yanikomeroğlu combinent radio logicielle et multi-antenne dans le cadre de relais coopératifs fixes [198]. Ils montrent que l'utilisation de plusieurs antennes au niveau des relais améliore considérablement les performances en réception. Il est alors envisageable de réduire le nombre de relais. De plus, la réception sur deux antennes offre une diversité suffisante garantissant un bon compromis performance/complexité.

Zhang et al. réalisent un banc de test pour évaluer les performances de relais composés de radio logicielles multi-mode [199]. Par le biais de mesures dans plusieurs modes, Zhang et al.

2.2 Réduction de la consommation dans les communications modernes

montrent que le débit atteignable par un relais coopératif multi-antenne est plus important que dans le cadre d'un relais simple, lui-même plus performant que les connexions directes. Ces résultats sont dus à l'exploitation de la diversité.

Nous venons de voir que la combinaison de plusieurs techniques apporte des performances intéressantes pour les réseaux du futur. La combinaison de relais multi-mode avec du multi-antenne, le tout utilisant des terminaux radio logicielle, offre des perspectives intéressantes. Cependant, la consommation d'énergie de ces systèmes n'est pas évaluée. Dans cette thèse, nous cherchons à comprendre et évaluer les différents critères influençant la consommation d'énergie. Notre but est de proposer des règles d'utilisation de ces technologies permettant de minimiser la consommation globale d'énergie.

Méthodologie suivie

3.1	Présentation du problème	39
3.1.1	Contexte d'étude	40
3.1.2	Apports de la thèse	41
3.2	Évaluation analytique de la consommation d'énergie par bit	42
3.2.1	Modèle d'énergie réaliste pour le multi-mode	43
3.2.2	Évaluation de l'énergie numérique d'un mode	43
3.2.3	Évaluation de l'énergie radio d'un mode	44
3.2.4	Modèles de canaux utilisés	44
3.2.4.1	Présentation des modèles de canaux choisis	45
3.2.4.2	Validation des modèles par l'expérimentation	46
3.2.5	Adaptation de la puissance d'émission	47
3.3	Évaluation analytique de la consommation d'un terminal multi-mode	48
3.3.1	Calcul de la consommation pour un terminal multi-mode	48
3.3.2	Évaluation de la consommation d'un scénario	48
3.4	Simulations réseaux pour un réalisme accru	49
3.4.1	Prise en compte de la couche MAC	49
3.4.2	Présentation de WSNets	51
3.4.3	Discussion sur l'apport des simulations réseaux	54
3.5	Synthèse	54

3.1 Présentation du problème

L'émergence des communications mobiles a rendu possible l'utilisation d'Internet sans contrainte, ni de lieu ni de temps. Les utilisateurs profitent de cette mobilité grâce à des terminaux fonctionnant sur batterie, ce qui donne lieu à des problématiques nouvelles, comme la réduction d'énergie. La recherche a étudié une large gamme de solutions destinées à réduire cette consommation d'énergie, tant au niveau des terminaux que des réseaux. Dans cette section, nous présentons le contexte menant à cette thèse ainsi que nos apports.

3.1.1 Contexte d'étude

Au début de cette thèse, la réduction d'énergie s'appliquait principalement au contexte des réseaux de capteurs. Cette réduction d'énergie apparaît cruciale avec l'essor de la mobilité et les nouveaux usages des terminaux portables. Notamment, l'augmentation des performances des terminaux et la multiplication de leurs modes de communication requiert une consommation maîtrisée pour garantir une certaine autonomie. Certes, la technologie vise à réduire cette consommation grâce à des architectures optimisées en énergie, des modes de communication basse consommation et des batteries à la capacité toujours plus élevées. Mais seule l'utilisation intelligente de ces technologies permet d'améliorer les performances énergétiques. C'est pourquoi cette thèse s'intéresse à étudier l'utilisation de plusieurs techniques existantes dans le but de réduire la consommation d'énergie, tant pour un terminal que pour un réseau.

Les relais Les relais font partie des solutions actuellement déployées pour améliorer les communications. Ils augmentent la couverture du réseau, tout en minimisant la consommation d'énergie. Les relais permettent aussi de réduire les coûts d'exploitation du réseau pour l'opérateur, avec un entretien simplifié. Jusqu'à présent, les travaux de recherche se concentraient sur l'amélioration de la capacité des réseaux grâce aux relais. Peu de solutions proposent d'exploiter au mieux ces relais pour optimiser la consommation d'énergie. En effet, quels sont les critères permettant de décider si un relais est intéressant de ce point de vue ? Quand est-ce qu'un relais devient une solution intéressante pour réduire l'énergie ? Les réponses à ces questions sont importantes pour mettre en œuvre les télécommunications du futur. Or, si les relais sont capables de réduire la consommation des réseaux, il reste difficile de quantifier ce gain. Il est alors nécessaire de disposer d'outils réalistes, qui permettent d'évaluer la consommation selon des critères précis.

Le multi-mode L'accès à Internet est devenu indispensable aux utilisateurs d'applications mobiles, qui tirent partie des possibilités offertes par les terminaux actuels. Ces derniers bénéficient d'une capacité de communication étendue, via l'utilisation de différents standards : ce sont des terminaux *multi-mode*. Un terminal multi-mode peut alors choisir son mode de communication, en fonction de critères variés : débit, qualité de service, prix, etc. Dans un but de réduction d'énergie, il devient possible de réduire la consommation du terminal en utilisant un mode approprié. De ce fait, l'énergie devient un critère au développement des nouveaux protocoles de communications. Mais comment caractériser l'énergie d'un mode ? Quelles sont les composantes qui entraînent une consommation réduite ? Les réponses à ces questions amèneront à réduire la consommation d'énergie d'un terminal multi-mode, en lui offrant la possibilité de communiquer sur le mode le plus efficace en énergie.

La radio logicielle Actuellement, chaque mode fait appel à un circuit dédié, qui réalise les opérations propres à sa couche physique. De plus en plus, des circuits multi-mode permettent de réduire les coûts, en mutualisant certaines opérations communes. Mais ces derniers restent cependant dédiés à quelques modes choisis et n'amènent pas de possibilité d'évolution. Dans le futur, ces composants seront remplacés par des solutions totalement logicielles, où un processeur générique implémente un mode sous la forme d'un programme. C'est le concept de la *radio logicielle*. Le but de la radio logicielle est de permettre la communication sur n'importe quel mode, de façon totalement transparente pour l'utilisateur. En suivant ce principe, nous nous demandons si le choix du mode permet de réduire la consommation d'énergie. Nous essayerons de répondre à cette question en étudiant la consommation d'énergie d'un terminal multi-mode basé sur la radio logicielle.

Le multi-antenne De la même manière, les nouveaux modes de communication visent à atteindre des débits élevés tout en gardant les avantages de la mobilité. Pour cela, l'utilisation de plusieurs antennes est souvent privilégiée. Un terminal communiquant sur plusieurs antennes est appelé *multi-antenne*. Les recherches ont montré l'intérêt du multi-antenne grâce à une augmentation de la diversité : la capacité s'en trouve améliorée pour une consommation réduite. Il est néanmoins nécessaire de disposer d'une évaluation réaliste de la consommation du multi-antenne. De plus, il est difficile de connaître les gains en énergie des communications multi-antenne comparativement à un relais. Il en va de même concernant l'utilisation combinée du multi-antenne et du multi-mode au sein d'un relais. Dans nos travaux, nous considérons l'utilisation du *multi-antenne* dans le cadre d'un relais multi-mode.

3.1.2 Apports de la thèse

Dans cette thèse, nous essayons de répondre aux questions posées ci-dessus de plusieurs manières. Nous nous intéressons à la consommation d'énergie du point de vue de la couche physique, avec une prise en compte de certains aspects de la couche MAC. Tout d'abord, nous développons des outils nous permettant d'évaluer la consommation d'énergie des terminaux multi-mode, en utilisant une radio logicielle. Puis, nous utilisons ces outils dans le cadre de scénarios définis, afin d'obtenir une évaluation précise de l'énergie. Notre but est de déterminer les différents critères à prendre en compte dans la consommation d'énergie d'un terminal en fonction de ses capacités. Enfin, nous proposons des règles pour optimiser la consommation d'énergie d'un réseau.

Modèle d'énergie réaliste Dans cette thèse, nous utilisons les propriétés d'un terminal radio logicielle, qui se compose d'une partie numérique et d'une partie radio. La première étape consiste à évaluer la consommation d'énergie d'un tel terminal. Dans ce but, nous

3 Méthodologie suivie

proposons un modèle d'énergie réaliste pour le multi-mode. Ce modèle analytique est étendu pour prendre en compte la couche MAC et le multi-antenne. Ainsi, il nous est possible de connaître la consommation d'un terminal en fonction de ses caractéristiques, et ce pour chaque mode utilisé. Nous utiliserons ces résultats pour évaluer l'intérêt énergétique d'un relais multi-mode au sein de différents scénarios.

Évaluation de la complexité L'utilisation d'une radio logicielle considère une couche physique composée de deux parties : une partie numérique effectue les traitements du signal et de la bande de base, tandis qu'une partie radio s'intéresse à l'envoi et à la réception du signal analogique. Au sein d'une radio logicielle, la couche physique est alors implémentée sous la forme de blocs programmables. Pour un terminal multi-mode, ces blocs peuvent être partagés entre les différents modes.

La consommation d'énergie est fortement liée à la conception de ces blocs. Pour cela, nous évaluons la complexité de la couche physique, pour des modes choisis au sein de trois protocoles : 802.11g, 802.15.4 et UMTS. Cette évaluation de la complexité est réalisée pour un bit de données, afin de comparer les modes étudiés.

Simulateur réseau multi-mode Pour étudier la consommation d'énergie de manière réaliste, l'utilisation d'un simulateur réseau apparaît nécessaire. En effet, une étude purement analytique devient difficile lorsqu'il s'agit de représenter les interactions entre utilisateurs, notamment avec la prise en compte d'une couche MAC. Nous choisissons WSNNet, un simulateur réseau à événements discrets, au sein duquel nous implémentons le multi-mode et le multi-antenne. Nous bénéficions ainsi d'un outil fournissant une évaluation réaliste de la consommation d'énergie, avec une prise compte de la couche MAC. Grâce à WSNNet, nous pouvons quantifier les gains des relais multi-mode et du multi-antenne sur la consommation d'énergie d'un réseau pour des scénarios donnés.

3.2 Évaluation analytique de la consommation d'énergie par bit

L'utilisation du multi-mode nous amène à évaluer la consommation sur une base commune. Lorsqu'un utilisateur transmet des données, la couche application envoie des bits aux couches inférieures du modèle OSI. Ces bits sont transmis à la couche physique en suivant un certain format de trame (de niveau 2). Les critères de ces trames sont imposés par le standard choisi pour communiquer.

Dans une approche multi-mode, la compatibilité entre les trames de chaque mode n'est pas assurée (par exemple, différence de taille). Pour cela, nous nous basons sur une approche par bit de données, en considérant uniquement les données transmises par l'utilisateur. Ainsi, il

3.2 Évaluation analytique de la consommation d'énergie par bit

sera aisée de comparer la consommation de chaque mode, en fonction des données transmises par un utilisateur.

Une autre approche valide aurait été de prendre une période de référence d'une seconde. Néanmoins, il aurait fallu considérer un terminal toujours actif, ce qui n'est pas un comportement très réaliste.

3.2.1 Modèle d'énergie réaliste pour le multi-mode

Nous présentons maintenant un modèle d'énergie réaliste pour le multi-mode. La consommation d'énergie d'un terminal radio logicielle multi-mode est liée à l'énergie consommée par ses modes actifs. Dans cette partie, nous présentons un modèle d'évaluation de l'énergie pour un seul mode, dénoté m_j .

Au sein de chaque mode, nous séparons la transmission (TX) et la réception (RX) dans le calcul de la consommation d'énergie. De plus, l'énergie d'un terminal RL est répartie entre sa partie numérique et sa partie radio (analogique). La partie numérique est liée aux différents algorithmes utilisés en bande de base et pour le traitement du signal. Elle est réalisée par un processeur, qui implémente une suite d'opérations propres à chaque mode. La partie radio dépend du frontal radio-fréquence, qui implémente les composants nécessaires à la transmission et à la réception d'un signal analogique.

Nous définissons l'énergie par bit, E_{bit} , comme l'énergie totale nécessaire à un terminal pour la bonne transmission/réception d'un bit dans le mode choisi. Comme nous venons de la voir, cette énergie par bit est constituée d'une part de la consommation d'énergie numérique, notée E_{num} , d'autre part de la consommation d'énergie radio, notée E_{rf} . Nous écrivons donc :

$$E_{\text{bit}} = E_{\text{num}} + E_{\text{rf}} \quad (3.1)$$

Par la suite, nous évaluerons la consommation de chaque composante indépendamment, au sein d'un mode donné.

3.2.2 Évaluation de l'énergie numérique d'un mode

Nous expliquons maintenant comment évaluer la consommation d'énergie de la partie numérique, E_{num} , exprimée en Joule par bit. Comme présenté dans [200], la consommation d'énergie dépend à la fois de l'architecture du processeur et du nombre de cycles nécessaire à l'exécution des algorithmes.

3 Méthodologie suivie

Nous définissons E_{num} , la consommation d'énergie de la partie numérique d'après [200] :

$$E_{\text{num}} = K E_{\text{cpu}} = K A_C V_{dd}^2 \quad (3.2)$$

avec K le nombre d'opérations réalisées par le processeur pour le traitement d'un bit de données, $E_{\text{cpu}} = A_C V_{dd}^2$ (en Joule) la consommation d'énergie du processeur pour le traitement d'un bit de données. E_{cpu} dépend de l'architecture du terminal, avec A_C (en Farad) la capacité de bascule du processeur, et V_{dd} (en Volt), la tension d'entrée du processeur, qui peuvent se retrouver dans les spécifications du constructeur.

Ainsi, E_{num} représente l'énergie consommée par un terminal pour réaliser les K opérations nécessaires à l'implémentation de la chaîne de transmission/réception d'un mode m_j . Du point de vue des unités, E_{num} s'exprime en Joule par bit, sachant que K représente le nombre d'opérations pour un bit de données et que $1 \text{ Farad} = 1 \frac{\text{Joule}}{\text{Volt}^2}$.

3.2.3 Évaluation de l'énergie radio d'un mode

Nous évaluons maintenant la consommation d'énergie radio pour un mode, E_{rf} , qui s'exprime en Joule par bit. Cette consommation dépend de l'architecture et de l'activité du frontal radio-fréquence, ainsi que de la puissance de transmission. Cette puissance de transmission, notée P_{out} , est à la fois liée aux spécifications du mode de communication choisi et aux conditions de canal.

En nous basant sur [201], nous définissons E_{rf} comme suit :

$$E_{\text{rf}} = \frac{1}{R} (P_{\text{frontend}} + \theta P_{\text{out}}) \quad (3.3)$$

avec R le débit du mode (en bits par seconde), P_{frontend} (en Watt), la consommation de l'architecture du frontal radio-fréquence, P_{out} (en Watt) la puissance de transmission, et $\theta = 1$ représentant la transmission (0 autrement). Sachant que $\frac{1}{R}$ représente le temps nécessaire à l'envoi ou la réception d'un bit de données, E_{rf} est bien en Joule par bit (comme spécifié précédemment).

A noter que P_{frontend} dépend des spécifications du frontal radio. Généralement, cette valeur reste fixée pour un mode donné, avec des composantes différentes en transmission et en réception. Dans la section 3.2.5, nous expliquons comment évaluer la puissance de transmission P_{out} en fonction des conditions de canal.

3.2.4 Modèles de canaux utilisés

Dans une communication, les données sont envoyées sur un média, qui assure leur propagation. Ce média représente le canal de communication entre deux utilisateurs.

3.2 Évaluation analytique de la consommation d'énergie par bit

Lors d'une communication sans-fil, ce média est l'air. Les données sont alors représentées par un signal analogique, qui est modifié en fonction de l'environnement extérieur : atténuation, évanouissement, bruit, diffraction, réflexions... Ces différentes contraintes définissent les caractéristiques du canal. En multi-mode, chaque canal subit ces effets de manière indépendante. Ici, nous allons principalement considérer l'atténuation, qui agit comme la composante majeure des conditions d'un canal. Ainsi, nous définissons L_j l'atténuation propre à un mode m_j lors de la transmission d'un signal dans ce mode.

3.2.4.1 Présentation des modèles de canaux choisis

Afin d'évaluer la consommation d'énergie de manière réaliste, nous utilisons des modèles de canaux adaptés à chaque mode. Ces modèles de canaux réalistes représentent un environnement de propagation donné, avec une atténuation fonction de plusieurs paramètres. Les modèles choisis considèrent une propagation du signal en fonction de la distance, de la fréquence et d'un facteur lié à l'environnement de propagation. Nous présentons des modèles de propagations dédiés au 802.11g, à l'UMTS et au 802.15.4. Sachant que nous adaptons la puissance de transmission P_{out} en fonction de l'atténuation, il y a un risque de mal estimer la consommation d'énergie de certains modes en utilisant un modèle d'atténuation commun à tous les modes.

Modèle 802.11g Nous utilisons un modèle de canal ITU-R en environnement de bureau pour le 802.11g [202]. Le modèle ITU-R est un modèle probabiliste et déterministe, paramétré après expérimentation. Il est adapté aux communications des réseaux locaux sans-fil, avec une large gamme de fréquences (de 900 MHz à 5 GHz). Le modèle ITU-R dépend aussi du nombre moyen de murs traversés.

L'atténuation du modèle ITU-R est notée L_{ITU-R} et s'exprime en dB comme suit :

$$L_{ITU-R} = 20 \log_{10}(f) + 30 \log_{10}(d) - 28 + L_{mur}(w) \quad (3.4)$$

avec f la fréquence porteuse (en MHz), d la distance entre les deux terminaux (en m), -28 le coefficient de perte en espace libre, et $L_{mur}(w) = 15 + 4(w - 1)$ le facteur de perte dû aux murs traversés, pour w murs traversés par le signal.

Modèle UMTS Nous utilisons un modèle de canal COST Hata pour l'UMTS [203]. Comme précédemment, le modèle COST Hata est un modèle probabiliste et déterministe, paramétré après expérimentation. Il est particulièrement adapté aux communications mobiles UMTS en milieu urbain ; il s'applique aux fréquences comprises entre 1,5 GHz et 2 GHz. Le modèle COST Hata dépend aussi de la taille de la cellule UMTS, ainsi que des hauteurs de la station de base et du mobile.

3 Méthodologie suivie

L'atténuation du modèle COST Hata est notée L_{Hata} et s'exprime en dB comme suit :

$$\begin{aligned} L_{\text{Hata}} = & 33.9 \log_{10}(f) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{BS})) \log_{10}(d) \\ & + 46.3 - 13.82 \log_{10}(h_{BS}) - a(h_{\text{mobile}}) + L_{\text{scat}} \end{aligned} \quad (3.5)$$

avec f la fréquence porteuse (en MHz), d la distance entre la source et la destination (en km), h_{BS} la hauteur de la station de base UMTS (en m), h_{mobile} la hauteur du terminal mobile (en m), L_{scat} définissant la diffusion des ondes au sein de l'environnement considéré (en dB). De plus, $a(h_{\text{mobile}})$ représente le facteur de correction lié à la hauteur du mobile. Il est spécifié comme suit :

$$a(h_{\text{mobile}}) = 1.1 \log_{10}(f - 0.7) \cdot h_{\text{mobile}} - (1.56 \log_{10}(f) - 0.8) \quad (3.6)$$

Modèle 802.15.4 Nous utilisons un modèle de canal de Friis pour le 802.15.4 [204]. Le modèle de Friis est un modèle de propagation théorique. Il dépend d'un facteur permettant de varier l'atténuation du signal en fonction de l'environnement.

L'atténuation du modèle de Friis est notée L_{Friis} et s'exprime en dB comme suit :

$$L_{\text{Friis}} = r \left[10 \log_{10}(f) + 10 \log_{10}(d) + 10 \log_{10}\left(\frac{4\pi}{C}\right) \right] \quad (3.7)$$

avec f la fréquence porteuse (en Hz), d la distance entre les deux terminaux (en m), C la vitesse de la lumière (soit $C \approx 3 \cdot 10^8$ m/s), et r le facteur d'atténuation.

3.2.4.2 Validation des modèles par l'expérimentation

Nous évaluons la validité de ces modèles grâce à des expérimentations réalisées au laboratoire CITI. Nous utilisons un générateur de fréquences émettant à une puissance fixe, ainsi qu'un récepteur mobile. La puissance de réception du signal permet alors de connaître l'atténuation de manière aisée. Cependant, l'environnement 802.11g étant particulièrement perturbé par un grand nombre de réseaux Wi-Fi, nous évaluons le modèle ITU-R pour une fréquence proche de 2,3 Ghz. Le modèle 802.15.4 est évalué pour une fréquence de 868 MHz. Le modèle COST Hata n'est pas évalué à cause de la faible distance disponible lors des mesures et de la présence importante d'interférences liées aux réseaux d'opérateurs.

La Figure 3.1 présente les mesures obtenues au laboratoire CITI dans des bandes de fréquences 802.11g et 802.15.4. Le chemin de mesure est présenté à la Figure 3.1(b) : le transmetteur est fixe, avec des mesures réalisées autour d'un environnement ouvert de type « *open space* ».

Comme nous pouvons le voir sur la Figure 3.1(a), les valeurs mesurées en 802.11g sont proches d'un modèle ITU-R avec $w = 3$, en utilisant (3.4). De même, les valeurs mesurées en

3.2 Évaluation analytique de la consommation d'énergie par bit

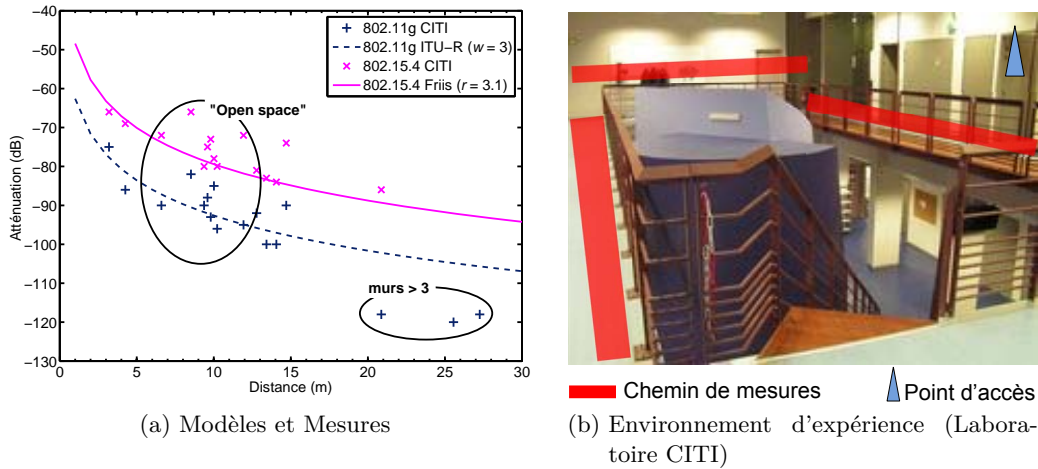


FIGURE 3.1: Modèles d'atténuation du canal en 802.11g et 802.15.4 : (a) validation des modèles choisis par la mesure et (b) photographie de l'environnement d'expérience

802.15.4 sont similaires à un modèle de Friis pour $r = 3.1$, suivant (3.7). Nous constatons de faibles variations dans l'atténuation mesurée, pour des distances entre 10 et 15 mètres. Cette particularité est due à l'architecture de notre laboratoire, avec une passerelle autour d'un espace libre de tout obstacle. Ces mesures permettent toutefois de paramétrer les modèles de canaux en fonction d'un environnement réaliste.

Suite à une validation par l'expérience, les valeurs énoncées ci-dessus seront utilisées dans nos simulations. Nous paramétrons aussi L_{Hata} suivant (3.5), avec $h_{BS} = 20$ m, $h_{\text{mobile}} = 1.5$ m, et $L_{\text{diff}} = 3$ dB afin de représenter un environnement métropolitain urbain.

3.2.5 Adaptation de la puissance d'émission

Afin de réduire leur consommation d'énergie, les terminaux peuvent adapter leur puissance de transmission, P_{out} . Cette technique nécessite de connaître le seuil de sensibilité du récepteur, noté $RX\text{Sens}$, afin d'assurer le décodage des données reçues. En effet, $RX\text{Sens}$ représente la puissance minimum nécessaire pour qu'un signal reçu puisse être décodé au niveau de la couche PHY. Ces valeurs sont typiquement liées à l'architecture du frontal, ainsi qu'aux paramètres intrinsèques du mode de communication. Elles se retrouvent dans la littérature. Plusieurs méthodes existent pour estimer les conditions de canal, comme l'utilisation de signaux pilotes ou d'un canal de retour. Nous ne discuterons pas de ces différentes techniques.

Ici, nous adaptons la puissance de transmission, P_{out} , d'un mode m_j tel que :

$$P_{\text{out}} \text{ (dBm)} = RX\text{Sens}_j - L_j \quad (L_j \text{ (dB)} < 0) \quad (3.8)$$

3 Méthodologie suivie

avec L_j l'atténuation du mode m_j (en dB), se référant aux modèles présentés ci-dessus, et $RXSens_j$ la sensibilité de réception d'un terminal dans ce même mode m_j (en dBm).

La puissance de transmission, P_{out} , est alors déterminée après avoir évalué l'atténuation entre deux terminaux. P_{out} est ensuite intégré dans (3.3), pour permettre le calcul de la consommation d'énergie radio E_{rf} . Ce processus est réalisé à chaque transmission, pour chaque mode de communication.

3.3 Évaluation analytique de la consommation d'un terminal multi-mode

3.3.1 Calcul de la consommation pour un terminal multi-mode

La consommation d'énergie d'un terminal multi-mode τ , notée $E_{term}(\tau)$ s'exprime en Joule. Elle correspond à l'énergie totale consommée par tous ses modes *actifs* dans un scénario précis. Un mode est considéré comme actif lorsque le terminal l'utilise pour transmettre ou recevoir des données. E_{term} est alors composée de l'énergie totale en transmission et en réception.

La consommation d'un mode actif dépend à la fois de sa consommation numérique et radio, comme présenté ci-dessus. Ces deux termes sont difficilement séparables. En transmission, c'est évident, car l'envoi des données utilise bien ces deux étapes (numérique et analogique). En réception, tout signal reçu avec une puissance supérieure au seuil de sensibilité sera traité par le frontal radio. Ce traitement radio entraîne un décodage a posteriori, permettant de connaître le contenu du paquet (par exemple, le destinataire). On pourrait penser que le décodage de l'en-tête seul permet de réduire la consommation d'énergie, en rejetant les trames qui ne concernent pas la destination. Cependant, le codage et les entrelacement successifs utilisés dans les communications modernes rendent cette solution difficilement applicable. Il est alors obligatoire de traiter l'intégralité du paquet reçu, et donc de considérer l'énergie numérique nécessaire à son décodage en sus de l'énergie radio.

3.3.2 Évaluation de la consommation d'un scénario

Pour un *scénario* donné, chaque terminal possède sa propre consommation d'énergie. Un scénario décrit les communications entre plusieurs terminaux, au sein d'un ou de plusieurs réseaux. Nous définissons la *consommation globale d'énergie*, E_{global} , (en Joule), comme la consommation totale des terminaux contraints en énergie dans un scénario.

L'utilisation de la consommation globale d'énergie permet de prendre en compte toutes les composantes d'un scénario donné dans l'évaluation de sa consommation d'énergie. E_{global} dépend alors des interactions propres à chaque terminal : signaux reçus, communications relayées, modes utilisés, etc.

E_{global} permet de comparer la consommation d'énergie de différents scénarios. Elle permet aussi d'évaluer l'impact de plusieurs paramètres sur la consommation. Finalement, elle mène à quantifier l'efficacité énergétique de différentes stratégies d'adaptation.

3.4 Simulations réseaux pour un réalisme accru

Cette section amène à réfléchir sur l'utilisation d'un simulateur réseau dans le cadre d'une étude réaliste de la consommation d'énergie. Elle présente l'importance de couche MAC dans la consommation d'énergie. Puis, elle introduit le simulateur WSNNet, qui est utilisé dans le cadre de cette thèse. Finalement, elle considère les avantages et les inconvénients des simulateurs réseaux dans le cadre donné.

3.4.1 Prise en compte de la couche MAC

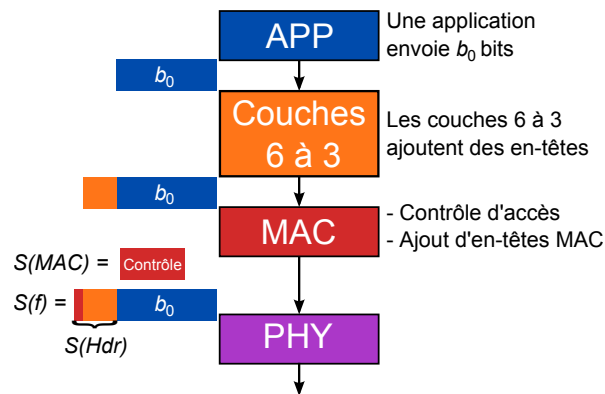


FIGURE 3.2: Transmission de données avec prise en compte de la couche MAC

Dans les communications modernes, la couche MAC s'emploie à garantir le bon déroulement d'une communication, tout en prônant l'équité dans l'accès au canal. En multi-mode, chaque mode possède donc une couche MAC associée, qui définit la politique d'accès au canal ainsi que la taille des trames.

La politique d'accès au canal peut être déterministe (par exemple en utilisant un accès divisé en intervalles de temps comme le TDMA), ou aléatoire. Dans chaque cas, la couche MAC peut se baser sur des canaux ou des paquets de contrôle pour décider quand transmettre : tout utilisateur désirant utiliser un mode doit écouter (et transmettre le cas échéant) les canaux ou paquets de contrôle, afin de garantir l'efficacité des communications dans ce mode. Ces étapes représentent un coût énergétique non négligeable lors de la transmission de données.

Afin d'évaluer la consommation d'énergie par bit d'un mode de manière réaliste, nous prenons donc en compte la consommation liée à la couche MAC. L'évaluation suivante est réalisée pour un seul mode.

Calcul d'énergie avec une couche MAC Considérons un paquet envoyé par une application, contenant b_0 bits de données, comme présente à la Figure 3.2. Quand le paquet arrive au niveau de la couche MAC, chaque couche intermédiaire a ajouté son propre en-tête. Nous notons la taille totale de tous ces en-têtes par $S(\text{Hdr})$, en y ajoutant les en-têtes de la couche MAC (qui restent spécifiques à chaque mode). Ainsi, la taille de la trame MAC est égale à $S(f) = b_0 + S(\text{Hdr})$. De plus, lorsque la couche MAC se base sur des paquets de contrôle ou des canaux dédiés pour accéder au canal, ces derniers rentrent en compte dans le calcul de la consommation. Nous définissons $S(\text{MAC})$ la taille totale de ces paquets, au sein du mode considéré.

Finalement, la consommation d'énergie par bit, E_{bit} , dépend du nombre total de bits envoyés pour un bit de donné utile, \bar{b} , définit comme :

$$\bar{b} = \alpha_f \cdot \left(\frac{S(\text{MAC}) + S(f)}{b_0} \right) \quad (3.9)$$

avec α_f le nombre de retransmissions MAC avant que f soit correctement reçue. Toutes les tailles sont en bits.

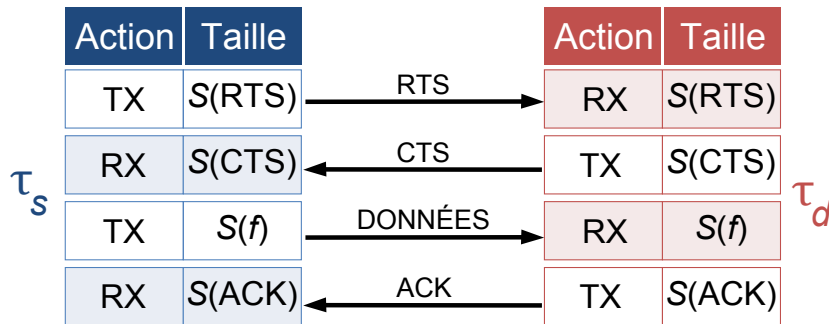


FIGURE 3.3: Processus de communication en CSMA/CA, entre une source τ_s et une destination τ_d

L'exemple du CSMA/CA Nous évaluons maintenant E_{bit} en prenant l'exemple du CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* ou *Accès Multiple à Écoute de Porteuse, avec Évitement de Collisions*) qui est la couche MAC utilisée en 802.11g. Le protocole CSMA/CA est un protocole à accès aléatoire qui se base sur les paquets de contrôle pour garantir l'équité de partage du média. Ces paquets permettent de réserver l'accès au canal sous la forme de requête/réponse, et de confirmer la bonne réception des données.

La Figure 3.3 présente l'exemple d'une communication CSMA/CA. Lorsqu'un terminal source désire transmettre des données à une destination, il commence par écouter le canal durant une période que l'on appelle T_{Listen} . Si le canal est considéré libre durant cette période, le terminal source formule alors une requête pour transmettre via un paquet RTS, (*Request*

to Send), jusqu'à recevoir l'autorisation de transmettre de la destination, via un paquet CTS, (*Clear To Send*). Sinon, le terminal attend pendant une période T_{Backoff} , et réitère ce processus jusqu'à ce que le canal soit libéré, ou que le nombre maximum de backoffs soit atteint (ici, 16 fois). Une fois les données transmises, elles sont acquittées par un paquet ACK, avant un délai T_{Timeout} (au cours duquel la source écoute le canal). La communication est alors considérée comme réussie. Si un paquet n'arrive pas à temps ou que son décodage est impossible, une retransmission MAC a lieu.

Nous montrons l'influence de ces paquets de contrôle sur E_{bit} pour l'envoi d'une trame MAC f , de taille $S(f)$, dans un mode utilisant le CSMA/CA. Soit τ_s un terminal source, dont une application transmet b_0 bits de données à une destination τ_d . Soit $S(\text{RTS})$, $S(\text{CTS})$ et $S(\text{ACK})$ respectivement la taille des paquets de contrôle RTS, CTS et ACK et $S(f) = S(\text{Hdr}) + b_0$ la taille d'une trame MAC envoyée par τ_s . Alors, \bar{b} , le ratio de bits envoyés pour un bit de données, possède des composantes en transmission (TX) et en réception (RX) telles que :

$$\begin{cases} \bar{b}^{\text{TX}} &= \frac{S(\text{RTS})+S(f)}{b_0} \\ \bar{b}^{\text{RX}} &= \frac{S(\text{CTS})+S(\text{ACK})}{b_0} \end{cases} \longrightarrow \bar{b} = \bar{b}^{\text{TX}} + \bar{b}^{\text{RX}} \quad (3.10)$$

$$(3.11)$$

En considérant qu'il n'y a pas de retransmission, la consommation d'énergie de τ_s pour transmettre un bit en utilisant CSMA/CA, notée $E_{\text{bit}}^{\text{TX}}$, est la suivante :

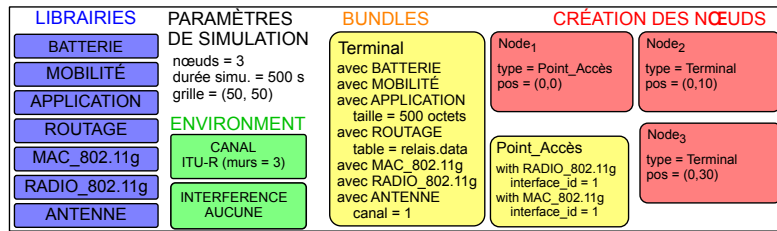
$$E_{\text{bit}}^{\text{TX}} = \bar{b}^{\text{TX}} \cdot (E_{\text{num}}^{\text{TX}} + E_{\text{rf}}^{\text{TX}}) + \bar{b}^{\text{RX}} \cdot (E_{\text{num}}^{\text{RX}} + E_{\text{rf}}^{\text{RX}}) \quad (3.12)$$

avec $E_{\text{num}}^{[\text{TX},\text{RX}]}$ et $E_{\text{rf}}^{[\text{TX},\text{RX}]}$ les consommations par bit de la partie numérique et de la partie radio, respectivement pour les parties transmission et réception de τ_s .

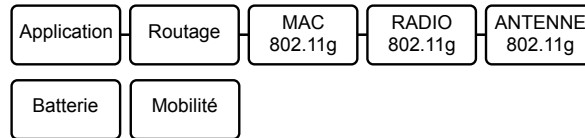
Lorsque la couche MAC est prise en compte, les équations précédentes sont évaluées en fonction de \bar{b} , pour chaque composante en transmission et en réception, numérique et radio. La méthode reste identique pour évaluer l'énergie de réception d'un bit, avec quelques modifications mineures au niveau de T_{Listen} .

3.4.2 Présentation de WSNNet

Afin de prendre en compte l'impact de la couche MAC sur la consommation d'énergie, nous allons utiliser un simulateur réseau. Nous présentons ici le simulateur réseau WSNNet qui sera modifié ultérieurement pour intégrer le multi-mode. Nous expliquons les différentes étapes nécessaires à la réalisation de simulations réseaux sous WSNNet.



(a) Structure du fichier de configuration .xml



(b) Exemple de bundle sous WSNNet

FIGURE 3.4: Exemple de configuration multi-mode sous WSNNet

Description du simulateur WSNNet est un simulateur réseau à événements discrets, développé au laboratoire CITI [205]. WSNNet offre de nombreux avantages permettant de réaliser des simulations précises. Il implémente plusieurs modèles réalistes de couches PHY, MAC et réseau. Son approche multi-couche, basée sur le modèle OSI, permet d’étudier facilement le comportement d’un modèle ou d’un protocole à un niveau donné, tout en minimisant l’impact des autres niveaux.

Dans WSNNet, une *librairie* effectue une tâche précise au cours d’une simulation (*e.g.* une librairie au niveau PHY simule une chaîne de transmission/réception). Les librairies sont chargées par le cœur du simulateur, et interagissent par le biais de fonctions primitives. Elles possèdent leurs propres paramètres, ce qui permet de modifier leur comportement. Elles s’intègrent de façon modulaire dans le simulateur, comme détaillé ci-après.

Dans WSNNet, un *nœud* représente un terminal physique. Les différentes librairies sont hiérarchisées au sein d’un *bundle*, qui représente le type d’un nœud. Chaque nœud est alors une instance d’un *bundle*, et possède aussi ses propres paramètres. Les nœuds du même type sont des instances du même bundle.

Une approche modulaire Chaque librairie agit comme une entité indépendante, ses relations avec les autres librairies étant définies au sein d’un *bundle*, à l’intérieur du *fichier de configuration* .xml. Un exemple est présenté à la figure 3.4(b). Ce fichier de configuration est au cœur de la simulation. En effet, WSNNet procède au chargement et au paramétrage des modules nécessaires, à la création des bundles puis des nœuds. La granularité de la simulation se modifie dans ce fichier de configuration.

WSNNet adopte une approche modulaire structurée, où chaque librairie communique de façon hiérarchique avec les autres librairies. Cette approche modulaire permet d’implémenter

de nouveaux modules qui s'intégreront facilement à ceux existants, un module WSNNet pouvant correspondre tant à une couche du modèle OSI, qu'à un environnement de simulation (gestion de la mobilité, de l'énergie, de la propagation). De plus, chaque librairie définit des primitives propres à WSNNet, appelées au lancement et à la fin de la simulation, ainsi qu'à la création et à la mort d'un nœud qui l'utilise. D'autres fonctions permettent à une librairie de communiquer avec les couches inférieures et supérieures.

La programmation d'une librairie WSNNet se réalise en C. Les utilisateurs ont alors la possibilité de réutiliser ou d'adapter les librairies existantes, voire d'en créer de nouvelles.

Création d'une simulation La Figure 3.4 présente un exemple de configuration pour réaliser une simulation WSNNet. Au lancement d'une simulation, WSNNet charge un *fichier de configuration* .xml qui détermine les paramètres de simulation, comme la durée de la simulation, le nombre de nœuds et la taille de la grille.

Chaque fichier de configuration possède les paramètres suivants, correspondant à l'exemple présenté à la Figure 3.4(a) :

- Les paramètres de simulation, *e.g.* trois nœuds sur une grille 50x50.
- La liste des librairies, *e.g.* *MAC_802.11g* pour le CSMA/CA.
- L'environnement de simulation, *e.g.* *Canal_ITU-R* pour un canal de propagation ITU-R.
- La définition des bundles, *e.g.* *Mobile* pour un terminal mobile, qui instancie une radio et une couche MAC 802.11g.
- La création des nœuds, *e.g.* *Node₂*, qui est un nœud mobile placé sur la grille à la position (0, 10).

L'*environnement* de simulation est mis en place avec les paramètres de propagation et le modèle d'interférence choisis. Les *librairies* nécessaires sont ensuite chargées et paramétrées, puis instanciées par un *bundle*, qui représente un type de nœud.

À la *création des nœuds*, chaque nœud est associé à un bundle ainsi qu'à une position sur la grille de la simulation. Une fois la simulation effectuée, les fichiers de journalisation sont traités. Les paramètres enregistrés ainsi que leur granularité sont définis dans le code C des librairies.

Configuration des nœuds Le *nœud* est la représentation d'un terminal de communication. Dans WSNNet, un nœud est constitué de l'assemblage de plusieurs modules indépendants. Cet assemblage, ou *bundle*, définit une relation hiérarchique entre les différentes librairies utilisées par le nœud. Ce bundle est défini au sein du fichier de configuration .xml. Bien qu'associé à un seul bundle, un nœud possède ses propres caractéristiques (naissance et mort, mobilité, etc.).

3.4.3 Discussion sur l'apport des simulations réseaux

Avantages Les simulateurs réseaux offrent plusieurs avantages non négligeables par rapport à une approche purement analytique. Tout d'abord, ils permettent d'intégrer un certain réalisme aux simulations. Ceci est important lorsqu'il s'agit de caractériser l'influence d'une couche MAC aléatoire (par exemple), qui évolue avec la densité du réseau. Bien que des modèles analytiques de la couche CSMA/CA existent, ils restent compliqués à mettre en œuvre, et nécessitent une étude plus poussée avant de pouvoir les adapter au contexte étudié.

La relative facilité de configuration des simulations réseaux permet d'affiner les paramètres de simulation sans entrer dans les détails du code (dans WSNNet, l'abstraction .xml reste lisible pour les non-initiés). La granularité des simulations permet d'évaluer des paramètres précis, ou d'en ignorer d'autres. Combiné à la répétition des simulations, il devient possible de dégager des comportements sur le long terme. De plus, l'utilisation et la réutilisation de modules déjà existants permettent d'accélérer le développement de nouveaux modèles, soit en adaptant leur code, soit en les intégrant aux simulations.

Inconvénients Cependant, quelques inconvénients sont inhérents aux simulations réseaux. Les simulations réseaux permettent un passage à l'échelle relativement aisé, avec une prise en compte des paramètres réseaux. Néanmoins, ces avantages font face à l'augmentation du temps de simulation.

Il faut également bien différencier le cœur du simulateur, programmable et peu accessible, des fichiers de configuration, faciles à appréhender par l'utilisateur novice. Lors du développement de nouveaux modules, un certain temps d'apprentissage est nécessaire pour comprendre la structure interne du simulateur. Il est aussi difficile de modifier en profondeur le code source sans remettre en question l'existant, et donc l'interopérabilité avec d'autres modules et développeurs.

De plus, certains paramètres peuvent avoir une grande influence sur les résultats finaux, bien que différents de ceux étudiés. Ceci est particulièrement vrai dans une approche modulaire, qui implique l'utilisation de techniques inter-couche (ou *cross-layer*). Certains paramètres d'une couche étant pris en compte dans d'autres couches, il faut alors faire preuve d'attention pour comprendre les apports de chaque module dans un modèle multi-couche.

3.5 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle d'énergie réaliste adapté au multi-mode. L'évaluation de l'énergie par bit est une étape nécessaire dans le choix des modes par un terminal multi-mode.

Nous avons montré que l'évaluation de la consommation d'un réseau est fortement liée à

toutes ses composantes : complexité algorithmique, architectures des terminaux, mais aussi canaux de communication. Nous avons présenté des modèles de canaux qui ont été validés par l'expérience, afin de les utiliser dans la suite de cette thèse.

Les simulations réseaux apportent un réalisme accru à la modélisation. Malgré quelques inconvénients, nous utiliserons un simulateur réseau pour intégrer la consommation d'une couche MAC réaliste. Nous avons présenté les caractéristiques de WSNets, que nous choisissons pour réaliser des simulations réseaux réalistes.

Par la suite, nous évaluons la complexité des modes étudiés, puis nous calculons la consommation d'un terminal radio logicielle pour tous ces modes, en utilisant les modèles présentés dans ce chapitre.

Étude de la complexité d'un terminal radio logicielle

4

4.1	Complexité algorithmique d'un terminal radio logicielle	57
4.1.1	Impact de l'architecture	57
4.1.2	Impact de l'implémentation	58
4.1.3	Étude de la complexité des standards cibles	59
4.1.3.1	802.11g ou Wi-Fi	59
4.1.3.2	UMTS	62
4.1.3.3	802.15.4 ou Zigbee	64
4.1.3.4	Comparaison entre les différents modes	67
4.2	Évaluation de la consommation d'énergie d'un mode	68
4.2.1	Présentation du terminal choisi	68
4.2.2	Évaluation de la consommation pour un lien de communication . . .	68

4.1 Complexité algorithmique d'un terminal radio logicielle

Dans une radio logicielle, la couche physique est représentée par des blocs logiciels programmables. Dans ce chapitre, nous expliquons comment évaluer la complexité par bit de blocs programmables pour la radio logicielle. Nous montrons que cette complexité dépend tant de l'implémentation algorithmique que de l'architecture cible. Puis, nous évaluons la complexité d'algorithmes génériques pour les modes étudiés. Finalement, nous évaluons la consommation d'un terminal radio logicielle sur un lien, en fonction de ces complexités.

4.1.1 Impact de l'architecture

La loi de Moore La loi de Moore est un postulat énoncé en 1965 par Gordon Moore, co-créateur d'Intel, qui spécifie que le nombre de transistors au sein d'un micro-processeur double tous les deux ans [206]. Cette loi a longtemps régit l'évolution des micro-processeurs, la puissance de calcul étant intimement liée au nombre des transistors. Cependant, l'essor de la mobilité tend à minimiser cette loi au profit d'architectures économes en énergie.

Application aux radios logicielles Dans une radio logicielle, la couche physique d'un mode est implémentée au travers de blocs logiciels programmables, et les traitements numériques sont réalisés par son ou ses processeurs. Ces processeurs peuvent se présenter sous diverses formes, comme celle d'un processeur générique (GPP, *General Purpose Processor*), d'un FPGA (*Field Gate Programmable Array*), d'un DSP (*Digital Signal Processor*), d'un système sur puce (SoC, *System on Chip*) ou de circuits dédiés (ASIC). Chaque type de processeur possède ses propres caractéristiques de performance [207] : par exemple, un FPGA proposera un haut degré de parallélisme, tandis qu'un DSP sera très performant pour les calculs séquentiels.

Définition d'une opération La puissance de calcul d'un processeur dépend du nombre d'opérations qu'il réalise en une seconde. Dans notre cas, une opération correspond à l'utilisation d'un circuit additionneur et multiplicateur (MAC, *Multiply and ACcumulate*¹), ou à un accès mémoire. Lors de l'exécution d'un algorithme, le circuit MAC est à la base d'opérations plus complexes, tandis que les accès mémoires sont nécessaires au bon déroulement de cet algorithme. Ainsi, le temps d'exécution des algorithmes dépend de l'architecture du processeur, d'une part, et de leur implémentation d'autre part.

4.1.2 Impact de l'implémentation

Complexité algorithmique L'utilisation de blocs logiciels pour la couche physique amène à considérer la complexité des algorithmes utilisés dans lesdits blocs. La complexité d'un algorithme dépend directement du nombre d'opérations nécessaires à son bon déroulement. Elle est avant tout liée aux choix du développeur (par exemple, dans l'utilisation de fonctions récursives ou itératives).

Cependant, l'augmentation des performances de calcul a eu un impact encore plus important que la loi de Moore sur l'évolution de l'informatique. D'après un rapport de l'administration américaine, la vitesse de certains algorithmes s'est amélioré de plusieurs ordres de grandeurs au cours des 30 dernières années. Certains traitements peuvent être jusqu'à 30 000 fois plus rapide en tenant compte des gains dus à l'architecture [208]. De plus, il existe une relation intime entre l'implémentation d'un algorithme et son architecture cible, ce qui donne lieu à des algorithmes dédiés à un processeur (sur le principe de la compilation).

Complexité par bit (bitop) Nous définissons le *bitop* comme le nombre d'opérations nécessaires à l'exécution d'un algorithme pour un seul bit de données. Pour connaître le bitop d'une couche physique, la première étape consiste à évaluer le nombre d'opérations nécessaires à l'exécution de chacun des blocs la composant. Sachant que les paramètres d'entrée d'un bloc

1. À ne pas confondre avec la couche MAC

4.1 Complexité algorithmique d'un terminal radio logicielle

sont souvent différents du bit de données, le bitop prend en compte toutes les étapes de transformation (*e.g.* codage, mapping). Finalement, le bitop d'une couche physique, en transmission ou en réception, est la somme des bitops de tous les blocs de cette couche physique.

Relation entre le bitop et le nombre de cycles Le bitop représente la complexité d'un bloc algorithmique. Nous avons vu qu'une radio logicielle implémente ces blocs sur un processeur donné. Il existe alors une relation entre l'architecture employée et le temps d'exécution de l'algorithme. Cette relation dépend du nombre d'opérations par cycles réalisées par le processeur. Ce paramètre est fortement lié à l'architecture du processeur, et se retrouve dans les spécifications du processeur.

4.1.3 Étude de la complexité des standards cibles

Dans cette section, nous présentons les couches physiques de l'UMTS, du 802.11g et du 802.15.4. Puis, nous évaluons le bitop des modes étudiés en fonction des travaux de Neel et al. [209]. Pour des raisons de facilité de lecture, le bitop est arrondi à l'entier supérieur.

4.1.3.1 802.11g ou Wi-Fi

Le 802.11g est un standard de l'IEEE, dédié aux réseaux locaux sans-fil [1] avec de débits allant de 1 Mbps à 54 Mbps. Les communications 802.11g s'effectuent sur plusieurs porteuses orthogonale (en OFDM), avec une modulation adaptée au débit désiré. La Figure 4.1 présente les différentes étapes en transmission (TX) et réception (RX) du 802.11g, avec une mise en évidence des étapes majeures de la bande de base.

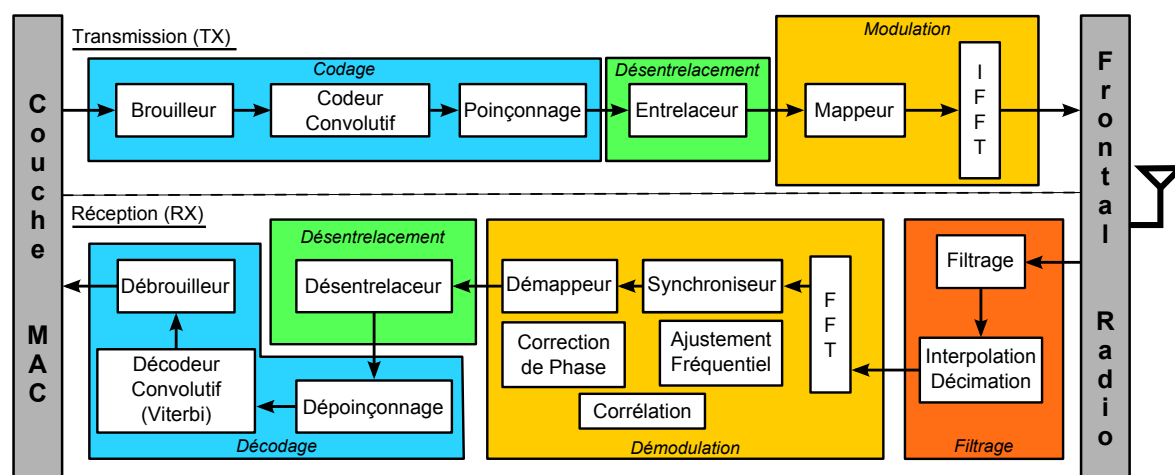


FIGURE 4.1: Bande de Base du 802.11g

En 802.11g, la transmission s'effectue grâce à plusieurs sous-porteuses orthogonales (OFDM) et aux algorithmes suivants :

4 Étude de la complexité d'un terminal radio logicielle

- Le **brouilleur** redistribue « aléatoirement » les bits de données,
- le **codeur convolutif** permet de corriger les erreurs dues à la transmission,
- le **poinçonnage**, si nécessaire, supprime certains bits redondants pour atteindre le flux de bits prédéfini,
- L'**entrelaceur** renforce les signaux contre les interférences,
- le **mapping** permet de choisir une modulation de signal correspondant au débit voulu,
- et la **Transformée de Fourier Inverse Rapide** (*Inverse Fast Fourier Transmission (IFFT)*) distribue le signal entre les différentes sous-porteuses avant transmission.

En réception, les algorithmes suivants traitent 20 MegaÉchantillons par seconde pour retrouver le signal original :

- Le processus de **conversion analogique-vers-numérique** et le **sur-échantillonnage** produisent un signal numérique sur lequel travailler,
- le **filtrage** ne conserve que les parties utiles du signal,
- l'**interpolation et décimation** permettent de retrouver la fréquence d'échantillonnage originale,
- les étapes de synchronisation, comme l'**ajustement fréquentiel**, la **correction de phase** et la **corrélacion** corrigent les conditions de canal,
- la **Transformée de Fourier Rapide** (*Fast Fourier Transform (FFT)*) recrée les données en provenance de toutes les sous-porteuses,
- le **démapping**, le **décodage de Viterbi** et le **désentrelacement** inversent les étapes de transmission pour retrouver les données d'origine.

TABLE 4.1: Caractéristiques de la couche physique 802.11g [1]

	Modulation	Taux de codage	Bits codés par sous-porteuse	Bits codés par symbole OFDM	Bits de données par symbole OFDM
6 Mbps	BPSK	1/2	1	48	24
9 Mbps	BPSK	3/4	1	48	36
12 Mbps	QPSK	1/2	2	96	48
18 Mbps	QPSK	3/4	2	96	72
24 Mbps	16-QAM	1/2	4	192	96
36 Mbps	16-QAM	3/4	4	192	144
48 Mbps	64-QAM	2/3	6	288	192
54 Mbps	64-QAM	3/4	6	288	216

Le Tableau 4.1 résume les caractéristiques de la couche physique des différents modes 802.11g transmis en OFDM. Dans cette partie, nous évaluons le bitop pour plusieurs modes du 802.11g. Par la suite, nous nous intéresserons en particulier au mode à 6 Mbps, avec

4.1 Complexité algorithmique d'un terminal radio logicielle

TABLE 4.2: Complexité algorithmique pour des modes 802.11g, en opérations par bit (bitop)

Transmission (TX)	6 Mbps	24 Mbps	36 Mbps	48 Mbps	54 Mbps
Brouillage	18	18	18	18	18
Codage	74	67	67	66	66
Poinçonnage	0	0	26	18	26
Entrelacement	11	11	7	8	7
Mapping	10	4	3	3	3
IFFT	195	49	33	25	22
Total TX	308	149	154	138	142

Réception (RX)	6 Mbps	24 Mbps	36 Mbps	48 Mbps	54 Mbps
Filtrage FIR	680	170	114	85	76
Interpolation & décimation	2 467	1 064	709	532	275
Ajustement fréquentiel	18	18	18	18	18
Correction de phase	2	2	2	2	2
Corrélation	14	14	14	14	14
FFT	195	49	33	25	22
Démapping	10	4	3	3	3
Désentrelacement	11	11	11	11	11
Dépoinçonnage	0	0	26	18	26
Décodage de Viterbi	155	185	185	188	188
Débrouillage	18	18	18	18	18
Total RX	3 570	1 535	1 133	914	653

modulation binaire BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) et codage convolutif de $R_c = \frac{1}{2}$, ainsi qu'au mode à 54 Mbps, avec modulation en quadrature amplitude-phase 64-QAM, et un codage convolutif de $R_c = \frac{2}{3}$.

Le Tableau 4.2 présente le bitop du 802.11g à 6 Mbps, 24 Mbps, 36 Mbps, 48 Mbps et 54 Mbps, en transmission (TX) et en réception (RX). Pour chacun de ces modes, les algorithmes présentant des complexités importantes en transmission sont l'IFFT et le codeur convolutif. En réception, les opérations de correction du signal (filtrage, interpolation et décimation), la FFT ainsi que le décodage de Viterbi constituent la majorité de la complexité. Les étapes de synchronisation se réalisent sur le préambule : la complexité est donc la même pour tous les modes.

Nous remarquons que le bitop du 802.11g à 6 Mbps est le plus élevé de tous les modes. En effet, le nombre d'opérations nécessaire par bloc reste identique, alors que le nombre de bits de données est plus faible à 6 Mbps, à cause du codage et de la modulation choisie. Ainsi,

4 Étude de la complexité d'un terminal radio logicielle

nous constatons que les modes les plus rapides n'entraînent pas une plus grande complexité par bit.

4.1.3.2 UMTS

L'UMTS est un standard du consortium 3GPP, dédié aux communications mobiles cellulaires [2]. En UMTS, chaque utilisateur dispose d'un code pour communiquer avec une station de base. De plus, le standard partage plusieurs algorithmes avec le 802.11g, dont seuls les paramètres changent. La Figure 4.2 présente les différentes étapes en transmission (TX) et réception (RX) de l'UMTS, en séparant les étapes majeures de la bande de base.

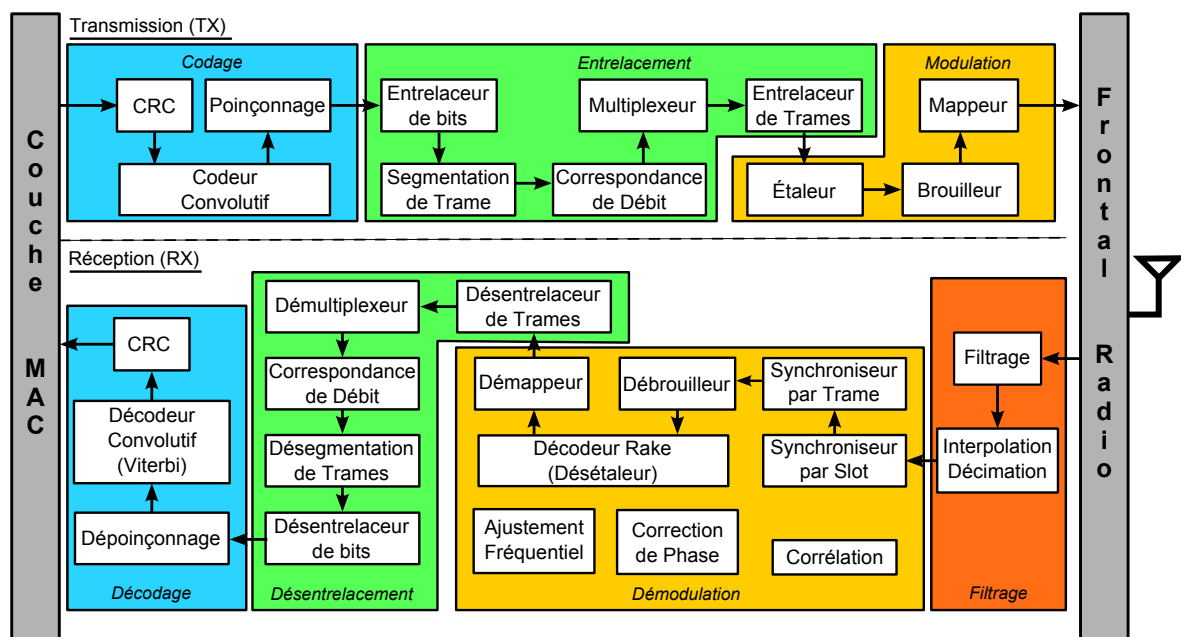


FIGURE 4.2: Bande de Base de l'UMTS

La couche physique de l'UMTS implémente les algorithmes suivants en transmission :

- Une **somme de contrôle CRC** est ajoutée pour vérifier l'intégrité des données,
- un **codeur convolutif** permet de corriger les erreurs dues à la transmission,
- le **poinçonnage**, si nécessaire, supprime des bits redondants pour atteindre un flux de bits prédéfini,
- un **premier entrelacement** agit au niveau bit et renforce les signaux contre les interférences,
- une **segmentation de trames** assigne les plages de transmission,
- la **correspondance de débit** ajoute ou enlève des bits pour atteindre le débit radio conforme au standard,
- le **multiplexage** regroupe les données et les trames de contrôle,

4.1 Complexité algorithmique d'un terminal radio logicielle

- un **second entrelacement** permet de répartir les trames radio sur les plages de transmissions,
- un **étalement**, utilisant un code approprié, permet d'atteindre les 3,84 MegaChips par seconde requis en émission,
- le **brouilleur**, utilisé avec le code de la station de base, chiffre le signal,
- le **mapping** permet de moduler le signal en QPSK.

En réception, l'UMTS reçoit les données radio à un débit de 3,84 MegaChips par seconde. Les opérations suivantes sont réalisées pour décoder les données :

- Le processus de **conversion analogique-vers-numérique** et le **sur-échantillonnage** produisent un signal sur lequel travailler,
- le **filtrage** ne conserve que les parties utiles du signal,
- l'**interpolation et décimation** permettent de retrouver la fréquence d'échantillonnage originale,
- la **synchronisation slot** et par **trame** permettent de travailler sur des trames, après correction des conditions de canal,
- un **débrouilleur** déchiffre le signal,
- le **décodage Rake** permet de retrouver le débit bit original en se basant sur les composantes multi-trajet du signal,
- le **démapping, décodage de Viterbi, premier et second désentrelacement** inversent les étapes de transmission pour retrouver le signal original.

Le désétalement est réalisé au niveau du décodeur Rake.

TABLE 4.3: Caractéristiques de la couche physique UMTS dans le sens montant [2]

	32 kbps	64 kbps	384 kbps
Intervalle de Temps de Transmission TTI (ms)	20	20	10
Durée d'une trame (ms)	10	10	10
Nombre de bits de données par trame	640	1 280	3 840
Taille du contrôle DCCH (bits)	180	180	90
Taux de codage	1/2	1/2	1/3
Réutilisation de bits (correspondance de débit)	17%	19%	-18%
Nombre de bits par trame radio (durée = 10 ms)	1 200	2 400	9 600
Facteur d'étalement	32	16	4
Modulation	QPSK	QPSK	QPSK
Débit radio (Mchips par seconde)	3,84	3,84	3,84

Le Tableau 4.3 présente les différentes caractéristiques de la couche physique UMTS, pour une transmission dans le sens montant (c'est-à-dire un envoi de données vers la station de base). Le débit de communication dépend du service utilisé. Les données sont transmises sous

4 Étude de la complexité d'un terminal radio logicielle

la forme d'une ou plusieurs trames pendant l'Intervalle de Temps de Transmission (ou TTI). Une fois les données codées, elles sont multiplexées avec un signal de contrôle (ou DCCH), puis certains bits sont dupliqués ou poinçonnés en vue d'atteindre une taille de trame radio définie. Les informations sont ensuite étalées, puis modulées pour être envoyées à un débit de 3,84 Mégachips par seconde. À noter qu'en UMTS, le facteur d'étalement montant est deux fois moins grand que le facteur descendant. Dans nos calculs, nous conservons la même valeur dans les deux sens : le petit surplus de complexité engendré n'a que peu d'influence sur notre estimation.

Le Tableau 4.4 présente le bitop pour des modes UMTS à 32 kbps, 64 kbps et 384 kbps. En raison de la nature de l'UMTS, ce nombre d'opérations est tout d'abord calculé pour une trame puis ramené à un bit de données, arrondi à l'entier supérieur. De plus, nous considérons le surcoût dû au *canal de contrôle dédié* (DCCH, *Dedicated Control Channel*), qui contient les paramètres de communications et qui est multiplexé avec les données lors de leur envoi, contrairement au 802.11g et au 802.15.4 qui utilisent les en-têtes des trames MAC.

En transmission, l'encodeur convolutif, l'entrelacement, l'étalement et le brouillage sont les fonctions les plus coûteuses. Une fois l'étalement réalisé, nous constatons que le bitop des différents blocs est inversement proportionnel au facteur d'étalement utilisé. De plus, les opérations sur le canal de contrôle (DCCH), cruciales pour bien décoder le signal, jouent un rôle important dans la complexité en transmission.

En réception, l'analyse des résultats montre un bitop plus important qu'en transmission. Il est sept fois plus élevé à 384 kbps, et plus de 50 fois plus élevé à 32 kbps. Ce comportement est dû aux algorithmes de correction du signal, qui permettent de retrouver un signal de bonne qualité, afin de le décoder dans un contexte de mobilité. En effet, la complexité de certains blocs vient du grand nombre d'accès mémoire, nécessaires à des blocs comme le multiplexage, le débrouillage et le décodage de Viterbi. De plus, la complexité du décodeur Rake, utilisé pour le désétalement, est liée au facteur d'étalement utilisé. De la même manière que précédemment, les modes lents ont un bitop plus important que les modes rapides. Ce comportement est d'autant plus remarquable en UMTS, à cause de l'étalement qui réduit le nombre de bits de données dans les débits lents.

4.1.3.3 802.15.4 ou Zigbee

Le 802.15.4 est un standard IEEE pour les réseaux personnels, dédié aux communications bas débit [3]. Il est censé garantir une consommation réduite, avec des terminaux pouvant fonctionner plusieurs mois, alimentés par une simple pile. Nous choisissons d'évaluer la complexité du 802.15.4 pour un mode à 20 kbps, qui implémente un codage différentiel (sur la base d'une opération XOR). La Figure 4.3 présente les différentes étapes en transmission (TX) et réception (RX) du 802.15.4, en représentant les étapes majeures de la bande de base.

4.1 Complexité algorithmique d'un terminal radio logicielle

TABLE 4.4: Complexité algorithmique pour des modes UMTS, en opérations par bit (bitop)

Transmission (TX)	32 kbps	64 kbps	384 kbps
Somme de contrôle CRC	6	6	6
Codage convolutif	84	84	83
Poinçonnage	0	0	18
Premier entrelacement	9	9	0
Segmentation de trame	9	9	7
Correspondance de débit	16	16	7
Multiplexage	383	383	253
Second entrelacement	120	120	80
Étalement orthogonal	120	60	20
Brouillage	480	240	80
Mapping	360	180	60
DCCH	153	153	131
Total TX	1 740	1 260	745

Réception (RX)	32 kbps	64 kbps	384 kbps
Filtrage FIR	24 480	12 240	2 040
Interpolation & décimation	22 200	11 100	1 850
Synchronisation slot	1 805	903	301
Synchronisation de trame	215	108	36
Débrouillage	1 928	964	322
Décodage Rake et Désétalement	480	240	80
Démapping	360	180	60
Second désentrelacement	120	120	80
Demultiplexage	383	383	253
Correspondance de débit	16	16	7
Désegmentation de trame	9	9	7
Premier désentrelacement	9	9	0
Dépoinçonnage	0	0	18
Décodage de Viterbi	244	246	248
Somme de contrôle CRC	6	6	6
Total RX	52 255	26 524	5 308

En 802.15.4, la transmission s'effectue grâce à un étalement de spectre et aux opérations suivantes :

- Le **codeur différentiel** réalise une opération XOR entre le bit actuel et le précédent,
- l'**étalement** utilise un code approprié pour atteindre le débit correspondant,
- et le **mapping** permet de choisir une modulation de signal correspondant au débit voulu.

4 Étude de la complexité d'un terminal radio logicielle

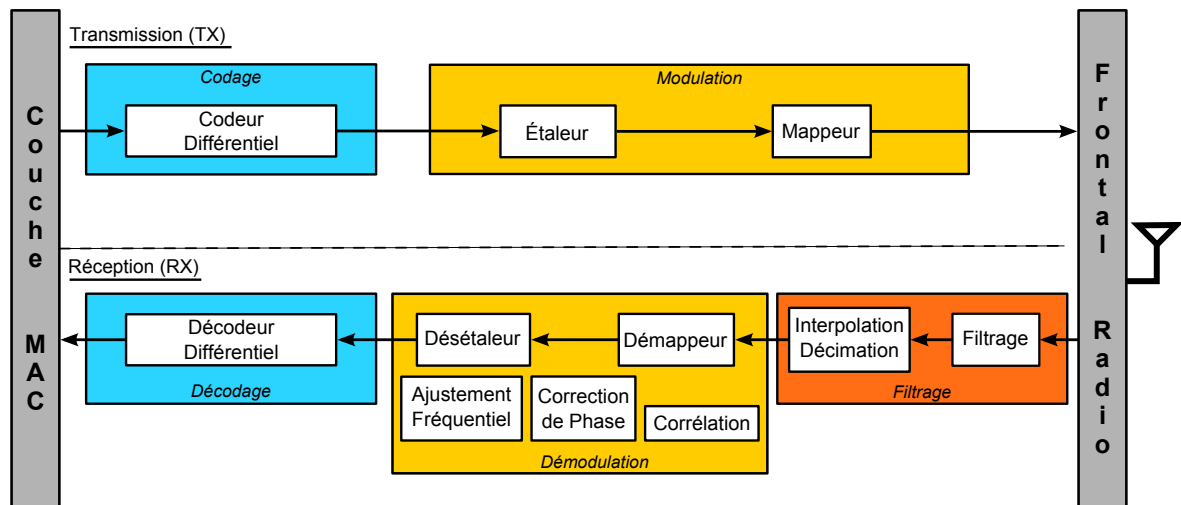


FIGURE 4.3: Bande de Base du 802.15.4

En réception, les algorithmes suivants permettent de retrouver le signal original :

- Le **filtrage** ne conserve que les parties utiles du signal,
- l'**interpolation et décimation** permettent de retrouver la fréquence d'échantillonnage originale,
- les étapes de synchronisation, comme l'**ajustement fréquentiel**, la **correction de phrase** et la **corrélation** corrigent les conditions de canal,
- le **démapping**, le **désétalement** et le **décodage différentiel** inversent les étapes de transmission pour retrouver les données d'origine.

TABLE 4.5: Caractéristiques de la couche physique 802.15.4 [3]

	20 kbps	40 kbps	250 kbps [#]
Nombre de symboles (ksymboles/s)	20	40	62,5
Facteur d'étalement	15	15	32
Débit Chips (kchips/s)	300	600	2 000
Modulation	BPSK	BPSK	O-QPSK

[#]Zigbee à 250 kbps regroupe 4 bits sous la forme d'un symbole

Le Tableau 4.5 présente les caractéristiques de la couche physique du 802.15.4. En Zigbee, le débit dépend de la fréquence porteuse choisie. Pour les débits à 20 kbps et 40 kbps, les données sont étalées avec un facteur d'étalement de 15. Puis elles sont envoyées au rythme de 300 kchips par seconde suivant une modulation BPSK. À 250 kbps, quatre bits sont convertis en un symbole, qui est ensuite étalé suivant un code de longueur 32 chips. Les données sont ensuite envoyées à un débit de 2 000 kchips par seconde après une modulation O-QPSK. Ici, nous étudions le 802.15.4 à 20 kbps, qui utilise une fréquence autorisée en Europe (868 MHz).

4.1 Complexité algorithmique d'un terminal radio logicielle

TABLE 4.6: Complexité algorithmique du 802.15.4 à 20 kbps, en opérations par bit (bitop)

Transmission (TX)	20 kbps	Réception (RX)	20 kbps
Codage différentiel	4	Filtrage FIR	1 620
Étalement	15	Interpolation & décimation	975
Mapping	75	Ajustement fréquentiel	2
		Correction de phase	2
		Corrélation	1
		Démapping	75
		Désétalement	15
		Décodage différentiel	4
Total TX	94	Total RX	2 694

Le Tableau 4.6 présente le bitop pour un mode 802.15.4 à 20 kbps. Nous constatons que la complexité en transmission est négligeable par rapport à la réception. Cette grande disparité provient du facteur d'étalement du 802.15.4, qui est de 15. Ainsi, la majorité des opérations voient leur coût augmenté de ce facteur. Ceci est valable pour le filtrage FIR et l'interpolation/décimation en réception, et pour le mapping dans les deux sens. Les autres opérations demandent une plus faible puissance de calcul (*e.g.* les opérations de synchronisation corrigent le signal sur la base du préambule, ce qui limite leur coût).

4.1.3.4 Comparaison entre les différents modes

Les modes UMTS présentent le plus fort bitop, suivis du 802.11g à 6 Mbps, du 802.15.4 à 20 kbps et des autres modes 802.11g. Cette évaluation montre qu'un mode à bas débit n'est pas la garantie d'un bitop réduit par rapport à un mode plus rapide. Ce comportement s'explique par les différences au sein des différentes couches physiques. À débit équivalent, un mode utilisant l'étalement de spectre présentera un bitop plus élevé qu'un mode basé sur l'OFDM. En effet, cet étalement augmente la taille des données à traiter par un bloc, et donc le nombre d'opérations par bit. Une conséquence de l'évaluation de la complexité pour un bit de données se remarque particulièrement au niveau du filtrage FIR, avec une complexité par bit plus importante en 802.15.4 et en UMTS qu'en 802.11g (la fréquence d'échantillonnage du filtre FIR est huit fois plus élevée que la fréquence d'un chip ou d'un symbole). La tendance de ces résultats est semblable à ce qui se trouve dans la littérature [188, 210].

De même, les modulations rapides, comme les modulations en quadrature QAM, envoient plusieurs bits par symbole pour atteindre un débit élevé. En transmission, leur bitop s'en trouve réduit de fait. En réception, il est nécessaire de réaliser des opérations complexes pour reconstituer la constellation en vue de démoduler le signal. Cependant, pour un bit de données, la complexité de ces opérations est comparable à celle des traitements réalisés dans

des modulations plus faibles. Ainsi, la complexité n'est pas automatiquement plus élevée pour les débits rapides.

4.2 Évaluation de la consommation d'énergie d'un mode

Cette section étudie la consommation d'énergie de chaque mode sur un lien de communication, pour un terminal donné. Cette évaluation utilise les valeurs de bitop présentées ci-dessus. À partir de maintenant, nous restreignons le choix des modes étudiés au 6 Mbps et 54 Mbps en 802.11g, au 384 kbps en UMTS et au 20 kbps en 802.15.4.

4.2.1 Présentation du terminal choisi

Dans cette partie, nous présentons les caractéristiques du terminal choisi pour évaluer la consommation d'énergie des modes étudiés. Nous considérons un terminal radio logicielle, utilisant un processeur générique ARM 968E-S [211]. D'après ses spécifications, l'ARM 968E-S peut implémenter les couches physiques des modes étudiés à raison d'une opération par cycle (en réalité, l'ARM 968E-S réalise 1,1 opération par cycle, mais nous supposons que les opérations de contrôle nécessitent en moyenne 0,1 opération par cycle).

L'équation (3.2) nous permet d'évaluer la consommation numérique de l'ARM 968E-S pour un bitop donné. Nous évaluons alors A_C en fonction des spécifications du processeur. Sachant que l'ARM 968E-S consomme 0,14 mW/MHz, sa consommation pour 1 Hz est $P_{Hz} = 0,14 \cdot 10^{-9}$ W. En considérant une opération par cycle ($K = 1$), et un voltage $V_{dd} = 1,2$ V, nous obtenons $A_C = \frac{P_{Hz}}{KV_{dd}^2}$ ($= 97,2$ nJ/op).

4.2.2 Évaluation de la consommation pour un lien de communication

TABLE 4.7: Paramètres à considérer dans la consommation d'énergie

	802.11g		UMTS	802.15.4
R	6 Mbps	54 Mbps	384 kbps	20 kbps
E_{cpu} (nJ)	0,14	Identique dans tous les modes, dérivé de [211] et (3.2)		
$P_{frontend}$ (mW)				
Transmission	338 [212]		338 [212]	1 [213] +
Réception	198,8 [212]		198,8 [212]	1 [213] +
P_{out} (dBm)				
Minimum	-20	-	-	-20
Maximum	10	-	-	0
$RX Sens_j$ (dBm)	-87	-71	-106	-92
L_j	ITU-R, $w = 3$ (3.4)		COST Hata (3.5)	Friis, $r = 3, 1$ (3.7)

+ [213] propose une radio 802.15.4 qui consomme 3,28 mW en transmission et 3,29 mW en réception. Comme nous séparons les consommations numériques et analogiques, nous réduisons la consommation du frontal radio à 1 mW.

4.2 Évaluation de la consommation d'énergie d'un mode

Nous évaluons maintenant la consommation par bit du terminal présenté ci-dessus, pour chacun des modes étudiés. Le Tableau 4.7 présente les paramètres et les valeurs utilisés dans l'évaluation d'énergie des modes étudiés. Les valeurs de consommation des parties numérique et radio du terminal y sont présentées. Le bitop est évalué à partir des algorithmes génériques présentés dans la section 4.1.3.

L'évaluation de la consommation du terminal est réalisée pour un lien de communication à une distance de 50 m. Les modèles de canaux utilisés sont ceux présentés à la section 3.2.4.1. Nous rappelons que le signal 802.11g est soumis à une atténuation ITU-R pour un environnement de bureau avec 3 murs, le signal 802.15.4 est atténué par une fonction de Friis avec un exposant de 3,1 et le signal UMTS suit le modèle de COST Hata. Le Tableau 4.7 présente la sensibilité de réception et la puissance de transmission du terminal dans chaque mode.

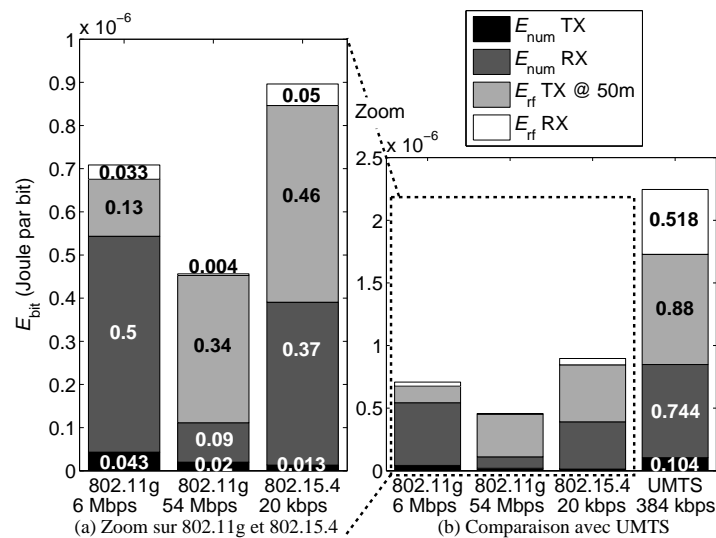


FIGURE 4.4: Évaluation détaillée de E_{bit} (en Joule par bit)

La Figure 4.4 compare la consommation par bit (en Joule par bit) des différents modes étudiés, pour le terminal présenté ci-dessus. Nous séparons la consommation numérique et analogique, ainsi que la transmission et la réception. La puissance de transmission, P_{out} , est évaluée pour une distance de communication fixée à 50 m. Ainsi, E_{rf}^{TX} dépend à la fois de la consommation du frontal radio et de cette puissance de transmission. Sur la Figure 4.4, la partie de gauche est un zoom de la partie de droite. Nous nous intéressons à la consommation d'énergie de chaque mode.

Consommation 802.11g Nous nous intéressons à la consommation du 802.11g, en comparant deux modes propres à ce standard : un mode lent à 6 Mbps et un mode rapide à 54 Mbps. Nous remarquons que la consommation numérique est cinq fois plus importante à un débit de 6 Mbps. Bien que la complexité algorithmique soit à peu près équivalente, le débit plus

4 Étude de la complexité d'un terminal radio logicielle

lent entraîne une consommation plus élevée. Cela est particulièrement flagrant en réception, à cause des algorithmes de traitement du signal (efficacité spectrale moindre à 6 Mbps), et du décodage de Viterbi.

La consommation analogique du 802.11g présente des résultats différents. Tout d'abord, l'énergie nécessaire en transmission est plus élevée pour un débit à 54 Mbps : le modèle de canal choisi et la sensibilité plus faible font que le terminal doit émettre plus fort pour conserver un débit élevé. Cependant, nous constatons que la consommation en réception du 802.11g à 54 Mbps est très petite devant celle du 802.11g à 6 Mbps, pour les mêmes raisons que tout à l'heure (liées au débit plus faible du 6 Mbps).

Consommation UMTS Nous constatons que l'UMTS à 384 kbps consomme plus que les deux autres modes (802.11g et 802.15.4). Cette consommation est plus importante à la fois d'un point de vue numérique que radio.

Premièrement, la consommation numérique est plus importante à cause de l'emploi d'une technique d'étalement de spectre. En effet, un bit de données est représenté par plusieurs chips sur le canal, ce qui augmente considérablement la consommation par bit (en relation avec le facteur d'étalement, le codage et la modulation). De plus, l'importante consommation d'énergie en réception est due à deux composantes principales : l'utilisation d'un démodulateur Rake et le décodage convolutif avec l'algorithme de Viterbi. La forte complexité de ces algorithmes, nécessaires pour une bonne réception, entraîne de facto une augmentation de la consommation numérique.

Dans un second temps, la partie radio présente elle aussi une consommation élevée. Sachant que l'architecture du frontal radio est identique pour l'UMTS et le 802.11g, nous constatons l'importance du débit dans le calcul de l'énergie. En effet, la consommation par bit est plus grande en UMTS à cause d'un débit plus faible, tandis que la puissance de transmission UMTS reste plus faible à cause d'un modèle de canal moins agressif (COST Hata).

Consommation 802.15.4 Nous nous intéressons maintenant au 802.15.4 à 20 kbps. La consommation de la partie numérique se situe entre le 802.11g à 6 Mbps et le 802.11g à 54 Mbps. Le 802.15.4 à 20 kbps utilise un codage différentiel et des codes d'étalement (avec un facteur d'étalement de 15), pour une modulation BPSK. Ces algorithmes rendent la transmission très simple, d'où leur faible coût par bit. La consommation élevée en réception est due au faible nombre de bits par Hertz (et donc aux algorithmes de traitement du signal).

La consommation radio du 802.15.4 est plus élevée qu'en 802.11g, aussi bien en transmission qu'en réception. La raison principale vient du très faible débit. Bien que le frontal radio consomme peu, ceci ne compense pas le faible débit. De plus, le canal de communication choisi (canal de Friis, avec un facteur d'atténuation de 3,1) et la sensibilité de réception à

4.2 Évaluation de la consommation d'énergie d'un mode

−92 dBm, font qu'il est nécessaire de transmettre fort à la distance considérée (à 50 m, il faut transmettre à un peu plus de 9 dBm).

Paramètres influençant la consommation En ne considérant pas P_{out} , l'énergie consommée par un terminal en réception est toujours plus élevée qu'en transmission. Ceci est dû majoritairement aux algorithmes de traitement du signal et au décodage des signaux (en particulier le décodage de Viterbi). Nous rappelons que ces résultats restent fixes en fonction de la distance et dépendent donc uniquement du processeur et de l'implémentation des algorithmes choisis. L'ajout de P_{out} introduit une variabilité des résultats en fonction de la distance.

Grâce à ces résultats, nous pouvons généraliser le comportement de la consommation numérique par rapport à la consommation analogique. Nous remarquons que les parties numériques et analogiques d'un terminal ont une consommation d'énergie équivalente au sein d'un mode. Néanmoins, nous pouvons faire deux remarques, qui recoupent ce qui a été présenté ci-dessus. Tout d'abord, la consommation numérique est toujours plus importante en réception, à cause des algorithmes de décodage et de traitement du signal. De plus, la consommation numérique est non négligeable vis-à-vis de la consommation radio, malgré une distance choisie importante qui augmente la contribution de P_{out} (ici 50 m).

Ces résultats sont à mettre en relation avec [214], qui utilise un modèle d'énergie similaire au notre. L'article montre que pour un taux d'erreur cible, il existe un compromis entre le codage utilisé et la consommation des terminaux. En effet, un codage élevé augmente la consommation numérique du récepteur en contrepartie d'une puissance de transmission réduite au niveau de l'émetteur.

Réduction d'énergie grâce au multi-mode

5

5.1	Présentation des scénarios	73
5.1.1	Définition des termes employés	74
5.1.2	Calcul de l'énergie globale du réseau pour les scénarios choisis	75
5.2	Simulations Matlab	76
5.2.1	Présentation des résultats	76
5.2.1.1	Wi-Fi vers UMTS	76
5.2.1.2	La « Zone de Non-Relais »	79
5.2.1.3	Zigbee vers Wi-Fi	80
5.2.2	Intérêt d'une prise en compte de la couche MAC	82
5.3	Intégration du multi-mode dans un simulateur réseau	83
5.3.1	Paramètres importants pour réaliser un simulateur multi-mode	83
5.3.1.1	Métadonnées nécessaires aux communications multi-mode	83
5.3.1.2	Couche physique multi-mode	84
5.3.1.3	Routage adapté au multi-mode	85
5.3.2	Implémentation du multi-mode dans WSNet	85
5.3.2.1	Développement d'une couche réseau multi-mode sous WSNet	86
5.3.2.2	Création d'un terminal multi-mode sous WSNet	86
5.3.2.3	Paramètres modifiables sous WSNet	88
5.4	Simulations réseaux	89
5.4.1	Influence de différents paramètres	90
5.4.1.1	Taille des paquets	91
5.4.1.2	Impact des voisins	93
5.4.1.3	Différentes stratégies de réduction de la consommation	94
5.4.2	Contrôle de puissance	95
5.4.3	Suppression de l'écoute passive	96
5.5	Synthèse	97

5.1 Présentation des scénarios

Dans cette section, nous présentons les différents scénarios utilisés dans l'évaluation de l'énergie d'un relais multi-mode. Nous définissons les types de terminaux qui composent chaque scénario. Puis, nous évaluons leur consommation d'énergie au travers de simulations, suivant le modèle présenté à la section 3.2.1 .

5.1.1 Définition des termes employés

Cette partie présente les différents terminaux et définit les scénarios utilisés dans l'évaluation de l'énergie.

Types de terminaux Au sein de chaque scénario, nous considérons trois types de terminaux bien distincts :

- Le Point d'Accès (AP) : c'est une passerelle connectée à Internet, sans contrainte énergétique.
- Les Utilisateurs Primaires (PU) : ils possèdent un terminal connecté directement à un point d'accès, et peuvent relayer des communications.
- Les Utilisateurs Secondaires (SU) : ils possèdent un terminal qui est *soit* relayé par un utilisateur primaire, *soit* directement connecté au point d'accès.

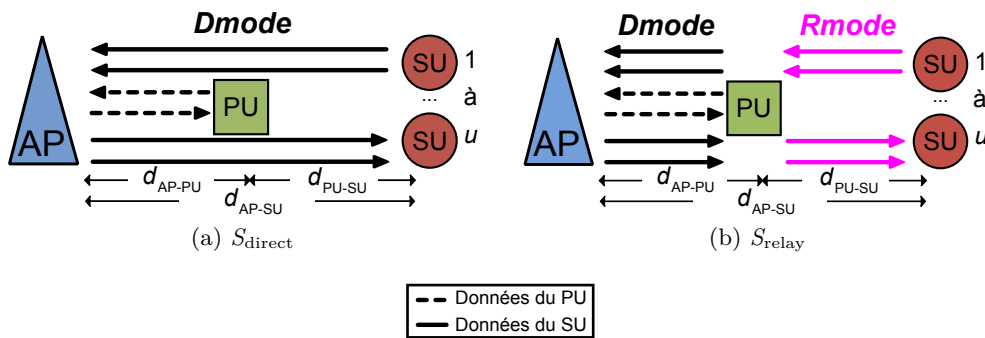


FIGURE 5.1: Représentation schématique des scénarios étudiés

Présentation des scénarios Un *scénario* définit les communications entre les terminaux au sein d'un réseau. Nous utilisons des scénarios volontairement simples, afin de déterminer plus facilement les propriétés qui ont un impact sur la consommation d'énergie.

Les scénarios utilisés dans cette thèse sont présentés à la Figure 5.1. Chaque scénario se compose d'un AP unique, d'un PU, et de u SUs. L'AP communique avec un PU au travers d'un mode de « Connexion Directe », ou *Dmode*. Les u différents SUs communiquent avec le PU suivant le mode de « Connexion Relayée » (*Rmode*), ou en connexion directe (*Dmode*). Dans tous les cas, les communications se font en point-à-point entre une source et une destination. La distance entre l'AP et le PU est notée d_{AP-PU} , entre l'AP et un SU d_{AP-SU} , et entre le PU et un SU d_{PU-SU} .

Nous évaluons la consommation d'énergie des deux scénarios suivants :

- S_{direct} : le PU et les SUs communiquent directement avec l'AP via *Dmode*, comme présenté à la Figure 5.1(a).

- S_{relay} : Le PU agit comme un relais : il reçoit les données des u SUs via $Rmode$, tout en communiquant avec l'AP sur $Dmode$. Le PU relaye ensuite le signal reçu d'un SU vers l'AP, au travers d'une connexion dédiée $Dmode$, comme présenté à la Figure 5.1(b).

La comparaison de la consommation de ces deux scénarios nous permet d'évaluer les gains énergétiques d'un relais multi-mode par rapport aux connexions directes.

5.1.2 Calcul de l'énergie globale du réseau pour les scénarios choisis

Nous rappelons que la consommation globale d'énergie, E_{global} (en Joule), est la somme de la consommation par bit de tous les terminaux contraints en énergie. Ainsi, pour un scénario donné, nous avons :

$$E_{\text{global}} = \sum_{i=0}^{|\tau|} E_{\text{term}}(\tau_i) \quad (5.1)$$

avec $E_{\text{term}}(\tau_i)$ la consommation d'énergie du terminal τ_i , et $|\tau|$ le nombre de terminaux contraints en énergie (qu'ils soient PUs ou SUs).

Ici, nous représenterons PU par τ_0 , et les différents utilisateurs secondaires sont notés τ_i , avec $1 \leq i \leq u$. Nous avons donc $|\tau| = u + 1$.

Consommation d'énergie pour un bit lors d'un scénario de relais Sachant que E_{bit} représente la consommation d'énergie pour un bit de données, il est nécessaire de prendre en compte le coût engendré par le relais. En effet, la consommation pour un bit de données dépend à la fois de la taille des trames utilisées, du nombre de sauts jusqu'à l'AP, des retransmissions et de la fragmentation des trames.

Lorsqu'un SU envoie b_0 bits de données dans le scénario du relais, ces différentes étapes ont une influence sur la consommation d'énergie. Par conséquent, nous évaluons le ratio du nombre de bits utilisés pour l'envoi effectif d'un bit de données, \bar{b} , comme tel :

$$\bar{b} = \frac{1}{b_0} \cdot \left[\alpha_{Rmode} S(Rmode) + (\alpha_{Dmode} + \beta_{Dmode}) S(Dmode) \right] \quad (5.2)$$

avec $S(Rmode)$ et $S(Dmode)$ le nombre total de bits envoyés pour transmettre une trame, respectivement dans $Rmode$ et dans $Dmode$, α_m le nombre de retransmissions et β_m le nombre de trames fragmentées sur le lien de communication du mode m au cours de la transmission des données. Sachant que la taille maximum d'une trame varie suivant les modes, il est probable que les données reçues sur $Rmode$ soient fragmentées en plusieurs trames par le relais afin de les retransmettre sur $Dmode$. De ce fait, une retransmission sur $Dmode$ ne concerne qu'une seule de ces trames, ce qui justifie le terme $(\alpha_{Dmode} + \beta_{Dmode})$ dans la formule (5.2).

Ainsi, dans le cas d'un relais, la consommation d'énergie d'un PU dépend du nombre de

5 Réduction d'énergie grâce au multi-mode

SUs relayés. Soit $E_{\text{bit}}^m(\tau_A, \tau_B)$ la consommation d'énergie par bit lors d'une communication dans le mode m entre deux terminaux τ_A et τ_B en intégrant \bar{b} , alors $E_{\text{term}}(\text{PU})$ s'exprime comme suit dans S_{relay} :

$$E_{\text{term}}(\text{PU}) = (u + 1) E_{\text{bit}}^{Rmode}(\text{PU}, \text{AP}) + \sum_{i=1}^u E_{\text{bit}}^{Dmode}(\text{PU}, \text{SU}_i) \quad (5.3)$$

Il est alors aisé de calculer E_{global} pour les scénarios S_{direct} et S_{relay} . Comme précédemment, E_{global} s'exprime comme :

$$E_{\text{global}} = E_{\text{term}}(\text{PU}) + \sum_{i=1}^u E_{\text{term}}(\text{SU}_i) \quad (5.4)$$

5.2 Simulations Matlab

Dans cette section, nous évaluons la consommation d'énergie d'un relais multi-mode à travers des simulations Matlab. Les simulations considèrent l'envoi de données sans interférences et sans prise en compte de la couche MAC (ni paquets de contrôle ni écoutes passives). Elles implémentent les formules (5.3) et (5.4) avec les valeurs mesurées pour chaque protocole à la section 4.1.3.

Le PU et les SUs sont des terminaux radio logicielle multi-mode à énergie limitée. Leurs caractéristiques et consommation sont identiques à ce qui a été présenté précédemment au Tableau 4.7 de la section 4.2.2. Dans ces simulations, l'AP, le PU et les SUs sont alignés et se déplacent en ligne droite le cas échéant. Leur puissance de transmission varie en fonction des conditions de canal, comme expliqué à la section 3.2.5.

5.2.1 Présentation des résultats

Dans cette partie, nous évaluons la consommation globale d'énergie des scénarios S_{direct} et S_{relay} grâce aux simulations Matlab. Nous présentons les résultats d'un relais 802.11g-vers-UMTS, desquels nous tirons des règles pour réduire la consommation d'un réseau grâce à un relais multi-mode. Puis, nous évaluons la consommation d'un relais 802.15.4-vers-802.11g, et nous expliquons l'intérêt d'une prise en compte de la couche MAC dans l'évaluation d'énergie.

5.2.1.1 Wi-Fi vers UMTS

Nous commençons par étudier un relais multi-mode Wi-Fi vers UMTS. Dans ce cas, nous choisissons un mode UMTS à 384 kbps pour les connexions directes ($Dmode$), et un mode 802.11g à 54 Mbps pour les connexions relayées ($Rmode$). Ici, l'AP représente une station de base UMTS qui émet vers tous les utilisateurs du réseau en point-à-point.

Dans ces simulations, nous considérons que tous les SUs sont situés à une distance équivalente du PU. Par conséquent, nous simplifions l'évaluation de $E_{\text{term}}(\text{PU})$ de la façon suivante :

$$E_{\text{global}}(S_{\text{direct}}) \approx u E_{\text{term}}^{Dmode}(SU_i) + E_{\text{term}}^{Dmode}(PU) \quad (5.5)$$

$$E_{\text{global}}(S_{\text{relay}}) \approx u E_{\text{term}}^{Rmode}(SU_i) + (u + 1) E_{\text{term}}^{Dmode}(PU) \quad (5.6)$$

Nous évaluons la consommation des scénarios dans les cas suivants :

- Le PU se déplace de l'AP jusqu'à un unique SU, fixe.
- Le PU et un unique SU sont séparés par une distance fixe, $d_{\text{PU-SU}}$, tout en se déplaçant ensemble de l'AP jusqu'en bordure de cellule.
- Le PU se déplace de l'AP jusqu'à plusieurs SUs fixes, numérotés de 1 à u .

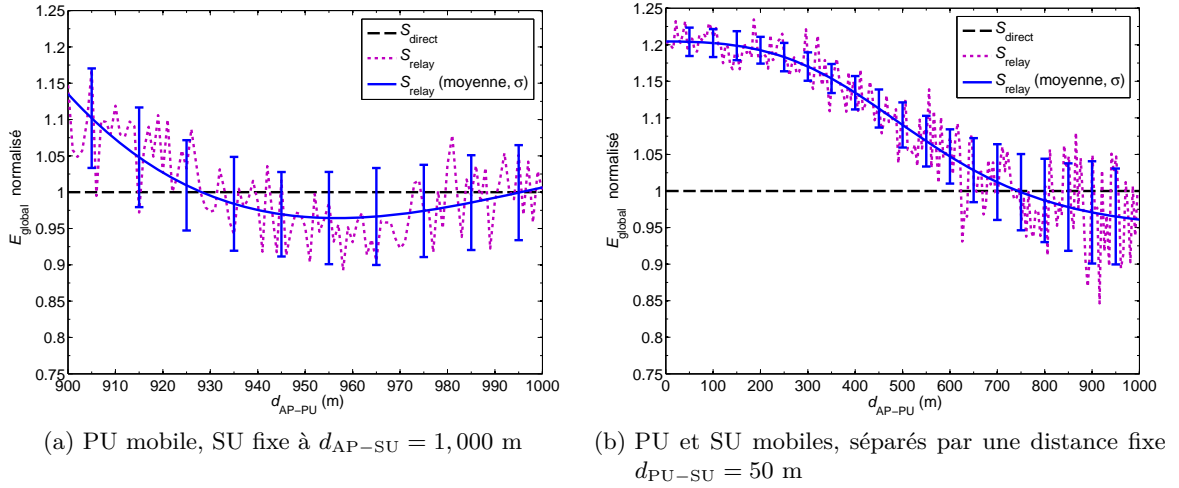


FIGURE 5.2: Comparaison de la consommation globale d'énergie pour les scénarios étudiés, normalisé par le scénario S_{direct} , en 802.11g-vers-UMTS (pour un PU et un SU)

La Figure 5.2 présente la consommation globale d'énergie des scénarios étudiés, avec un PU et un SU. Elle compare un relais multi-mode 802.11g-vers-UMTS avec des communications directes en UMTS. Nous utilisons un modèle de canal COST Hata en UMTS et un modèle de canal ITU-R en 802.11g. Chaque canal est indépendant. Les canaux UMTS souffrent d'un évanouissement de Rice, d'écart type $\sigma = 0,5$ et de paramètre $v = 1$. La puissance de transmission des utilisateurs P_{out} n'est pas limitée, ce qui permet de garantir une communication longue distance en 802.11g.

Nous réalisons cent simulations, et présentons les résultats moyens ainsi que l'écart type. Nous représentons aussi la consommation d'un relais au cours d'une seule simulation. Les résultats sont normalisés par la consommation globale observée pour les communications directes à chaque réalisation.

PU mobile, SU fixe La Figure 5.2(a) représente la consommation de S_{relay} et de S_{direct} en bordure de cellule UMTS (entre 900 m et 1 km). Sur cette figure, le SU est fixe à 1 km, et le PU se déplace en ligne droite de $d_{\text{AP-SU}} = 900$ m à SU, ce qui représente une distance raisonnable pour des communications réalistes. Ainsi, la distance entre le PU et le SU, $d_{\text{PU-SU}}$, varie en fonction de la position du PU.

Nous étudions la courbe en trait plein, qui représente la consommation globale de S_{relay} . La courbe se décompose en trois temps :

1. Lorsque le PU est loin du SU ($d_{\text{PU-SU}} \geq 70$ m), le relais multi-mode n'est pas intéressant. Ceci est dû à la grande distance sur le lien relayé, qui engendre une consommation élevée du lien Wi-Fi.
2. Lorsque le PU est à distance moyenne du SU, l'utilisation d'un relais peut aider à réduire la consommation d'énergie. L'utilisation de connexions UMTS dédiées au niveau du PU, ajoutée à la consommation du lien relayé, consomme environ 5% d'énergie en moins que les connexions directes. La distance du lien 802.11g est raisonnable.
3. Lorsque le PU et le SU sont trop proches (et loin de l'AP), il n'est plus intéressant de relayer. Ce comportement résulte de la surconsommation du lien relais, où les deux connexions UMTS établies par le PU sont à peu près équivalentes aux connexions directes (à 10 m près).

Globalement, nous constatons que les gains d'énergie du relais ne sont jamais supérieurs à 5% en moyenne. Les gains d'un relais multi-mode dans ce cas ne sont pas forcément intéressants. Cependant, l'évolution de l'écart type nous montre pourtant qu'un relais sporadique peut améliorer la consommation du réseau. Ces résultats permettent de considérer l'établissement de relais dits opportunistes pour réduire la consommation dans certains cas. Par exemple, la courbe en pointillés montre que pour une seule communication, la consommation fluctue en fonction de la distance. Ces fluctuations dépendent des canaux de communication, à la fois sur le lien relais et sur le lien UMTS. Dans les autres cas, les connexions directes doivent être utilisées en priorité.

Couple PU-SU mobile La Figure 5.2(b) présente la consommation globale pour les scénarios étudiés, lorsque le PU et le SU se déplacent à la même vitesse, séparés de 50 m. Lorsque les terminaux mobiles sont proches du point d'accès, les connexions directes sont plus intéressantes pour la consommation. Ce comportement provient du surcoût du lien relayé, à cause d'une trop grande distance du couple PU-SU par rapport à l'AP.

Nous remarquons aussi que plus les utilisateurs mobiles se déplacent loin du point d'accès, plus le relais devient intéressant (toujours avec les mêmes précautions). Lorsque les terminaux approchent de la bordure de la cellule UMTS, à partir de $d_{\text{AP-PU}} > 750$ m, les gains du relais se situent entre 5 et 7%. Cependant, cet éloignement des terminaux est lié à une dégradation

du canal UMTS, représentée par l'augmentation de l'écart type avec la distance. De plus, le canal 802.11g subit peu de variations, la distance entre le PU et le SU étant fixe. Ceci montre la prédominance du canal UMTS dans le relais.

De la même manière que précédemment, la courbe en pointillés représente la consommation d'une seule réalisation du scénario de relais. Nous observons bien les variations de la consommation augmenter au fur et à mesure que la distance augmente entre le PU et l'AP. Dans certains cas, le relais multi-mode est alors capable de palier aux mauvaises conditions de canal en UMTS pour le SU.

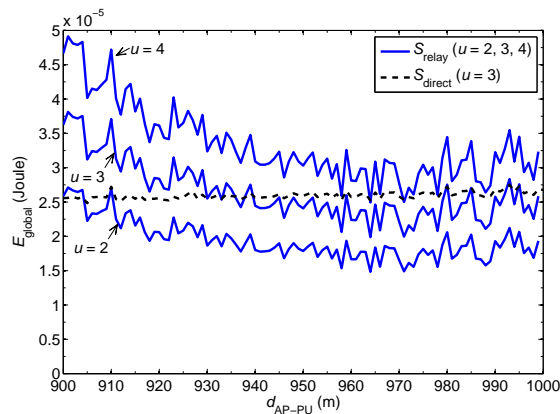


FIGURE 5.3: Comparaison de la consommation globale d'énergie pour les scénarios étudiés, en 802.11g-vers-UMTS (pour un PU et $u = 2, 3, 4$ SUs)

PU mobile, u SUs fixes Nous revenons au cas où le PU se déplace vers u SUs, fixes et proches de la bordure de cellule. La Figure 5.3 présente la consommation d'énergie globale pour S_{direct} avec $u = 3$ SUs, et pour S_{relay} avec $u = 2, 3$ et 4 SUs. Les résultats représentent une seule réalisation et ne sont pas normalisés.

Nous observons un comportement similaire au cas avec un seul SU. D'un point de vue analytique, il n'y a donc pas forcément de gains à relayer plusieurs utilisateurs. Cependant, la consommation d'un relais avec $u = 4$ SUs peut se rapprocher de la consommation de S_{direct} pour $u = 3$ SUs, dans des conditions optimales pour le relais. Ceci confirme les possibilités d'économie d'énergie grâce à l'emploi de relais opportunistes.

5.2.1.2 La « Zone de Non-Relais »

En se référant aux résultats précédents, nous définissons la « Zone de Non-Relais » comme une zone où un relais n'apporte aucun gain réel par rapport aux connexions directes. Nous estimons ce seuil inférieur à 5%. Lorsque les terminaux se trouvent dans la zone de non-relais, il leur est préférable d'utiliser les connexions directes. En dehors de cette zone, les terminaux

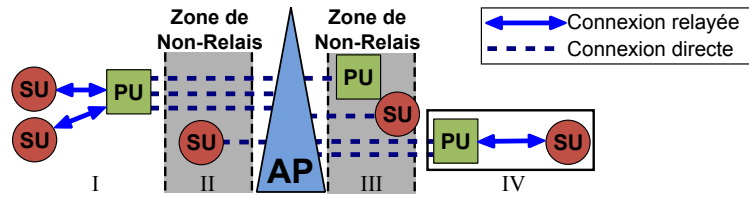


FIGURE 5.4: Règles de relais et « Zone de Non-Relais »

peuvent décider soit de devenir relais, soit d'être relayés.

La Figure 5.4 présente les règles suivantes, qui permettent de minimiser la consommation d'énergie globale. Un PU loin de l'AP devient un relais pour les SUs proches (Figure 5.4 I), avec des gains proches des 7%.

Lorsque le PU et le SU sont proches l'un de l'autre, avec un point d'accès éloigné, il est préférable de communiquer directement avec l'AP (Figure 5.4 III). Cependant, il arrive qu'un relais soit établi entre un PU et un SU, et que les terminaux se déplacent ensemble jusqu'à atteindre la zone de non-relais. Ils décident alors de garder la connexion relayée déjà établie (Figure 5.4 IV), avec des gains proches de 7%. Si la distance entre le PU et le SU augmente, il est préférable de contacter le point d'accès directement. La même chose se passe lorsque le PU et le SU sont très proches ($d_{PU-SU} < 10$ m). De plus, les terminaux proches de l'AP se connectent directement (Figure 5.4 II).

En ajoutant de la mobilité, les terminaux ayant le rôle de PU ont la possibilité de relayer plusieurs SUs au cours d'une période donnée, avant d'entrer dans la « Zone de Non-Relais ». À ce moment, le PU arrête de relayer, et les SUs ont la liberté de choisir un autre PU pour continuer le relais. Les SUs ont aussi la possibilité de prendre le rôle d'un PU pour relayer d'autres terminaux.

La majorité des autres approches qui s'intéressent à la réduction d'énergie ne considère que la puissance de transmission, et oublie de prendre en compte la consommation numérique. Nous avons montré combien cette partie numérique était importante dans l'évaluation d'énergie d'un terminal multi-mode. Nous avons expliqué comment de tels terminaux pouvaient prétendre à réduire la consommation globale d'énergie en fonction d'un scénario de relais multi-mode. En fonction de ces résultats, nous avons proposé des règles de relais censées limiter la perte d'énergie à long terme. De cette façon, réduire la consommation d'énergie d'un terminal permet de minimiser la consommation globale d'énergie du réseau.

5.2.1.3 Zigbee vers Wi-Fi

Nous évaluons maintenant la consommation d'énergie d'un relais 802.15.4-vers-802.11g. Nous choisissons du 802.11g à 6 Mbps comme mode de communication directe, *Dmode*, et

du 802.15.4 à 20 kbps comme mode de communication relayée, $Rmode$. Dans un but de comparaison, nous évaluons aussi la consommation d'un relais mono-mode avec du 802.11g à 6 Mbps comme $Rmode$. La consommation d'énergie des terminaux et leur puissance de transmission, P_{out} , ont été présentées dans le Tableau 4.7 de la section 4.2.2 ; P_{out} peut prendre des valeurs dans l'intervalle qui y est spécifié (de -20 à 0 dBm).

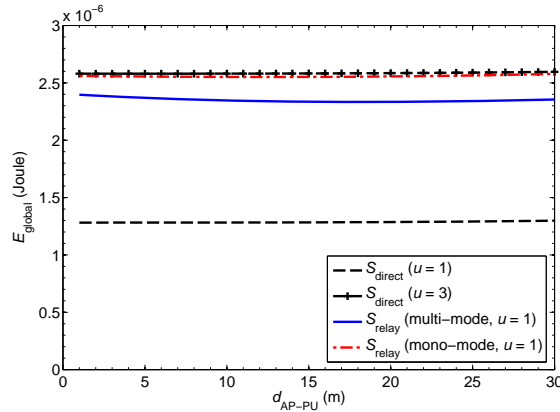


FIGURE 5.5: Comparaison de l'énergie globale du réseau pour les connexions directes et les relais multi-mode, en 802.15.4-vers-802.11g, en fonction des résultats de simulations Matlab

Nous évaluons la consommation globale d'énergie sous Matlab de la même façon que précédemment, sans erreur, sans interférence, sans retransmission, et sans couche MAC. Comme précédemment, les terminaux sont alignés, avec un PU qui se déplace en ligne droite de l'AP jusqu'à un SU situé à $d_{AP-SU} = 30$ m. Nous évaluons E_{global} pour S_{relay} en multi-mode, S_{relay} en mono-mode, avec un seul utilisateur secondaire, et S_{direct} avec un et trois utilisateurs secondaires. La Figure 5.5 présente les résultats de simulation Matlab. Les liens considérés sont bidirectionnels : la consommation d'énergie d'une connexion inclut le coût de sa transmission et de sa réception. Les valeurs de consommations peuvent sembler fixes à cause de l'échelle de la figure. Il apparaît qu'il n'y a aucun intérêt à relayer, bien qu'il soit probable qu'on ait à gagner en augmentant la précision des simulations. En effet, ce comportement est dû à l'évaluation de la consommation pour un bit uniquement, sans prendre en compte les différentes étapes liées à l'envoi de ce bit (trame, paquets de contrôle, écoutes passives). Par la suite, nous utilisons un simulateur réseau et présentons des résultats plus précis à la section 5.4.

Pour un SU La première constatation est immédiate : les gains de S_{relay} sont nuls, peu importe le $Rmode$ utilisé : les deux relais consomment environ deux fois plus qu'une connexion direct. En comparant la consommation d'un relais multi-mode avec celle du relais mono-mode, S_{relay} en multi-mode est toujours plus intéressant (avec des gains en énergie de 5% à 10%). Ceci est dû à la plus faible consommation du lien entre le PU et le SU (en 802.15.4 à 20 kbps,

5 Réduction d'énergie grâce au multi-mode

par rapport au 802.11g à 6 Mbps). Cependant, un relais n'apporte aucun avantage par rapport aux connexions directes, qu'il soit multi-mode ou mono-mode.

Nous comparons maintenant le relais multi-mode avec une communication directe multi-utilisateurs ($u = 3$ SUs). La Figure 5.5 montre le surcoût du relais, à cause des connexions dédiées : une communication directe avec $u = 3$ SUs consomme pratiquement autant qu'un relais de communication avec un seul utilisateur secondaire. Nous pouvons nous demander pourquoi la consommation des relais est aussi élevée que pour trois connexions directes. Pour un relais mono-mode, la consommation du lien relayé $Dmode$ s'ajoute à celle du lien $Rmode$, ce qui donne quatre connexions 802.11g. Ceci explique pourquoi la consommation globale d'un relais mono-mode se rapproche des connexions directes avec $u = 3$ SUs, qui représente aussi la consommation de quatre liens 802.11g (un lien pour le PU et un lien par SU).

Pour plusieurs SUs La Figure 5.5 permet de montrer les limitations des simulations Matlab, tout en introduisant les besoins d'une approche plus réalistes. Ces résultats analytiques ne considèrent que la communication d'un lien actif pour chaque terminal, lors de la transmission d'un bit de données. Ils ne se limitent qu'à la transmission d'un bit pour chacun des terminaux du scénario. La couche MAC n'est pas prise en compte : il n'y pas de paquets de contrôle, qui peuvent être nécessaires à une bonne transmission en 802.11g. De plus, les phénomènes tels que l'écoute du canal et la réception passive des données ne sont pas pris en compte. Nous allons maintenant discuter du besoin d'un réalisme accru, en commençant par la prise en compte de la couche MAC dans nos simulations.

5.2.2 Intérêt d'une prise en compte de la couche MAC

Les résultats précédents évaluent la consommation au niveau du bit de données. Ils montrent qu'un relais multi-mode n'offre que des gains minimes par rapport aux connexions directes, lorsque la couche MAC n'est pas prise en compte. Une couche MAC fournit alors une nouvelle source de consommation via les paquets de contrôle, l'utilisation de trames, et leur éventuelle retransmission.

Comme nous l'avons vu précédemment, la consommation d'un mode dépend aussi de la couche MAC utilisée. En effet, le rôle d'une couche MAC est de fournir un accès équitable au média. Cependant, cet accès dépend d'un processus qui lui aussi est consommateur d'énergie. La prise en compte des paquets de contrôle et de l'écoute passive peut donner lieu à des résultats différents de ceux que nous venons de voir.

Dans le cadre d'une évaluation réaliste, nous avons donc tout intérêt à considérer l'impact énergétique d'une couche MAC. L'utilisation de simulations réseaux permet de prendre en compte la couche MAC de manière aisée. Nous proposons alors d'implémenter le multi-mode dans un simulateur réseau réaliste, afin d'évaluer la consommation des scénarios étudiés de

manière plus réaliste.

5.3 Intégration du multi-mode dans un simulateur réseau

Afin d'améliorer le réalisme des simulations, nous avons choisi d'utiliser WSNNet, un simulateur réseau. Dans cette section, nous introduisons les pré-requis nécessaires à l'implémentation du multi-mode dans un simulateur réseau, puis nous détaillons notre implémentation sous WSNNet.

5.3.1 Paramètres importants pour réaliser un simulateur multi-mode

L'implémentation du multi-mode dans un simulateur réseau est soumise à plusieurs contraintes. Au cours des simulations, il est nécessaire de connaître à chaque instant le mode utilisé. En effet, le simulateur réseau peut être amené à réaliser des traitements différents en fonction du mode employé. Nous introduisons maintenant les paramètres à considérer pour implémenter le multi-mode dans un simulateur réseau.

5.3.1.1 Métadonnées nécessaires aux communications multi-mode

Au sein d'un simulateur réseau multi-mode, il est nécessaire de pouvoir distinguer chaque mode. En effet, il doit être possible de réaliser des opérations propres à chaque mode. Considérons un terminal qui envoie des données à un destinataire sous la forme de paquets. Ces données sont transmises sur un mode, choisi par l'émetteur, en fonction de contraintes.

Lors des simulations, chaque paquet possède des *méta-données* en plus des informations à transmettre. Ces *méta-données* contiennent des informations nécessaires à la bonne réalisation de la simulation, comme l'horodatage, le premier émetteur des données, etc. Il est donc intéressant de pouvoir utiliser ces méta-données pour stocker les informations utiles au multi-mode, et au calcul de l'énergie par bit.

Mode choisi Il est intéressant de sauvegarder le *mode choisi* pour la transmission au sein des méta-données. Cette méta-donnée sera utilisée pour réaliser des traitements propres à un mode, que ce soit en transmission, au cours de la propagation, ou en réception. Au niveau d'un terminal émetteur, cela permet de connaître l'interface utilisée pour envoyer le paquet. Au cours de la propagation, cela amène à effectuer les traitements propres à un mode, comme l'atténuation, l'évanouissement, etc. En réception, plusieurs modes peuvent communiquer sur le même canal. Il est donc utile de connaître le mode d'un paquet pour le décoder.

L'assignation du mode choisi au sein de la méta-donnée peut être réalisé à deux moments clés de la transmission : soit au niveau de la couche réseau, soit au niveau de la couche physique. Au niveau de la couche réseau, cela valide le choix de la transmission à un mode.

5 Réduction d'énergie grâce au multi-mode

De plus, cette étape est commune aux différents modes, l'assignation des méta-données est donc regroupée à un seul et unique niveau. Pourtant, il existe quelques inconvénients. Au niveau de la couche physique, cela permet de gérer de manière simplifiée la fragmentation, réalisée au niveau de la couche MAC. De plus, les paquets de contrôle MAC n'ont pas été générés par la couche réseau. Il est cependant possible de recopier le mode choisi dans les méta-données des paquets concernés lors de leur création. De plus, il faudra bien penser à réaliser le stockage des méta-données au sein de chacune des couches physiques utilisées.

Taille originale du paquet Afin d'implémenter notre modèle d'énergie, la *taille originale* du paquet doit être stockée au sein des méta-données. Cette taille originale permet de calculer la consommation par bit pour un mode, sur la base de l'équation (3.9), indépendamment de la taille d'une trame MAC, des paquets de contrôle et des retransmissions. Comme précédemment, cette valeur devra être recopiée au sein des méta-données des paquets issus du paquet original (fragmentation ou contrôle).

5.3.1.2 Couche physique multi-mode

Dans un simulateur réseau, la couche physique permet d'envoyer et recevoir les données d'un mode. L'apport du multi-mode implique l'utilisation de plusieurs couches physiques en simultané. Lorsqu'il s'agit d'un simulateur multi-mode, l'implémentation du multi-mode est soumise à plusieurs contraintes. Cette partie présente ces contraintes et tente d'introduire quelques solutions possibles.

Propagation multi-mode Au niveau de la propagation, le modèle d'atténuation, l'évanouissement et le masquage associés à un mode sont appliqués à tous les paquets de ce mode. Le stockage du mode au sein des méta-données est alors pratique, voire indispensable. Il permet d'appliquer les conditions de canal propres à un mode. Dans un but d'optimisation, le modèle de propagation pourra être appelé uniquement lorsqu'un récepteur peut recevoir le paquet du mode considéré.

Réception d'un mode En multi-mode, deux modes différents (ou plus) peuvent transmettre sur le même canal. En général, un récepteur qui désire recevoir les données d'un mode écoute le canal associé. Il pourrait être facile de modifier la simulation en assignant un canal par mode. Pourtant, dans la réalité, les communications sur un canal identique peuvent exister, et sont considérées comme des interférences.

La réception multi-mode justifie alors le stockage du mode choisi au sein des méta-données d'un paquet. Grâce à cela, une couche physique décide si un paquet peut être reçu et décodé. Par la suite, les opérations effectuées le seront pour le mode considéré (calcul de la consommation, du taux d'erreur, ...).

5.3 Intégration du multi-mode dans un simulateur réseau

De plus, il est nécessaire de communiquer avec la couche MAC du mode choisi. Dans un simulateur multi-mode, plusieurs couches MAC peuvent fonctionner en parallèle. Une couche MAC peut aussi être commune à plusieurs modes, avec une discrimination du mode dans les traitements à réaliser. La couche MAC utilise alors les méta-données pour vérifier que le paquet appartient bien au mode traité.

5.3.1.3 Routage adapté au multi-mode

L'utilisation d'un routage adapté se révèle nécessaire lors des communications multi-mode. Le routage multi-mode nécessite quelques pré-requis.

Interfaces pour le routage Un terminal doit définir les interfaces autorisées pour le routage. Ceci est particulièrement vrai dans le cadre d'un relais ou d'un réseau ad-hoc : lorsque des données sont reçues sur un mode, un terminal doit savoir s'il est autorisé à les retransmettre. Il faut alors connaître le mode à utiliser pour contacter le prochain saut.

Mode du prochain saut Dans un réseau, les terminaux ne partagent pas tous les mêmes modes. Lorsque deux terminaux veulent communiquer, il est obligatoire de connaître le mode ou les modes actifs en réception (par exemple, en utilisant des paquets de contrôle au niveau routage). La table de routage doit alors contenir une liste des modes à utiliser en priorité pour contacter le prochain saut. Ainsi, l'émetteur choisit le mode à utiliser en fonction des interfaces disponibles à la réception, sur la base de critères variés (priorité, débit, énergie).

Relation avec la couche MAC La couche routage doit communiquer avec la (les) couche(s) MAC pour gérer la fragmentation du paquet transmis. Idéalement, les trames sont fragmentées lors de leur passage de la couche réseau à la couche MAC. Il est possible de se baser sur les méta-données du mode choisi, pour réaliser la fragmentation IP en fonction de la taille maximum de trame. Pour cela, il est nécessaire de recopier les méta-données (comme le numéro du paquet original), afin de prendre en compte cette fragmentation dans le calcul de l'énergie par bit.

5.3.2 Implémentation du multi-mode dans WSNNet

Nous détaillons maintenant notre implémentation dans WSNNet, un simulateur réseau précis. Nous expliquons nos choix, puis nous présentons un exemple, sous la forme d'un terminal multi-mode.

TABLE 5.1: Exemple d'une table de routage (extrait)

Source	Destination	Prochain saut	Interface de routage
a	b	b	1
a	c	b	0
...
c	b	b	2

5.3.2.1 Développement d'une couche réseau multi-mode sous WSNNet

La couche *Routage* a fait l'objet d'importantes modifications pour s'adapter au multi-mode. Elle est au cœur de la gestion du multi-mode dans notre simulateur. Contrairement à d'autres approches, qui implémentent le multi-mode au travers d'une couche intermédiaire comme dans [215], nous gardons la structure du modèle OSI dans un but de compatibilité. Lorsque la couche routage transmet le paquet à la couche MAC, le mode utilisé en transmission est inscrit dans les méta-données du paquets. Il est alors facile de vérifier que le mode utilisé correspond bien à une interface de routage en réception.

WSNet définit une table de routage multi-mode globale, qui spécifie le mode à utiliser pour communiquer avec un voisin. Un extrait est présenté dans le Tableau 5.1. Les nœuds utiliseront uniquement les règles de routage les concernant. Le choix d'implémenter une table de routage statique comme un fichier externe permet de limiter la complexité liée à un routage dynamique. Comme dans une table de routage classique, un nœud « *Source* » transmettra ses données vers le « *Prochain saut* », afin d'atteindre une « *Destination* ». Ces champs contiennent l'identifiant (unique) du nœud, attribué par WSNNet à sa création.

Il apparaît évident que le terminal source doit alors connaître les capacités de communication du prochain saut, et posséder au minimum une interface active en commun. Afin d'intégrer le multi-mode à la couche routage, nous rajoutons donc un champ « *Interface de routage* », qui spécifie l'interface à utiliser pour envoyer les données au prochain saut. Lorsque la valeur de l'interface de routage est à 0, le terminal source peut contacter le prochain saut sur toutes leurs interfaces communes. Le terminal source doit alors choisir une interface en fonction de critères donnés.

De ce fait, chaque nœud multi-mode détermine la priorité d'utilisation de ses interfaces. Ainsi, un nœud enverra des données au prochain saut sur l'interface la plus prioritaire, puis sur les suivantes si le prochain saut n'écoute pas sur l'interface choisie. Ceci hiérarchise les interfaces de communication au niveau du nœud pour les communications multi-mode.

5.3.2.2 Création d'un terminal multi-mode sous WSNNet

Dans cette partie, nous présentons les modifications effectuées pour prendre en compte le multi-mode dans WSNNet. Sous WSNNet, un nœud (ou terminal) multi-mode se voit assigner

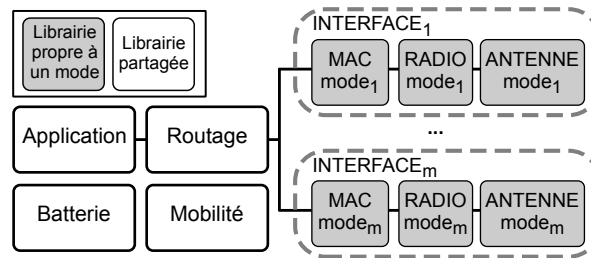


FIGURE 5.6: Structure d'un bundle multi-mode (terminal) sous WSNNet

une *interface* par mode. Ici, une *interface* correspond à la combinaison d'un modèle de couche MAC, d'un modèle de couche PHY et d'une antenne.

La Figure 5.6 représente les interactions entre les différentes bibliothèques nécessaires à la création d'un nœud multi-mode sous WSNNet, telles que représentées au sein d'un bundle multi-mode. Chaque nœud multi-mode possède une batterie, qui évalue la consommation d'énergie selon notre modèle. Nous détaillons maintenant le rôle de chaque couche utilisée par un terminal multi-mode, en mettant en avant les modifications réalisées.

La couche Application envoie des paquets de données vers une destination. Notre implémentation enregistre la taille originale des données dans les méta-données du paquet. Cette modification offre la possibilité de connaître précisément l'énergie par bit dans le cadre d'un relais multi-mode.

La couche Routage détaillée ci-dessus est au cœur de notre implémentation du multi-mode sous WSNNet.

La couche MAC est propre à un mode. Elle prend en compte la fragmentation des paquets entre les différents modes. Pour cela, elle spécifie la taille maximum d'une trame dans le mode correspondant.

La couche MAC gère aussi la transmission et la réception des paquets de contrôle, en lien avec la couche radio. Elle autorise la désactivation de ces paquets pour des trames de petite taille. Elle recopie les méta-données d'un paquet, comme le mode choisi, dans les paquets de contrôle.

La couche Radio est modifiée pour prendre en compte une radio logicielle. Son rôle principal est de transmettre et de recevoir les paquets au sein d'un mode donné. Chaque mode possède sa propre couche radio. Cette dernière implémente les chaînes de transmission et de réception (modulation, codage). Elle évalue le taux d'erreur d'une trame sur la base d'un modèle à seuil (en fonction de la modulation et du codage employés), ce qui est source de retransmissions.

5 Réduction d'énergie grâce au multi-mode

La couche radio spécifie la complexité de la partie numérique, pour un nombre d'opérations par bit et une architecture donnée, en transmission et en réception. Elle définit aussi les valeurs de consommation du frontal radio et contrôle la puissance de transmission d'un mode. Elle enregistre les statistiques de transmission et de réception pour chaque mode, comme le nombre et le type des paquets transmis au sein d'un mode. Il est alors possible de savoir à quel moment ont lieu les retransmissions. Finalement, elle communique avec la batterie pour évaluer la consommation d'énergie d'un mode.

L'Antenne transmet et reçoit des signaux sur un canal précis.

La Batterie calcule la consommation d'énergie d'un terminal en fonction du modèle présenté à la section 3.2.1. Pour chaque nœud, elle enregistre les consommations numériques et analogiques de tous ses modes actifs, en transmission et en réception. De plus, il est possible d'ignorer le coût de certains paquets (par exemple, les paquets de contrôle).

À la fin de la simulation, un fichier journal permet de retrouver la consommation par bit de chaque mode actif d'un nœud.

La librairie Mobilité représente la position d'un nœud durant la simulation. Aucune modification n'est nécessaire pour le bon fonctionnement du multi-mode.

5.3.2.3 Paramètres modifiables sous WSNnet

Nous rappelons que WSNnet utilise un fichier de configuration .xml qui permet de modifier les paramètres des librairies aisément. Dans cette partie, nous présentons les variables modifiables en relation avec notre travail.

Environnement multi-mode Dans les simulations multi-mode, un environnement de propagation est associé à chaque mode. Cet environnement spécifie le modèle de canal utilisé, et permet d'en paramétrer les contraintes (telles que l'atténuation, l'évanouissement de Rayleigh, le masquage et le modèle d'interférences). Il utilise les méta-données du paquet pour appliquer l'atténuation à tous les nœuds en état de recevoir les données dans le mode choisi.

Nous avons implémenté les modèles de canaux présentés à la section 3.2.4. La plupart des variables sont paramétrables au sein du fichier .xml (*e.g.* le facteur d'atténuation, le nombre de murs). Cependant, la fréquence reste définie au niveau de la couche radio, et la distance dépend de la position des nœuds.

L'environnement multi-mode définit aussi le modèle d'interférences utilisé.

Modification des paramètres des librairies Pour chaque librairie il est possible d'influencer ses paramètres, que ce soit au niveau de la librairie elle-même, du mode ou du nœud.

- **Couche Application** : L'application définit la quantité de bits de données à envoyer vers une destination, avec un temps de démarrage et d'arrêt.
- **Couche Routage** : La librairie implémente une table de routage globale. Chaque nœud peut spécifier la priorité d'utilisation de ses interfaces.
- **Couche MAC** : Il est possible de définir une taille maximum de trame, ainsi que l'utilisation ou non de paquets de contrôle.
- **Couche PHY** : Pour chaque mode, il est possible de définir sa fréquence, le codage et la modulation utilisée. Il est possible de modifier la puissance de transmission (valeurs minimum, maximum, et le pas) ainsi que les valeurs de complexité numérique, que ce soit en transmission ou en réception. Pour un nœud, il est possible de définir l'architecture de son processeur, la sensibilité de réception du terminal, le contrôle de puissance.
- **L'Antenne** : Il n'est possible de définir que le canal.
- **Mobilité** : Dans ce travail, chaque distance fait l'objet d'un fichier de configuration .xml. Nous avons fait ce choix afin de pouvoir rejouer plusieurs fois les simulations à une distance donnée. Ceci nous permet de varier la granularité des simulations, pour analyser l'impact de différents paramètres sur la consommation d'énergie. La mobilité est alors représentée par la création d'un nouveau fichier de configuration .xml où seule la position des nœuds change.

À la fin de la simulation, différents scripts sont utilisés pour retrouver la consommation globale à chaque distance, le nombre de retransmissions, etc...

Méta-données sous WSNNet WSNNet enregistre plusieurs méta-données au sein d'un paquet :

- Le mode utilisé en transmission, pour les traitements multi-mode.
- La taille des données originales, pour calculer \bar{b} .
- La source et la destination du paquet, pour les statistiques de trafic.
- La modulation et le codage utilisés, pour déterminer le taux d'erreur en réception.
- La durée d'envoi d'une trame, avec le temps de début et de fin, pour calculer les interférences.
- La puissance d'envoi et le canal utilisé en transmission, pour la propagation et les interférences.
- Le niveau de bruit à la réception, pour calculer le rapport signal à bruit.

Nous allons maintenant évaluer la consommation d'énergie d'un relais multi-mode de manière réaliste, grâce à des simulations réseaux sous WSNNet.

5.4 Simulations réseaux

Dans cette section, nous implémentons les scénarios étudiés sous WSNNet, avec l'utilisation de paquets de contrôle en 802.11g. De plus, nous considérons les *écoutes passives* des

5 Réduction d'énergie grâce au multi-mode

terminaux, qui peut se traduire par la réception de données ne leur étant pas destinées. Les conditions de canal restent identiques (modèle ITU-R en 802.11g et modèle de Friis en 802.15.4), et les données sont reçues sans interférence ni erreur.

5.4.1 Influence de différents paramètres

TABLE 5.2: Paramètres de simulation WSNet

	802.11g	802.15.4
<u>Paramètres contrôlés dans WSNet</u>		
Taille des données (octets) (b_0)	500	500
Débit des données (R)	6 Mbps	20 kbps
Couche MAC	CSMA/CA	CSMA
<u>Paramètres indépendants de WSNet</u>		
Taille des paquets de contrôle (octets)	RTS : 36, CTS : 28, ACK : 26	-
Taille des en-têtes (octets) ($S(\text{Hdr}_j)$)	84	40
Taille d'une trame MAC (octets) ($S(f_j)$)	584	133, 200 ou 540

Le réalisme des simulations WSNet permet d'évaluer l'influence de plusieurs paramètres sur la consommation d'énergie d'un relais multi-mode. Dans cette partie, nous évaluons la consommation globale d'un relais et des connexions directes sur un lien montant (les terminaux mobiles envoient leurs données vers le point d'accès). Nous nous intéressons à l'impact de plusieurs paramètres sur E_{global} : la taille des paquets, le nombre de voisins, les paquets de contrôle et la couche MAC. Nous nous attellerons à minimiser leur influence sur la consommation d'énergie. Puis, nous étudierons le coût des écoutes passives et des paquets de contrôle.

Dans les simulations proposées, tous les terminaux disposent d'une application qui envoie b_0 bits de données vers l'AP à intervalles réguliers. La couche MAC utilisée en 802.11g est CSMA/CA avec paquets de contrôle. En 802.15.4, nous utilisons CSMA sans paquets de contrôle : un terminal peut transmettre directement lorsque le canal est considéré libre. Le Tableau 5.2 présente les différents paramètres utilisés dans les simulations WSNet.

Comme précédemment, tous les terminaux adaptent leur puissance de transmission. Les simulations sont réalisées en canal ITU-R avec 3 murs pour le 802.11g et en canal de Friis avec un facteur d'atténuation de 3,1 pour le 802.15.4. Le PU se déplace jusqu'au SU, à partir de $d_{AP-PU} = 5$ m. Le SU est immobile, et se situe à $d_{AP-SU} = 30$ m. Ces distances sont choisies car la distance maximum de transmission en 802.15.4 est proche des 25 m, dans les conditions de canal choisies et avec une puissance de transmission limitée à 0 dBm. Il n'y a pas d'erreurs ni d'interférences.

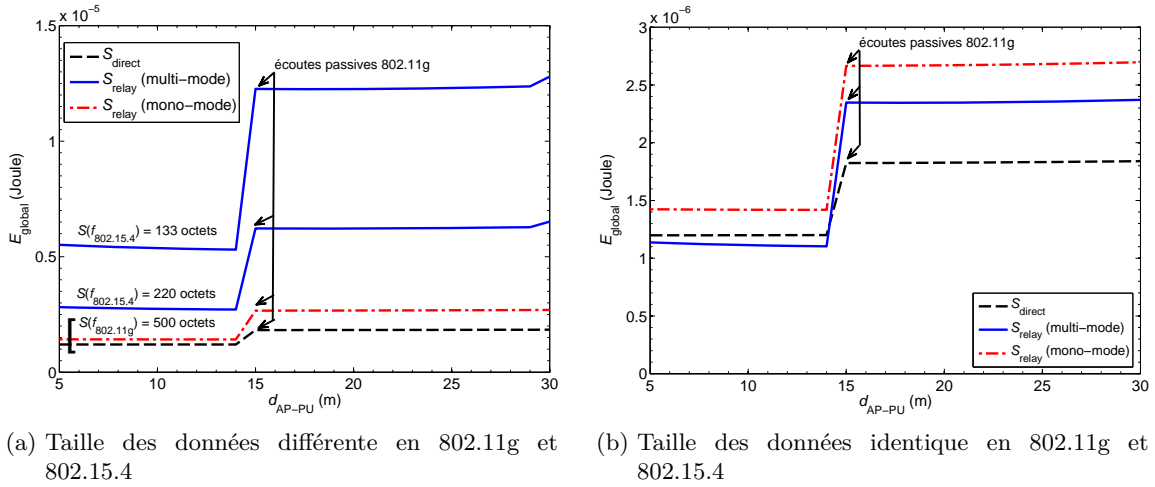


FIGURE 5.7: Résultats de simulations WSNet : comparaison de la consommation d'énergie globale pour S_{direct} et S_{relay} , pour 1 SUs, en variant la taille des trames MAC

5.4.1.1 Taille des paquets

Tout d'abord, nous évaluons l'impact de la taille des paquets sur la consommation d'énergie. Dans un premier temps, nous évaluons la consommation d'énergie en considérant des trames de tailles différentes suivant les modes. Nous choisissons une taille maximum de trame de 584 octets en 802.11g, et de 133 puis 200 octets en 802.15.4. Cette évaluation engendre de la fragmentation au niveau du SU, sur le lien 802.15.4. De plus, les trames relayées prennent la taille maximale d'une trame 802.11g, soit 584 octets. Dans un second temps, nous choisissons une taille de trame telle qu'aucune fragmentation ne se produise au cours du relais. Les résultats de simulations WSNet sont présentés à la Figure 5.7, pour un lien montant.

Impact de la fragmentation La taille des paquets joue un rôle important dans un relais multi-mode. Les terminaux utilisés sont identiques à ceux présentés précédemment. La puissance de transmission des paquets de contrôle du 802.11g n'est pas limitée, et le point d'accès transmet toujours à la puissance maximum autorisée. Tous les terminaux écoutent passivement dans tous les modes : ils reçoivent donc les données des autres utilisateurs à distance de communication.

La Figure 5.7(a) présente l'évaluation de E_{global} pour des tailles de trame différentes dans chaque modes. Nous remarquons que la figure se décompose en deux parties nettes. Le point de rupture de la courbe se situe exactement lorsque le PU se trouve à mi-distance de l'AP et de SU, à $d_{\text{AP-PU}} = 15$ m. Ce « saut » provient des écoutes passives : le SU reçoit les communications 802.11g du PU, même si elles ne lui sont pas destinées. Il est dû aux paramètres de la simulation. En effet, lorsque le PU est proche de l'AP (à gauche du saut), les commu-

5 Réduction d'énergie grâce au multi-mode

nications entre le PU et l'AP ne sont pas entendues par le SU, sachant que chaque terminal limite sa puissance de transmission. Au-delà de la mi-distance, le PU doit émettre plus fort pour atteindre l'AP. Ainsi, ses communications sont aussi reçues par le SU, qui consomme plus.

Lors de la transmission de données dans S_{relay} multi-mode, la communication nécessite l'envoi de plusieurs trames MAC en 802.15.4 : il se produit une fragmentation au niveau du lien R_{mode} . Dans les deux autres cas, la taille de trame 802.11g permet l'envoi de données sans fragmentation. Nous observons que l'augmentation de E_{global} dépend du nombre de trames fragmentées sur le lien 802.15.4. Cette fragmentation sur le lien R_{mode} induit une consommation très largement supérieure aux connexions directes (et, dans une moindre mesure, à un relais mono-mode).

En l'absence de politique d'agrégation, les trames R_{mode} sont relayées par des trames D_{mode} de taille maximum, tout en ne transportant que b_0 bits de données. Il n'est donc pas intéressant d'utiliser un relais multi-mode lorsque les trames du lien R_{mode} sont beaucoup plus petites que celles du lien D_{mode} .

Sans fragmentation La Figure 5.7(b) présente l'évaluation de E_{global} pour une taille de trame garantissant qu'il n'y a pas de fragmentation. Quand le PU est proche de l'AP, la consommation d'un relais multi-mode ne consomme que 5% à 7% d'énergie en moins que les connexions directes. Après le saut, la consommation d'un relais multi-mode augmente, jusqu'à devenir 28% plus énergivore que les connexions directes. Dans le cadre d'un relais mono-mode, E_{global} est supérieure de 18% et 45%, respectivement avant et après le saut. De ce fait, relayer un seul SU n'apporte que peu d'intérêt dans un but de réduction de la consommation.

Nous comparons maintenant la consommation d'un relais multi-mode avec celle d'un relais mono-mode. Comme précédemment, le relais multi-mode consomme moins que le relais mono-mode. Ce résultat se justifie de la même manière : le coût du lien relayé est moins important lorsque le 802.15.4 à 20 kbps est utilisé. De plus, avant le saut, le relais multi-mode consomme moins qu'une communication directe : le surcoût du relais 802.15.4 est moins important qu'un lien 802.11g pour le SU à 30 m. Cependant les écoutes passives en 802.11g augmentent après le saut, d'où une consommation d'énergie plus importante au niveau du SU, qui reçoit sur son interface 802.11g les communications du PU et ses propres communications relayées.

Avec évanouissement de Rayleigh La Figure 5.8 évalue E_{global} pour les scénarios proposés, en prenant en compte un évanouissement de Rayleigh indépendant pour chaque lien de communication. En moyenne, le comportement de la courbe est équivalent à un relais multi-mode sans évanouissement. Cependant, nous constatons qu'un relais permet de réduire la consommation d'énergie en fonction des conditions de canal (liées à l'écart-type après le « saut »). Le large écart-type est représenté par les écoutes passives reçues (ou non) par le SU, ajouté à une

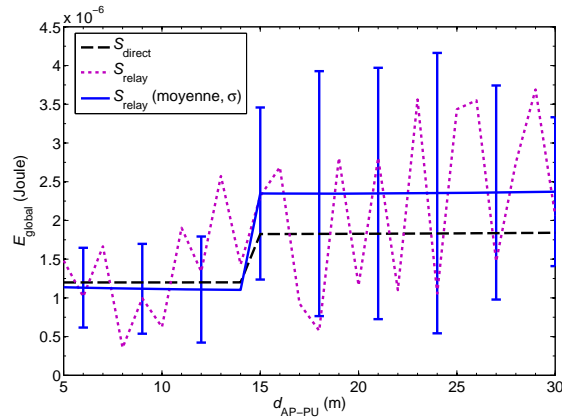


FIGURE 5.8: Simulations WSNnet pour 1 SU, sans erreurs ni retransmission avec évanouissement de Rayleigh

plus grande distance entre l'AP et le PU. Lors d'une seule réalisation (courbe en pointillés), les changements rapides de la consommation représentent la nature dynamique du canal et son influence sur la consommation d'énergie.

5.4.1.2 Impact des voisins

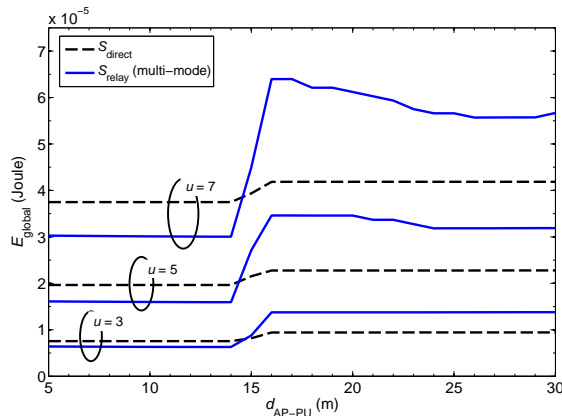


FIGURE 5.9: Résultats de simulations WSNnet : Consommation pour $u = 3, 5$ et 7 SUs

Nous évaluons maintenant l'impact du nombre de voisins sur la consommation d'énergie. Pour cela, nous simulons les mêmes scénarios : un PU mobile qui se déplace vers u SUs fixes. La distance entre les SUs et l'AP reste identique ($d_{AP-SU} = 30$ m). Les u SUs sont espacés de $2,5$ m sur un cercle centré en AP, de rayon $d_{AP-SU} = 30$ m. Le PU se déplace en ligne droite, de $d_{AP-PU} = 5$ m jusqu'à atteindre la distance maximum de 30 m.

La Figure 5.9 présente les résultats de simulation WSNnet pour $u = 3, 5, 7$ SUs. Elle permet d'évaluer l'impact du nombre de voisins sur la consommation globale d'énergie. Dans ce cas,

5 Réduction d'énergie grâce au multi-mode

l'écoute passive apparaît dans les deux modes de S_{relay} : en 802.15.4 au niveau de chaque SU, et en 802.11g après le saut (quand le PU s'approche des SUs). De plus, tous les terminaux souffrent de cette écoute passive en 802.11g dans S_{direct} (par exemple, le PU reçoit les signaux de tous les SUs). Cependant, le faible coût du 802.15.4 par rapport à l'écoute passive des liens 802.11g n'est pas perceptible. Nous rappelons aussi que la puissance de transmission de l'AP est toujours maximum, ainsi les SUs reçoivent aussi les paquets de contrôle transmis par l'AP.

Nous constatons le même comportement vis-à-vis du point de rupture. Comme expliqué précédemment, lorsque le PU est proche de l'AP, le signal 802.11g n'atteint pas les SUs dans S_{relay} . Par conséquent, la consommation d'énergie d'un relais multi-mode diminue alors que le nombre de SU augmente : la consommation de S_{relay} est 15% meilleure pour $u = 3$ SUs, et 20% meilleure pour $u = 7$ SUs, comparé à S_{direct} . Cette amélioration dénote l'intérêt de relayer sur un mode à plus faible consommation que celui utilisé pour les connexions directes.

Après le saut, la consommation d'un relais augmente avec le nombre de SUs, à cause du nombre plus élevé de flux 802.11g en écoute : chaque SU reçoit les $u + 1$ flux du PU en écoute passive. Par exemple, pour $u = 7$ SUs, S_{relay} consomme environ 35% plus d'énergie que les connexions directes. Nous remarquons cependant une consommation décroissante pour les relais. Ce comportement provient de deux paramètres. Premièrement, la consommation du lien 802.15.4 diminue lorsque le PU se rapproche des SUs, ce qui compense la hausse de consommation des liens 802.11g. Ce résultat montre l'impact plus important de la distance sur le lien 802.15.4 : une distance plus faible entre le PU et les SUs consommera moins d'énergie. Le second paramètre est lié au placement des SUs autour d'un cercle. Cette topologie amplifie l'impact du premier paramètre au fur et à mesure que le PU s'approche des 30 m.

Les résultats présentés ici dénotent un intérêt marginal du relais multi-mode par rapport aux connexions directes. En complément des simulations Matlab, les simulations WSNNet permettent de confirmer ce résultat. Cependant, le raffinement des paramètres nous permet d'observer qu'un relais multi-mode demeure proche de connexions directes d'un point de vue consommation d'énergie. L'augmentation du réalisme dans les simulations WSNNet permet surtout de mettre en avant deux facteurs influençant la consommation d'énergie : les paquets de contrôle et les écoutes passives. Nous allons maintenant quantifier les gains énergétiques de deux approches afin de minimiser l'influence de ces paramètres.

5.4.1.3 Différentes stratégies de réduction de la consommation

Comme nous venons de le voir, les paquets de contrôle et les écoutes passives jouent un rôle important dans la consommation d'énergie d'un relais multi-mode. Dans cette partie, nous présentons des stratégies qui visent à minimiser l'impact de ces paramètres sur la consumma-

tion globale d'énergie. À partir de maintenant, l'application enverra toujours des données de la taille $b_0 = 500$ octets.

Dans un premier temps, nous nous intéressons à réduire l'impact des paquets de contrôle. En général, les paquets de contrôle sont envoyés à pleine puissance afin d'éviter les cas de nœud caché. Dans nos scénarios, ces paquets sont présents uniquement en 802.11g, donc uniquement sur le lien de communication entre le PU et l'AP dans le cadre d'un relais multi-mode. Nous proposons alors de contrôler la puissance de ces paquets dans un relais multi-mode (jusqu'à présent, nous n'appliquons la limitation de la puissance d'émission qu'aux données).

Sachant que l'écoute passive représente un poids non négligeable dans la consommation d'énergie d'un relais multi-mode, il peut être intéressant de regarder le comportement d'un tel relais avec des terminaux qui n'écoutent pas systématiquement sur leur interface passive. Dans un second temps, nous proposons de désactiver l'interface non utilisée au niveau des SUs, afin de supprimer l'écoute passive sur cette interface. Ainsi, la puissance de transmission des paquets de contrôle sera limitée à la distance d_{AP-PU} .

5.4.2 Contrôle de puissance

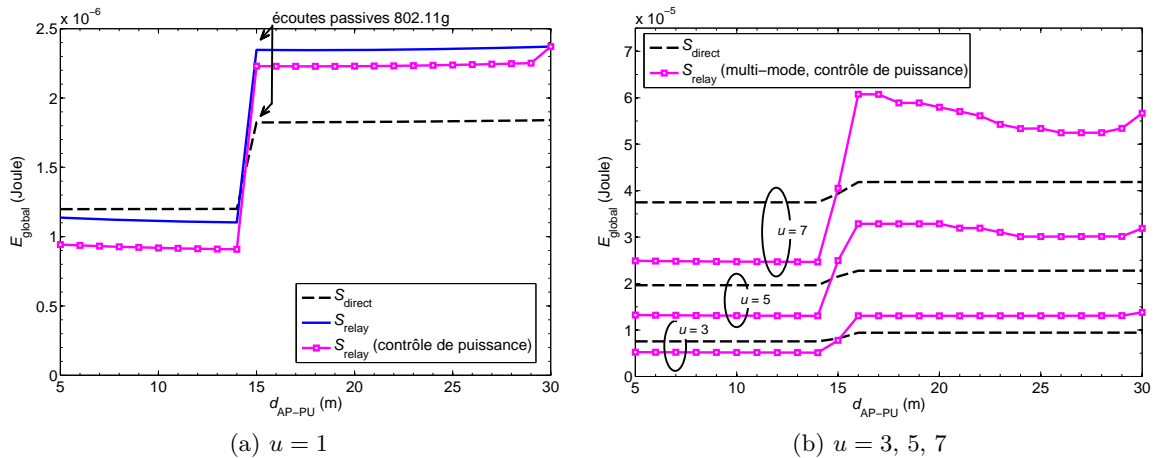


FIGURE 5.10: Résultats de simulations WSNNet : comparaison de l'énergie globale du réseau pour S_{direct} et S_{relay} , pour u SUs, en limitant la puissance des paquets de contrôle

La Figure 5.10 présente les résultats de simulation WSNNet avec les mêmes paramètres que précédemment. Elle évalue l'impact des paquets de contrôle sur la consommation d'énergie en étudiant E_{global} pour un relais avec un point d'accès avec contrôle de puissance. Elle compare ces résultats à un relais multi-mode classique et aux connexions directes, tous deux sans limitation de puissance des paquets de contrôle. Le relais mono-mode n'est pas représenté, car il n'apporte aucun gain par rapport aux connexions directes.

5 Réduction d'énergie grâce au multi-mode

Pour un seul SU La Figure 5.10(a) s'intéresse à E_{global} pour $u = 1$ SU. Nous regardons la courbe avec des carrés, où les paquets de contrôle transmis par l'AP sont uniquement reçus par le PU, et vice-versa. Le contrôle de puissance reste appliqué à tous les paquets de données. Il est clair que cette limitation permet de gagner de l'énergie sur deux points. Tout d'abord, la puissance de transmission des paquets de contrôle par le PU et par l'AP est réduite. Deuxièmement, l'écoute passive des paquets de contrôle par le SU (inexistante pour les paquets envoyés par l'AP, tant que le PU n'est pas à côté des SUs comme on peut le voir sur la courbe avec des carrés à 30 m). Par rapport aux connexions directes, cette stratégie apporte des gains en énergie de 25% avant le « saut », mais elle ne présente aucun intérêt après la mi-distance.

Pour plusieurs SUs La Figure 5.10(b) montre l'intérêt non négligeable de cette stratégie lorsque le nombre de SUs augmente. Lorsque le PU est à proximité de l'AP, le fait de limiter P_{out} pour tous les paquets de contrôle de l'AP apporte des gains d'énergie à S_{relay} proches de 30% pour $u = 3$ et jusqu'à 35% pour $u = 7$. Étant donné que le nombre de connexions entre le PU et l'AP augmente avec u , il en va de même pour la consommation liée aux écoutes passives. En effet, les SUs reçoivent à la fois les signaux du PU ainsi que de leurs voisins. Nous rappelons que la consommation d'énergie du 802.11g à 6 Mbps est plus importante qu'en 802.15.4 à 20 kbps en réception (en se référant aux valeurs de E_{bit}). Par conséquent, la consommation d'énergie liée aux écoutes passives diminue pour le relais multi-mode : plus il y a de SUs, plus les gains augmentent. Un relais multi-mode devient alors une solution intéressante pour réduire la consommation d'énergie en présence de plusieurs SUs, et ce, avec un PU proche de l'AP.

Néanmoins, après 15 m, le relais multi-mode perd de son intérêt pour les mêmes raisons que précédemment. Bien que le contrôle de puissance permette des gains de 5% par rapport à un relais classique, la consommation d'énergie reste plus élevée que les communications directes (aux alentours de 40% pour $u \geq 3$). La décroissance de la courbe a lieu pour les mêmes raisons que précédemment.

5.4.3 Suppression de l'écoute passive

La Figure 5.11 présente les résultats de simulations en désactivant l'interface 802.11g au niveau des SUs, dans un relais multi-mode. Dans ce cas, nous supprimons l'écoute passive des SUs sur cette interface.

La Figure 5.11(a) évalue l'impact de cette stratégie pour $u = 1$ SU. La première constatation vient du fait que le « saut » à mi-distance disparaît. Avant 15 m, cette stratégie est identique à la limitation de la puissance des paquets de contrôle : la consommation est similaire. Le gain en énergie est donc de 17% par rapport aux connexions directes, et de 25% par rapport

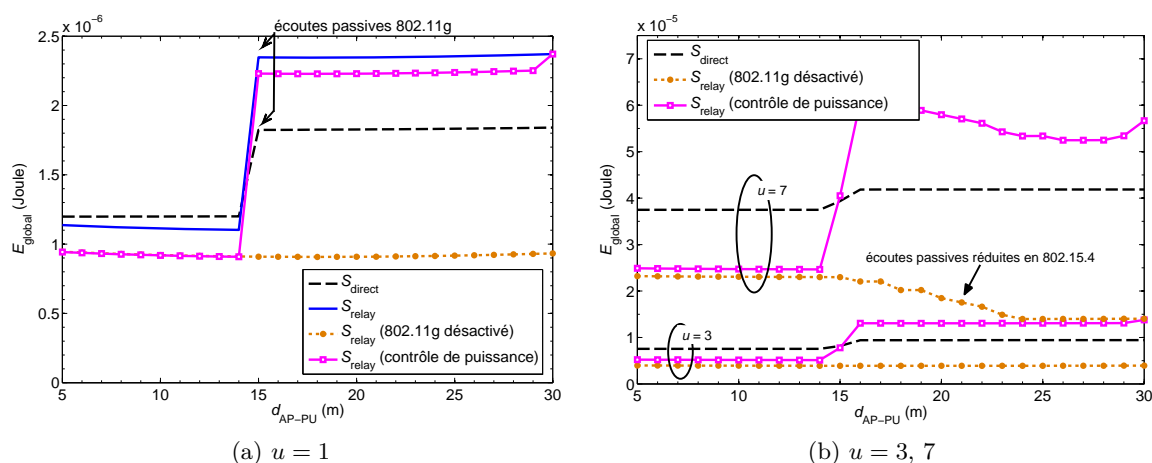


FIGURE 5.11: Résultats de simulations WSNet : comparaison de l'énergie globale du réseau pour S_{direct} et S_{relay} , pour u SUs, en désactivant l'interface 802.11g inactive

à un relais « classique ».

Après 15 m, le surcoût engendré par les écoutes passives en 802.11g est important pour le relais multi-mode. Cependant, le fait de désactiver l'interface 802.11g des SUs annule cette consommation d'énergie. En appliquant cette stratégie, la consommation d'un relais multi-mode reste très faible par rapport aux connexions directes, avec des gains proches des 50%. La Figure 5.11(b) s'intéresse aux gains énergétiques de cette stratégie pour un relais multi-mode avec u SUs. Les résultats sont similaires à ce que nous avons pu observer jusque là. Nous remarquons aussi que pour $u = 7$ SUs, la consommation d'énergie devient très faible lorsque le PU s'approche des SUs. En effet, à de courtes distances, les SUs réduisent leur puissance de transmission, ce qui limite les écoutes passives en 802.15.4 au niveau de leurs voisins. Nous pouvons noter que cette stratégie possède une consommation d'énergie équivalente à un relais classique avec $u = 3$, pour deux fois plus de terminaux mobiles. Cette stratégie propose alors des gains élevés dans la réduction de la consommation d'un relais multi-mode lorsque le nombre d'utilisateurs augmente.

5.5 Synthèse

Dans cette section, nous synthétisons les résultats majeurs de ce paragraphe. Nous expliquons comment un relais multi-mode peut devenir un moyen intéressant de réduire la consommation d'énergie.

Simulations Matlab Dans une première approche, nous avons réalisé des simulations Matlab. Ces simulations, basées sur un modèle analytique, nous ont permis d'observer des résultats

5 Réduction d'énergie grâce au multi-mode

de consommation de deux scénarios de relais multi-mode.

Cependant, la simulation du processus de transmission manque de réalisme. Les bits sont envoyés sans tenir compte des processus liés aux couches supérieures (trames, paquets de contrôle, écoutes passives). Néanmoins, nous avons pu dégager un comportement intéressant dans le cadre d'un relais 802.11g-vers-UMTS.

Zone de Non-Relais Ce comportement nous a permis de déterminer une « Zone de Non-Relais », au sein de laquelle l'utilisation d'un relais n'apporte aucun gain majeur par rapport aux connexions directes. L'existence d'une telle zone montre que l'utilisation d'un relais n'est pas toujours optimale pour réduire la consommation d'énergie. Ainsi, nous avons défini des règles de relais censées minimiser la consommation d'énergie.

Intérêt d'un simulateur réseau Pour plus de réalisme, nous avons choisi d'utiliser un simulateur réseau. Les avantages d'un simulateur réseau sont nombreux : prise en compte de la couche MAC, passage à l'échelle, etc. Un simulateur réseau permet aussi de choisir facilement la granularité des simulations. Il est possible de désactiver certains paramètres, ou au contraire d'en introduire de nouveaux facilement.

Nous avons pu intégrer le multi-mode assez rapidement dans WSNNet, grâce à son architecture modulaire qui facilite les extensions. La réutilisation de code existant a rendu possible le développement de nouvelles bibliothèques interagissant avec l'existant.

Stratégies de réduction de l'énergie La désactivation de l'interface inactive au niveau des SUs réduit la consommation globale d'énergie significativement. Cette désactivation entraîne la suppression des écoutes passives en 802.11g ; les SUs ne recevant plus les données 802.11g transmises par le PU vers l'AP, leur consommation d'énergie s'en trouve fortement réduite. Cependant, une telle mesure engendre quelques contraintes pour un SU qui perd sa capacité multi-mode. Une solution basée sur les *wake-up* radios lui permet d'utiliser son interface inactive : la réception d'un signal d'éveil sur son interface 802.15.4 activant son interface 802.11g. Une autre solution consiste à écouter à intervalles périodiques sur l'interface 802.11g. Ces solutions sont envisageables dans le cadre d'un relais multi-mode. Leur application permet de réduire fortement la consommation d'énergie d'un relais multi-mode, les terminaux gardant la possibilité de changer de rôle à tout moment.

Dans certains cas, il est nécessaire que toutes les interfaces des terminaux soient actives. Dans ce cas, nous avons montré l'impact des paquets de contrôle sur la consommation globale d'énergie. La solution proposée consiste alors à limiter la puissance d'émission de ces paquets de contrôle aux terminaux ayant un rôle de relais. Cette solution entraîne une consommation globale d'énergie jusqu'à 17% plus faible qu'un relais classique, lorsque le PU est proche de l'AP. Son intérêt augmente avec le nombre de SUs présents au sein du réseau.

Dans un réseau étendu, le point d'accès a connaissance de tous les PUs au sein du réseau. Pour éviter le problème des terminaux cachés, un nouveau terminal désirant rejoindre le réseau s'enregistrera au niveau de l'AP qui lui attribuera un rôle en fonction de sa position. Une autre solution pour minimiser les écoutes passives pourrait venir de l'utilisation d'une couche MAC adaptée au relais multi-mode, ou basée sur un système de slots comme le TDMA.

Dans ce chapitre, nous avons montré l'importance de la couche MAC dans l'évaluation de l'énergie globale du réseau. Nous avons vu qu'il est important de considérer les paquets de contrôle et les écoutes passives dans le cadre d'un relais multi-mode. L'utilisation de simulations réseaux nous a semblé nécessaire pour disposer d'une évaluation réaliste de cette consommation. Après avoir implémenté le multi-mode dans le simulateur réseau WSNNet, nous avons utilisé cet outil pour évaluer l'importance de la couche MAC dans la consommation d'énergie d'un relais multi-mode. Nous avons pu évaluer et valider deux stratégies qui augmentent l'intérêt énergétique d'un relais multi-mode. Finalement, un relais multi-mode est un moyen intéressant pour réduire la consommation d'énergie d'un réseau lors de l'utilisation de stratégies adaptées.

Réduction d'énergie grâce au multi-antenne

6

6.1	Modèle d'énergie réaliste pour un terminal multi-antenne et multi-mode . . .	101
6.1.1	Présentation d'un terminal multi-antenne	102
6.1.2	Calcul du Taux d'Erreur Binaire	103
6.1.3	Énergie numérique	104
6.1.4	Énergie radio	105
6.2	Intégration du multi-antenne dans un simulateur réseau	105
6.2.1	Communications et nœuds multi-antenne	105
6.2.2	Communication multi-antenne dans WSNet	106
6.2.2.1	Méta-données	106
6.2.2.2	Réplication des données	107
6.2.2.3	Gestion des interférences	107
6.3	Étude de la consommation d'énergie d'un lien multi-antenne	109
6.3.1	Prise en compte des retransmissions	109
6.3.2	Comparaison entre le multi-antenne et le mono-antenne	109
6.4	Réduction de l'énergie du réseau grâce à un relais multi-antenne multi-mode	112
6.4.1	Rappel des scénarios	112
6.4.2	Consommation d'un relais multi-antenne multi-mode	112
6.4.3	Augmentation du nombre de voisins	114
6.4.3.1	Présentation de stratégies d'adaptation	115
6.4.3.2	Réduction des écoutes passives grâce au MISO	116
6.4.3.3	Désactivation de l'interface inactive	118
6.4.4	Prise en compte des interférences	119
6.4.4.1	Présentation du modèle d'interférences	119
6.4.4.2	Consommation d'énergie en présence d'interférences	121
6.4.4.3	Discussion	123

6.1 Modèle d'énergie réaliste pour un terminal multi-antenne et multi-mode

Les terminaux modernes tirent partie des communications multi-antenne, notamment avec une augmentation de la capacité. Dans ce chapitre, nous cherchons à savoir si l'utilisation

6 Réduction d'énergie grâce au multi-antenne

du multi-antenne peut amener à une réduction d'énergie. Tout d'abord, nous définissons notre représentation du multi-antenne au sein d'un terminal radio logicielle, avec des capacités multi-mode. Puis, nous intégrons le multi-antenne à notre modèle d'énergie présenté section 3.2.1. Nous modifions en conséquence WSNNet afin d'évaluer la consommation d'énergie d'un terminal multi-antenne au sein des modes étudiés. Enfin, nous nous intéressons à l'impact d'un relais multi-mode composé de terminaux multi-antenne sur la consommation globale du réseau.

6.1.1 Présentation d'un terminal multi-antenne

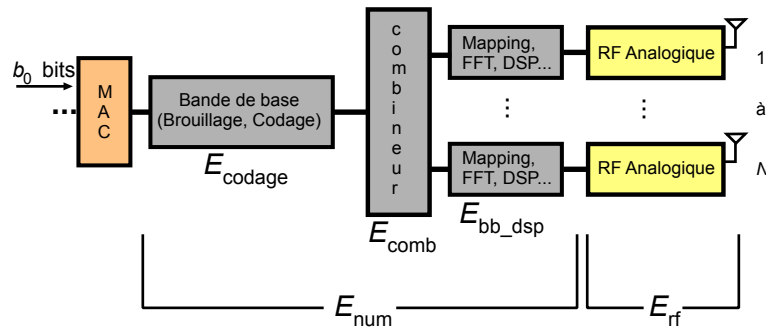


FIGURE 6.1: Représentation d'un terminal multi-antenne MIMO

Hypothèses Soit τ , un terminal radio logicielle, comme étudié à la section 3.2.1. Nous considérons que τ peut communiquer sur M modes, et que chaque mode $m_j \in M$ utilise a priori des antennes distinctes pour transmettre et/ou recevoir : τ possède donc N_j^{TX} antennes distinctes en transmission et N_j^{RX} antennes distinctes en réception au sein d'un mode m_j .

La Figure 6.1 présente les différentes composantes à considérer dans le calcul de l'énergie d'un terminal τ , pour un mode m_j donné. En transmission, une trame contenant b_0 bits de données arrive au niveau de la couche physique. Les traitements liés au codage sont d'abord réalisés suivant le même processus que pour un terminal mono-antenne. Puis, le multi-antenne fait appel à un *combineur*, qui répartit les données entre les différentes antennes. À la suite de cette combinaison, chaque antenne utilisée en transmission est associée à une branche de traitement numérique, qui réalise les opérations de mapping et de traitement du signal. De la même manière, chaque antenne est associée à une partie analogique unique.

En réception, le terminal réalise les étapes inverses : les signaux reçus sur N^{RX} antennes sont démodulés et démappés pour chaque antenne. Puis ils sont combinés en une seule trame, qui est décodée avant d'être transmise à la couche MAC.

Par la suite, nous considérons une communication MIMO, où le même nombre d'antennes est utilisé en transmission et en réception. Nous omettons les notations TX et RX pour des

raisons de lisibilité. Nous supposons aussi que le combineur recopie chaque trame sur toutes les antennes lors de la transmission.

6.1.2 Calcul du Taux d'Erreur Binaire

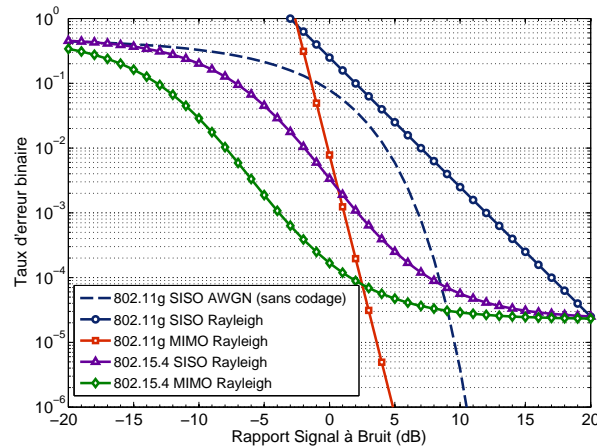


FIGURE 6.2: Évaluation du Taux d'Erreur Binaire en fonction du Rapport Signal à Bruit

Lors de la réception d'un signal, son *Rapport Signal à Bruit* (noté RSB) dépend à la fois de la puissance de réception du signal, des conditions du canal, de son évanouissement et du bruit environnant. L'emploi du multi-antenne permet d'améliorer le RSB grâce à la diversité. Le RSB bénéficie alors d'un gain relatif au nombre d'antennes en transmission et en réception.

En réception, le *Taux d'Erreur Binaire* (noté TEB) représente la proportion de bits erronés reçus. Le TEB est fortement lié au RSB, mais il dépend aussi de la modulation et du codage employés. Il s'exprime sous la forme de fonctions statistiques, qui nécessitent le plus souvent le calcul d'une borne supérieure. Dans les communications mobiles, un TEB inférieur à 10^{-3} est considéré comme correct, avec en moyenne une erreur pour 1 000 bits reçus.

Comparaison du TEB entre MIMO et SISO La Figure 6.2 présente l'évaluation du TEB par rapport au RSB pour un canal à évanouissement de Rayleigh. Nous représentons les TEB du 802.15.4 et 802.11g en mono et multi-antenne (MIMO 2x2). Nous représentons aussi le TEB du 802.11g SISO en canal AWGN comme base de comparaison. Plus le TEB est faible, plus le nombre de retransmissions sera faible. Nous remarquons que le TEB d'une communication MIMO est meilleur qu'en SISO. Cette différence se traduit par une courbe plus à gauche, qui représente un taux d'erreur équivalent pour un RSB plus faible. C'est-à-dire que dans des conditions de canal identiques, le MIMO permet d'obtenir un TEB équivalent avec une puissance de transmission réduite.

802.15.4 Nous remarquons que le 802.15.4 offre un TEB intéressant, même lorsque le RSB du signal reçu est faible. Cependant, nous observons un TEB qui tend vers une limite située entre 10^{-4} et 10^{-5} , à partir d'un RSB ≥ 5 dB. Cette limitation est inhérente au protocole choisi. Elle est liée à la fois à la modulation BPSK et au facteur d'étalement. Le 802.15.4 observe donc un bon TEB pour un RSB supérieur à -5 dB.

Pour un TEB de 10^{-3} , la différence entre le MIMO et le SISO est de 6 dB. Cette différence est due à la fois à la diversité (grâce à la combinaison des paquets au niveau du récepteur), mais aussi à la puissance de réception deux fois plus importantes en MIMO. Ainsi, nous observons une puissance de réception jusqu'à quatre fois plus importante en MIMO pour un paquet de données, d'où les 6 dB.

802.11g En 802.11g, nous prenons le TEB d'un signal transmis sans codage dans un canal AWGN comme comparaison. Par rapport au signal sans codage, le TEB d'un signal 802.11g dans un canal à évanouissement de Rayleigh s'éloigne de cette référence quand le RSB augmente. Cependant, nous observons que le TEB est inférieur à 10^{-3} pour un RSB ≥ 12 dB. En MIMO, le RSB devient très rapidement plus intéressant que la courbe de référence. Par rapport à cette dernière, nous observons un TEB similaire pour un gain de 6 dB. Cette différence est due aux mêmes facteurs que pour le 802.15.4 : une puissance de réception doublée, et une diversité qui permet de combiner les paquets à la réception. De plus, le codage canal des données permet d'augmenter cette diversité, pour atteindre 6 dB de gains sur la courbe de référence, et plus de 10 dB de gains par rapport à une communication SISO dans un canal identique (pour un TEB $\geq 10^{-3}$).

6.1.3 Énergie numérique

Lorsqu'un terminal est multi-antenne, l'énergie numérique de τ pour un mode m_j , $E_{\text{num}}(m_j)$, se décompose de la façon suivante :

$$E_{\text{num}}(m_j) = E_{\text{codage}}(m_j) + N_j \cdot (E_{\text{comb}}(m_j) + E_{\text{bb_dsp}}(m_j)) \quad (6.1)$$

avec $N_j \geq 1$ le nombre d'antennes utilisées par τ dans le mode m_j , $E_{\text{codage}}(m_j)$ la consommation d'énergie due aux opérations de bande de base (à gauche du combineur sur la Figure 6.1), $E_{\text{comb}}(m_j)$ la consommation d'énergie due au combineur utilisé pour les communications multi-antenne, et $E_{\text{bb_dsp}}(m_j)$ la consommation d'énergie de la bande de base et des traitements du signal situés à droite du combineur sur la Figure 6.1).

Comme précédemment, la consommation d'énergie numérique dépend à la fois de l'architecture du processeur et de l'implémentation des algorithmes. L'énergie numérique est toujours évaluée en Joule par bit, pour les mêmes raisons que précédemment.

6.1.4 Énergie radio

De la même manière, la consommation d'énergie radio de τ pour un mode m_j , notée $E_{\text{rf}}(m_j)$, dépend du nombre d'antennes utilisées. Elle s'exprime comme suit :

$$E_{\text{rf}}(m_j) = N_j \cdot \frac{1}{R_j} (P_{\text{frontend}}(m_j) + \theta P_{\text{out}}(m_j)) \quad (6.2)$$

avec $N_j \geq 1$ le nombre d'antennes utilisées par τ dans le mode m_j , $P_{\text{frontend}}(m_j)$ la puissance du frontal radio-fréquence (en Watt), en fonction des spécifications du constructeur, $P_{\text{out}}(m_j)$ la puissance de transmission (en Watt), R_j le débit des données d'un mode m_j (en bit par seconde), et $\theta = 1$ qui définit la transmission (0 autrement).

Pour un terminal multi-antenne, l'utilisation d'un modèle d'énergie implique d'identifier les opérations réalisées pour chaque antenne de celles réalisées une seule fois.

6.2 Intégration du multi-antenne dans un simulateur réseau

Nous rappelons que le multi-antenne permet d'améliorer les communications grâce à la diversité. Cependant, son intégration dans un simulateur réseau nécessite de modifier plusieurs paramètres. Dans cette section, nous expliquons les différentes étapes à prendre en compte lors de la réalisation d'un simulateur multi-mode. Puis, nous présentons les modifications apportées à WSNNet afin d'y implémenter le multi-antenne.

6.2.1 Communications et nœuds multi-antenne

Dans une communication multi-antenne, chaque antenne transmet un signal. Cependant, une communication multi-antenne ne peut être considérée comme la simple somme de plusieurs communications mono-antenne. C'est pourquoi, un simulateur réseau multi-antenne doit prendre en compte certaines problématiques, que nous présentons ci-dessous.

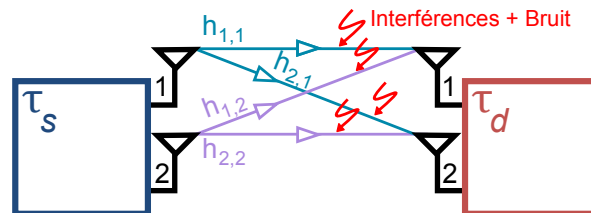


FIGURE 6.3: Canaux indépendants dans une communication multi-antenne

Indépendance des canaux de communication La Figure 6.3 présente les différents canaux utilisés au cours d'une communication multi-antenne. En effet, une communication multi-antenne est composée de plusieurs signaux indépendants. Chaque signal est transmis dans un

6 Réduction d'énergie grâce au multi-antenne

canal indépendant, représenté ici par $h_{j,i}$. Ainsi, le signal reçu sera de la forme $y = Hx + b$, avec x et y les vecteurs représentant respectivement le signal transmis et reçu, H la matrice du canal, et b le vecteur représentant le bruit.

Lors d'une communication multi-antenne, un simulateur réseau doit séparer ces différents canaux afin d'appliquer des conditions de canal indépendantes aux paquets multi-antenne. De plus, il est nécessaire de réceptionner tous les paquets multi-antenne sur chaque antenne, puis de les combiner pour bénéficier de la diversité.

Rejet d'interférences Le multi-antenne permet de réduire les interférences grâce à la diversité. En effet, lorsqu'un signal est transmis sur un canal, tout autre signal présent sur le même canal est considéré comme une interférence. En multi-antenne, la réception de plusieurs paquets corrélés permet de réduire l'influence de ces signaux interférents grâce à la diversité.

Au sein d'un simulateur réseau, l'implémentation du multi-antenne doit bien distinguer les interférents des signaux apportant de l'information.

6.2.2 Communication multi-antenne dans WSN

Dans cette partie, nous présentons les modifications effectuées au sein de WSN pour intégrer le multi-antenne. Nous mettons l'accent sur les modifications apportées aux méta-données des paquets, ainsi qu'au niveau de la couche physique. Nous justifions notre choix de duplication des paquets.

6.2.2.1 Méta-données

L'implémentation du multi-antenne dans WSN nécessite l'ajout de nouvelles méta-données. Par rapport à la section 5.3.2.3, nous ajoutons les méta-données suivantes :

- Le nombre d'antennes de l'émetteur.
- L'antenne utilisée en transmission.
- L'antenne utilisée en réception.
- L'identifiant de la trame originale en provenance de la couche MAC.

Lors d'une transmission multi-antenne, chaque trame contient des informations. Or, WSN utilise un numéro d'identification unique pour chaque trame, et traite les trames reçues les unes à la suite des autres. Afin de simuler la diversité inhérente au multi-antenne, nous modifions le simulateur pour recevoir les différentes trames d'une même transmission multi-antenne. Pour cela, nous enregistrons l'identifiant de la trame originale au sein des méta-données de tout paquet transmis, ainsi que le nombre d'antennes de l'émetteur, et l'antenne utilisée pour la transmission du paquet. Afin de profiter de la diversité en réception, nous stockons le numéro de l'antenne utilisée en réception. Nous combinons alors toutes ces méta-données pour remplir la matrice de réception, de dimension $N^{TX}N^{RX}$.

Une fois ce processus réalisé, WSNet combine les trames reçues et évalue le RSB de la trame multi-antenne comme le RSB moyen des trames reçues. Puis WSNet évalue le TEB de la trame décodée et décide de sa transmission au niveau MAC en fonction d'un modèle à seuil.

6.2.2.2 Réplication des données

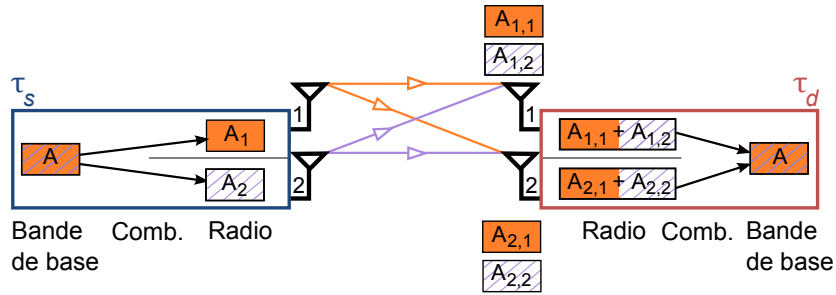


FIGURE 6.4: Exemple de réplique des données sous WSNet pour une communication MIMO 2x2 antennes

Dans ce travail, nous considérons des communications multi-antenne MIMO, où le nombre d'antennes est identique en transmission et en réception ($N^{\text{TX}} = N^{\text{RX}}$). Chaque terminal possède $N^{[\text{TX},\text{RX}]}$ antennes distinctes, et chaque antenne est associée à un frontal radio-fréquence. Lors de la transmission, les trames sont dupliquées par le combineur MIMO, par simple copie. La puissance de transmission, P_{out} , est répartie équitablement entre les différentes antennes. De la même manière que précédemment, P_{out} s'adapte aux conditions de canal et à la sensibilité de réception.

La Figure 6.4 décrit un exemple de réplique des données sous WSNet, lors d'une communication MIMO 2x2 (2 antennes en transmission et 2 antennes en réception). Un terminal τ_s communique avec un terminal τ_d en MIMO. Lorsque τ_s transmet une trame A , le combineur la réplique sur ses deux antennes. Chaque trame transmise est alors notée A_i , où i représente l'antenne en transmission.

Dans le cas du MIMO, une trame transmise est reçue par chaque antenne. Ainsi, le récepteur bénéficie d'un maximum de diversité. Dans cet exemple, les trames A_i reçues sur l'antenne j de τ_d sont notées $A_{j,i}$. Pour une communication MIMO 2x2, le récepteur reçoit donc quatre trames. Grâce à l'identifiant de la trame originale, stocké dans les méta-données, WSNet peut alors évaluer le RSB moyen. Puis, le TEB est calculé après que le combineur ait reconstitué la trame MAC à partir des différents signaux MIMO.

6.2.2.3 Gestion des interférences

La Figure 6.5 présente la matrice fixe utilisée par WSNet pour la gestion des interférences,

6 Réduction d'énergie grâce au multi-antenne

$i \backslash j$	C_1	C_2	C_k	C_z
C_1	1			
C_2	$\delta_{i,j}$	1		
C_k			1	
C_z				1

FIGURE 6.5: Matrice des interférences sous WSNNet

pour différents canaux utilisés en transmission. La gestion d'interférences se présente sous la forme d'une matrice d'interaction entre les canaux, qui définit un facteur $\delta_{i,j}$ représentant l'influence d'un canal C_i sur un canal C_j .

Au cours de la simulation, WSNNet calcule les interférences pour chaque paquet, en fonction de cette matrice et des autres paquets présents sur le canal au même instant. Ce calcul des interférences est réalisé lors de la propagation du paquet vers un nœud donné.

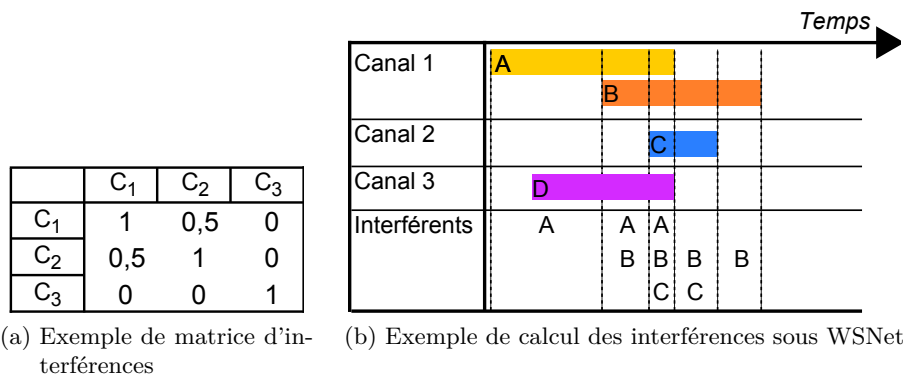


FIGURE 6.6: Gestion des interférences sous WSNNet

Exemple de calcul des interférences La Figure 6.6 représente un exemple de gestion des interférences sous WSNNet. La Figure 6.6(a) décrit un exemple de matrice des interférences sur trois canaux : C_1 et C_2 sont liés par un facteur d'interférence $\delta_{1,2} = 0,5$ et C_3 leur est totalement indépendant.

La Figure 6.6(b) présente un exemple de transmission de paquets au cours du temps. Pour chaque canal, WSNNet calcule le niveau d'interférences subies par un paquet à partir de la puissance des autres paquets, présents sur les canaux interférents, à un instant donné. La durée du chevauchement entre plusieurs paquets est déterminante dans le calcul du niveau moyen des interférences subies par les paquets concernés. De plus, WSNNet ajoute le niveau de bruit ambiant à ce niveau d'interférences moyen.

En MIMO, il est important que les paquets MIMO ne soient pas considérés comme des interférences, mais bien comme de l'information complémentaire. Pour cela, WSNNet utilise les méta-données des paquets reçus pour reconstituer la matrice du canal à la réception :

le numéro de paquet original et l'antenne utilisée en transmission. Puis, le simulateur applique un traitement qui réduit le niveau moyen des interférences, ce qui a pour conséquence d'augmenter le RSB moyen de la trame recombinaée.

6.3 Étude de la consommation d'énergie d'un lien multi-antenne

Dans cette section, nous évaluons l'impact du multi-antenne sur la consommation d'énergie des modes étudiés, pour un lien de communication.

6.3.1 Prise en compte des retransmissions

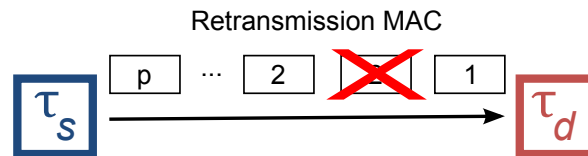


FIGURE 6.7: Retransmission MAC entre deux terminaux τ_s et τ_d

Les retransmissions jouent un rôle important dans l'évaluation de la consommation d'énergie. Comme présenté à la Figure 6.7, une trame retransmise par τ_s a d'abord été transmise une première fois, mais τ_d ne l'a pas reçue correctement. La cause principale provient d'un RSB trop bas, ce qui engendre une retransmission MAC. Cependant, τ_d aura effectué les traitements radio (et éventuellement numériques), ce qui consomme de l'énergie.

Par rapport aux communications SISO, le multi-antenne améliore les conditions de réception, avec un RSB plus élevé à distance égale. La conséquence directe est une diminution du nombre de retransmissions. Il est donc important de considérer les retransmissions pour évaluer la consommation d'énergie du MIMO et du SISO. De ce fait, les simulations sont réalisées en tenant compte des retransmissions, ce qui explique la différence d'allure des courbes présentées dans ce chapitre.

6.3.2 Comparaison entre le multi-antenne et le mono-antenne

Cette partie compare les résultats de consommation obtenus en multi-antenne MIMO 2x2, par rapport à une communication mono-antenne, pour un lien simple. Elle présente les résultats dans un canal à évanouissement de Rayleigh, en prenant en compte les retransmissions. Les caractéristiques énergétiques des terminaux utilisés sont rappelées dans le Tableau 6.1. La consommation numérique est évaluée pour un processeur ARM 968E-S [211] en fonction du nombre d'opérations pour un bit de données, comme présenté à la section 4.1.3. La consommation radio dépend de la puissance des architectures présentées dans [212] en 802.11g et dans [213] en 802.15.4.

6 Réduction d'énergie grâce au multi-antenne

TABLE 6.1: Rappel des paramètres énergétiques des terminaux pour les modes choisis

	802.11g		802.15.4	
	TX	RX	TX	RX
E_{cpu} (nJ/bit)	0,14		0,14	
P_{frontend} (mW)	338	198,8	1	1

Le nombre d'opérations par bit d'une couche physique MIMO dépend du nombre d'antennes ainsi que de l'algorithme utilisé pour la combinaison. Dans cette partie, nous considérons une transmission utilisant un codage d'Alamouti, et une réception utilisant l'algorithme MMSE (*Minimum Mean Square Error* ou Minimisation de l'Erreur Quadratique Moyenne) évalué dans [216]. Le Tableau 6.2 présente le nombre d'opérations par bit pour la couche physique d'un terminal MIMO à 2 antennes, pour des communications en 802.11g à 6 Mbps et en 802.15.4 à 20 kbps. De plus, la consommation d'énergie de ces différents blocs est présentée dans le Tableau 6.3, en fonction des valeurs évaluées ci-dessus et des équations (3.2) et (6.1). À noter que $E_{\text{bb_dsp}}$ dépend du nombre d'antennes et que $E_{\text{comb}} = 0$ en SISO.

TABLE 6.2: Nombre d'opérations par bits pour une couche physique MIMO à 2 antennes

	802.11g		802.15.4	
	TX	RX	TX	RX
Codage	103	184	19	19
Combineur	3	4	15	20
Bande de base et Traitement du signal	2×205	2×3386	2×75	2×2675

TABLE 6.3: Consommation numérique pour un terminal MIMO à 2 antennes (nJ/bit)

	802.11g		802.15.4	
	TX	RX	TX	RX
E_{codage}	14,4	25,8	2,7	2,7
E_{comb}	0,4	0,6	2,1	2,8
$E_{\text{bb_dsp}}$	$2 \times 28,7$	$2 \times 474,4$	$2 \times 10,5$	$2 \times 374,8$

La Figure 6.8 présente les résultats de simulation WSNNet pour un terminal mobile sur un lien de communication. Elle compare la consommation d'énergie d'un bit, en mono-antenne et en multi-antenne. Les caractéristiques du terminal et les canaux de communication sont identiques à ce qui a été présenté plus haut. Ces résultats prennent en compte les retransmissions de paquets.

Comparaison MIMO avec SISO Nous remarquons tout d'abord que la consommation des communications multi-antenne augmente à une distance plus importante que la consommation des liens SISO. Comme nous l'avons expliqué auparavant, l'utilisation de plusieurs antennes permet d'augmenter la distance de communication, pour une qualité de signal équivalente. Cette propriété des communications MIMO se répercute sur la consommation d'énergie d'un

6.3 Étude de la consommation d'énergie d'un lien multi-antenne

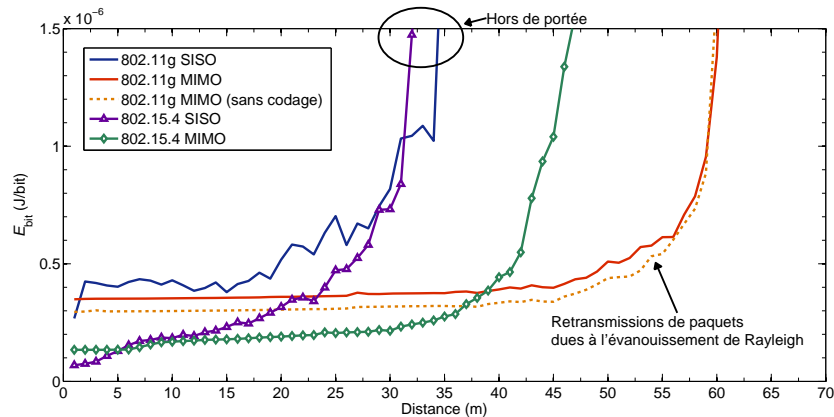


FIGURE 6.8: Consommation d'un terminal sur un lien de communication MIMO dans les modes étudiés

terminal par un nombre de retransmissions plus faible qu'en SISO. Les liens MIMO sont alors plus efficaces à grande distance. De plus, la limite de portée des transmissions SISO est atteinte après une trentaine de mètres.

En effet, les communications SISO tendent à voir ce nombre de retransmissions augmenter très rapidement dans un canal à évanouissement de Rayleigh. Nous observons très nettement une consommation d'énergie qui explose en SISO, du fait des multiples retransmissions de paquets à partir d'une distance proche des 30 m. Cependant, le 802.15.4 en SISO a la meilleure consommation pour des distances inférieures à 5 m, à cause du surcoût de l'architecture multi-antenne.

Impact du codage Nous montrons aussi que le codage n'a que peu d'impact sur la consommation d'énergie d'une communication MIMO. Bien que nous constatons un faible gain à grande distance, il reste négligeable du fait que les simulations n'introduisent pas d'erreur au niveau du paquet. La consommation 802.11g en MIMO est alors similaire, avec ou sans codage. Nous ne représentons pas les résultats du signal 802.11g en SISO sans codage, dont la consommation est très importante à cause d'un TEB élevé (dû à notre calcul du RSB).

Ces résultats dénotent un gain de consommation du 802.15.4 par rapport aux communications 802.11g pour transmettre un bit à des distances inférieures à 40 m. Pour des distances situées entre 40 et 50 m, il est plus intéressant d'utiliser un lien MIMO 802.11g, grâce à sa plus grande portée et son plus petit ratio de paquets perdus. Quant aux communications SISO, elles ne sont pas vraiment intéressantes à cause des retransmissions, sauf pour le 802.15.4 à très faible distance (moins de 5 m).

6.4 Réduction de l'énergie du réseau grâce à un relais multi-antenne multi-mode

Dans cette section, nous réalisons des simulations WSNet pour déterminer les gains d'un relais multi-antenne et multi-mode sur la consommation d'énergie. Puis, nous évaluons l'impact de deux stratégies d'adaptation pour réduire cette consommation.

6.4.1 Rappel des scénarios

Pour plus de clarté, nous rappelons les scénarios étudiés. Au sein de chaque scénario, un point d'accès (AP), sans contrainte d'énergie, fournit un accès Internet à des utilisateurs de terminaux mobiles, multi-mode et multi-antenne. Nous distinguons l'utilisateur principal, noté PU, des utilisateurs secondaires, notés SUs.

Nous comparons la consommation d'énergie des scénarios suivants :

- S_{direct} , avec un PU et u SUs qui communiquent directement avec l'AP,
- S_{relay} , avec un PU qui relaye jusqu'à u SUs sur des connexions dédiées.

Dans chaque scénario, le PU se déplace de l'AP vers les SUs. Si $u > 1$, les différents SUs sont placés sur un cercle centré à mi-distance entre l'AP et la distance maximale ($d_{\text{AP-PU}} = 30$ m). Le centre du cercle est donc placé à $d_{\text{AP-PU}} = 15$ m.

Les terminaux PU et SUs envoient des données vers AP à intervalle régulier. La taille de ces données est de $b_0 = 500$ octets, auxquelles sont ajoutées différents en-têtes. Les communications s'effectuent suivant une connexion en point-à-point. De plus, les terminaux MIMO dupliquent les trames MAC sur toutes leurs antennes.

La puissance de transmission des terminaux, P_{out} , est adaptée en fonction des conditions de canal pour tous les paquets (y compris les paquets de contrôle). De plus, P_{out} est réparti uniformément sur toutes les antennes, ce qui induit une puissance rayonnée identique en MIMO et en SISO. Les canaux de communication sont indépendants, avec un modèle d'atténuation ITU-R avec 3 murs en 802.11g, et un modèle de Friis avec un exposant d'atténuation de 3,1 en 802.15.4. Chaque canal subit un évanouissement de Rayleigh, lui aussi indépendant.

En réception, les trames sont reçues et combinées. Leur TEB est calculé en fonction du RSB, suivant les équations présentées à la section 6.1.2. Lorsque le TEB est inférieur à un seuil, une retransmission MAC se produit.

6.4.2 Consommation d'un relais multi-antenne multi-mode

Nous évaluons maintenant E_{global} pour les scénarios de relais S_{relay} en multi-mode 802.15.4-vers-802.11g, pour le relais mono-mode S_{relay} en 802.11g-vers-802.11g, et pour le scénario des connexions directes S_{direct} en 802.11g, dans le cadre de simulations multi-antenne réalisées sous WSNet. Dans ce but, nous envoyons le même nombre de données à chaque simulation. Au

6.4 Réduction de l'énergie du réseau grâce à un relais multi-antenne multi-mode

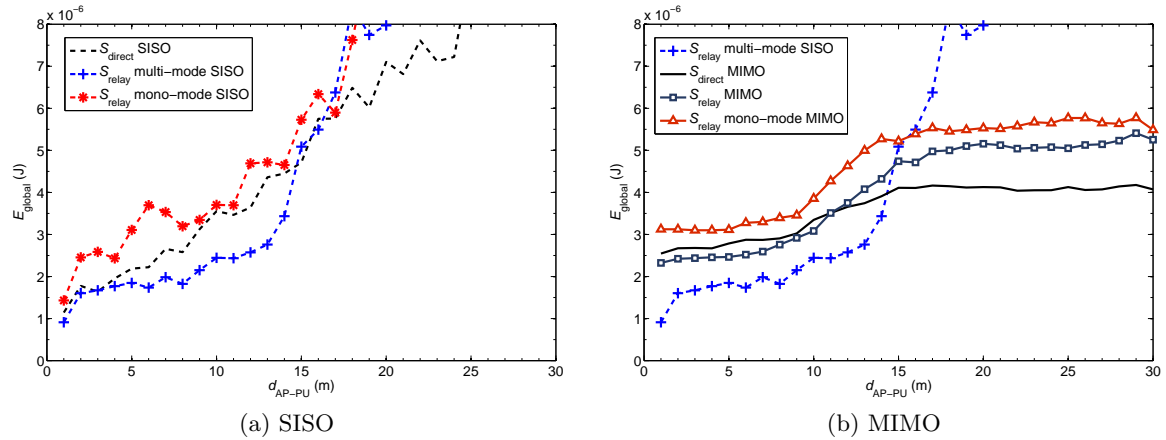


FIGURE 6.9: Comparaison de E_{global} sous WSNnet, en multi-antenne et mono-antenne, pour $u = 1$ SU. L'aspect moins régulier des courbes par rapport à la Figure 5.7 vient de la prise en compte des retransmissions

niveau des terminaux MIMO, les données envoyées sont dupliquées sur chaque antenne suivant un codage d'Alamouti. En réception, les données reçues sont combinées grâce à l'algorithme MMSE présenté dans [216], et dont la complexité est évaluée ci-dessus pour un terminal à deux antennes. Nous tenons compte des retransmissions. Il n'y a aucune interférence extérieure au scénario.

La Figure 6.9 compare la consommation d'énergie des scénarios en multi-antenne et en mono-antenne, suite à des simulations WSNnet. Les résultats présentés prennent en compte les retransmissions dans l'évaluation de E_{global} . Par rapport à la Figure 5.7, la représentation des courbes est différente du fait des retransmissions. En effet, les différentes figures présentées au chapitre 5 ne prennent pas en compte les retransmissions, leur effet sur le comportement global des courbes étant peu visible.

SISO avec retransmissions La Figure 6.9(a) présente les résultats pour des scénarios mono-antenne. Ici, $u = 1$ SU, il n'y a donc pas d'écoutes passives liées aux voisins. Nous remarquons que la consommation d'énergie de tous les scénarios augmente rapidement avec la distance. Ceci provient des retransmissions dues au canal à évanouissement de Rayleigh. Nous remarquons que le « saut » lié aux écoutes passives subsiste à 15 m, mais de façon moins nette que précédemment. Avant ce saut, le relais multi-mode offre une consommation d'énergie jusqu'à 30% plus faible par rapport aux connexions directes. Au contraire, la consommation d'un relais mono-mode demeure entre 10 et 20% plus importante que pour les connexions directes.

Après 15 m, les connexions directes sont privilégiées afin de réduire la consommation globale d'énergie. En effet, les deux scénarios de relais présentent une consommation d'énergie plus importante que les connexions directes. Cet écart de consommation entre les relais et les

6 Réduction d'énergie grâce au multi-antenne

connexions directes s'amplifie avec la distance du fait des retransmissions sur le lien $Dmode$ (entre l'AP et le PU), auxquelles s'ajoute le surcoût de la connexion relayée. De plus, il n'y a pas d'avantage à privilégier un relais multi-mode par rapport à un relais mono-mode d'un strict point de vue énergétique, leur consommation étant équivalente après le saut. Pour des raisons de clarté, nous choisissons de ne pas représenter ces résultats lorsque $d_{AP-PU} > 20$ m.

MIMO avec retransmissions La Figure 6.9(b) présente les résultats de simulation en MIMO, en prenant comme point de comparaison la consommation d'un relais multi-mode mono-antenne. Il est facile d'observer que la consommation d'énergie des scénarios MIMO présente un caractère plus stable à grande distance. Ceci est à mettre en rapport avec les résultats du RSB exprimés à la section 6.1.2.

Nous constatons la supériorité d'un relais multi-mode par rapport à un relais mono-mode MIMO. En effet, la consommation d'énergie d'un relais MIMO multi-mode est entre 10 et 20% plus faible que pour un relais MIMO mono-mode 802.11g. Ce résultat provient de la consommation réduite d'un lien relayé $Rmode$ en 802.15.4 par rapport au 802.11g.

Nous remarquons aussi que le saut lié aux écoutes passives est toujours présent, mais qu'il se produit avant 15 m (entre 10 m et 12 m). Le fait d'utiliser deux antennes en réception augmente la sensibilité de réception du terminal. De ce fait, les écoutes passives se produisent plus rapidement : les SUs subissent alors un surplus d'écoutes passives sur leur interface MIMO 802.11g. C'est un inconvénient majeur dans l'utilisation du MIMO au sein d'un relais. Au niveau du relais multi-mode, nous constatons que l'utilisation d'une seule antenne offre une consommation d'énergie réduite de 30% à 40% par rapport au MIMO lors de distances entre l'AP et le PU inférieures à 15 m ($d_{AP-PU} < 15$ m). Ce comportement est engendré par le surcoût des traitements MIMO. Cependant, cette tendance s'inverse après le saut.

Finalement, il est intéressant de noter la meilleure efficacité énergétique des connexions directes en MIMO après le saut, la consommation d'énergie du relais multi-mode MIMO étant jusqu'à 25% plus grande.

6.4.3 Augmentation du nombre de voisins

Nous étudions maintenant la consommation globale d'énergie des mêmes scénarios pour plusieurs SUs. Cette augmentation du nombre d'utilisateurs secondaires prend en compte les écoutes passives sur toutes les interfaces des SUs. Les paramètres de simulation sont similaires à ceux énoncés à la section 6.4.2.

La Figure 6.10 présente les résultats de simulation pour $u = 3$ et 7 SUs. Nous remarquons que les communications MIMO restent stables dans les distances élevées. De plus, le saut des écoutes passives apparaît toujours avant 15 m en MIMO, à cause de la plus haute sensibilité de réception des terminaux MIMO. Nous constatons aussi que l'écart entre les différentes courbes

6.4 Réduction de l'énergie du réseau grâce à un relais multi-antenne multi-mode

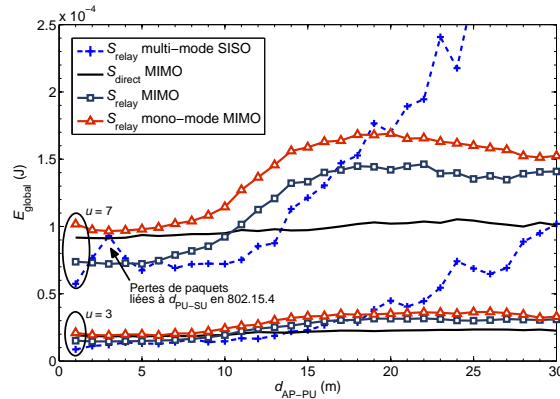


FIGURE 6.10: Comparaison de E_{global} sous WSNnet, en multi-antenne et mono-antenne, pour $u = 3, 7$ SU

augmente avec le nombre de SUs. Cette relation vient des écoutes passives au niveau des SUs : plus les SUs sont nombreux, plus l'énergie liée à ces écoutes passives est importante. Il faut y ajouter les écoutes passives sur l'interface utilisée pour relayer, ce qui augmente encore l'écart en fonction du nombre d'utilisateurs. En effet, la consommation d'énergie est jusqu'à 30 fois plus élevée pour $u = 7$ SUs que dans le cas d'un seul SU. Pour chaque SU supplémentaire, les écoutes passives augmentent de façon exponentielle : un nouveau SU reçoit les signaux 802.15.4 de ses voisins ainsi que les signaux relayés en 802.11g lorsque le PU est à proximité (réciproquement, les autres SUs reçoivent les signaux du nouveau SU). Cependant, les gains observés dans la consommation d'énergie sont similaires au cas $u = 1$ SU.

Comme précédemment, un relais multi-mode SISO est plus intéressant avant 15 m. Après 15 m, les connexions directes MIMO présentent la plus faible consommation d'énergie. Il est alors nécessaire de réfléchir à des stratégies permettant de réduire l'impact de ces écoutes passives en présence d'un relais multi-mode et multi-antenne.

6.4.3.1 Présentation de stratégies d'adaptation

Nous proposons maintenant deux solutions pour minimiser l'impact de l'écoute passive dans les communications MIMO. Dans la première solution, un terminal récepteur utilise une solution de réception à simple antenne pour tous les paquets. La communication suit alors une approche MISO (*Multiple Input, Single Output*). Nous appelons cette solution « écoute passive MISO ». Dans un second temps, nous désactivons l'interface 802.11g au niveau de tous les SUs. Suite à cela, les SUs agissent alors comme des terminaux mono-mode en 802.15.4, et les écoutes passives du 802.11g sont alors supprimées.

Nous étudions ces deux approches pour $u = 1$ SU et $u = 5$ SUs; dans ce dernier cas, les terminaux sont soumis aux écoutes passives sur toutes leurs interfaces (802.11g et 802.15.4). Nous évaluons aussi la consommation de ces deux stratégies combinées. Les scénarios de relais

6 Réduction d'énergie grâce au multi-antenne

considérés dans cette partie sont uniquement multi-mode, l'intérêt d'un relais mono-mode étant nul par rapport à ces derniers.

6.4.3.2 Réduction des écoutes passives grâce au MISO

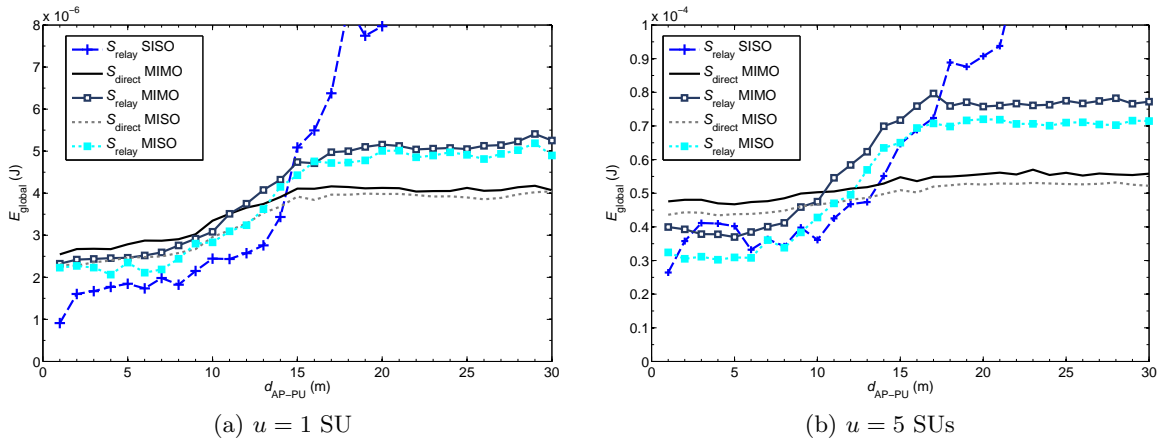


FIGURE 6.11: Comparaison de E_{global} sous WSNet, pour une stratégie d'écoute passive MISO dans les différents scénarios

Lorsqu'un terminal utilise une stratégie d'écoute passive MIMO, il écoute le canal avec une seule antenne, mais en utilise plusieurs pour communiquer. Nous évaluons l'impact de cette stratégie sur la consommation globale d'énergie, en l'appliquant à tous les terminaux, PU et SUs.

La Figure 6.11 présente les résultats de simulations WSNet. Elle détaille la consommation globale d'énergie pour les scénarios suscités, en considérant un et cinq utilisateurs secondaires. La stratégie d'écoute passive MISO est utilisée dans tous les modes de communication.

Pour un seul SU La Figure 6.11(a) étudie la consommation globale pour un seul SU. Il n'y a donc pas d'écoutes passives en 802.15.4. Le saut lié aux écoutes passives 802.11g est toujours présent, même s'il apparaît à $d_{\text{AP-PU}} = 12$ m à cause d'une sensibilité de réception plus faible en MISO. En effet, le « saut » en MISO est décalé de 3 m par rapport au MIMO : cette distance correspond aux 3 dB de sensibilité en moins au niveau d'un récepteur SISO par rapport à un terminal MIMO dans le modèle de canal utilisé (modèle de canal ITU-R en environnement de bureau avec 3 murs).

Pour S_{relay} , la stratégie d'écoute passive MISO permet de gagner environ 5% d'énergie par rapport à un relais uniquement MIMO, indépendamment de la distance. Concernant S_{direct} , la stratégie d'écoute passive MISO apporte 10% de gains en énergie avant le saut, mais uniquement 3% après (car le SU reçoit les transmissions du PU vers l'AP). Ceci montre

6.4 Réduction de l'énergie du réseau grâce à un relais multi-antenne multi-mode

l'importance des écoutes passives sur la consommation d'énergie. De même, le comportement global de S_{relay} vis-à-vis de S_{direct} ne change pas en MISO (5 à 10% de gains pour le relais avant le saut, mais plus de 20% de pertes après).

La consommation d'énergie d'un relais multi-mode MISO est entre 15 et 20% plus élevée qu'en SISO avant le saut. Cependant, la consommation de S_{relay} en SISO a tendance à exploser après le saut, à cause de l'écoute passive combinée aux retransmissions.

Pour plusieurs SUs La Figure 6.11(b) présente la consommation globale d'énergie pour les mêmes scénarios avec $u = 5$ SUs. Les terminaux subissent donc des écoutes passives à la fois en 802.11g et en 802.15.4. La stratégie MISO apporte des gains dans la consommation d'énergie par rapport au relais MIMO, et ce indépendamment de la distance (réduction de 15 à 20% avant le saut, et d'environ 8% après le saut). Nous constatons aussi que le saut existe toujours, à cause des écoutes passives au niveau des SUs. Ce saut est décalé vers la droite pour la même raison que précédemment (sensibilité réduite en MISO par rapport au MIMO).

Lorsque le PU est très proche de l'AP ($d_{\text{AP-PU}} < 5$ m), le lien relais en 802.15.4 est proche de sa limite de transmission. Ainsi, nous constatons que les gains d'un relais MISO sont jusqu'à 20% plus intéressants que S_{relay} en SISO, grâce à un nombre plus faible de retransmissions et un meilleur RSB. Puis la tendance s'inverse jusqu'à ce que le relais SISO soit à son tour « remplacé » par les connexions directes après 15 m. De même, S_{relay} permet de réduire la consommation d'énergie jusqu'à 30% par rapport à S_{direct} MISO avant le saut. Mais la consommation d'énergie de cette solution reste toutefois 35% plus élevée que les connexions directes après le saut. Quant aux gains obtenus en utilisant MISO dans les connexions directes, les résultats sont similaires à ceux exprimés pour $u = 1$ SU : l'utilisation de la stratégie d'écoute passive MISO dans les connexions directes permet de limiter les écoutes passives liées aux autres SUs, ce qui en fait la stratégie la plus économe en énergie après le saut.

Apports de la stratégie MISO La stratégie MISO est donc une stratégie intermédiaire entre le MIMO et le SISO. Elle permet d'une part de réduire l'impact des écoutes passives sur la consommation globale d'énergie, tout en conservant une partie des avantages des communications MIMO. Néanmoins, l'application de cette stratégie aux relais multi-mode n'est que rarement optimale de par sa consommation, principalement à cause des écoutes passives en 802.11g. Ainsi, le MISO est efficace dans de rares cas, comme par exemple lorsque le PU est très proche de l'AP, avec un nombre d'utilisateurs élevé. Le reste du temps, le MISO consomme plus d'énergie que les connexions SISO avant le saut, et que les connexions directes après ce-dit saut. Ainsi, on ne peut pas considérer que les gains en énergie apportés par la stratégie MISO soient très importants par rapport aux consommations engendrées par le MIMO.

6.4.3.3 Désactivation de l'interface inactive

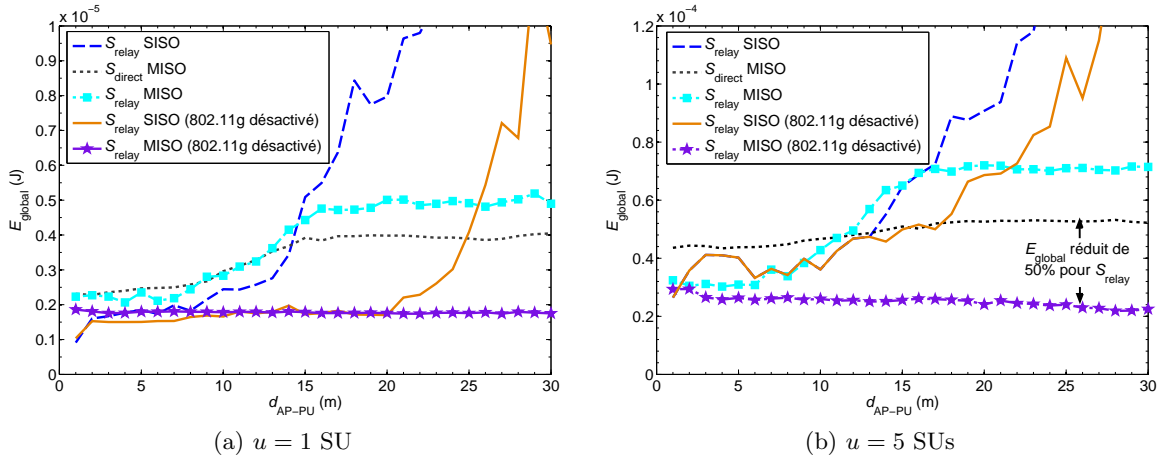


FIGURE 6.12: Comparaison de E_{global} avec la désactivation du 802.11g pour les SUs dans les différents scénarios

Sachant que l'application de la stratégie MISO à un relais multi-mode ne permet pas d'obtenir de bons résultats de consommation, nous désactivons maintenant l'interface 802.11g au niveau des SUs. Cette stratégie supprime les écoutes passives du signal 802.11g. Nous évaluons l'intérêt d'une telle stratégie pour réduire la consommation globale d'énergie en la combinant à une stratégie d'écoute passive MISO.

La Figure 6.12 présente les résultats de simulations WSNNet. Elle détaille la consommation globale d'énergie pour les scénarios suscités, en présence d'un et de cinq utilisateurs secondaires. Dans les scénarios de relais, les interfaces 802.11g des SUs sont désactivées. De plus, la stratégie d'écoute passive MISO est utilisée par les terminaux multi-antenne.

Pour un SU La Figure 6.12(a) présente les résultats de la consommation globale d'énergie pour un seul SU. Il n'y a donc pas d'écoutes passives en 802.15.4. Nous remarquons que la combinaison des deux stratégies permet d'obtenir des gains de consommation élevés dans le cadre des scénarios de relais multi-mode. De plus, le saut lié aux écoutes passives du PU n'existe plus.

Pour S_{relay} multi-mode multi-antenne, la désactivation de l'interface 802.11g (courbe étoilée) montre une consommation d'énergie réduite par rapport à un scénario de relais avec uniquement une stratégie MISO simple (courbe claire avec des carrés). Ainsi, la désactivation de l'interface 802.11g permet de réduire modérément la consommation d'environ 20% avant le saut, et jusqu'à 65% après le saut. En SISO, cette stratégie permet d'améliorer la consommation du relais multi-mode pour des distances jusqu'à 25 m, car les écoutes passives disparaissent. Avant le saut, les gains se situent entre 10 et 20%. Après le saut, la consomma-

6.4 Réduction de l'énergie du réseau grâce à un relais multi-antenne multi-mode

tion est grandement réduite jusqu'à $d_{AP-PU} = 20$ m, avec des gains dépassant les 70% pour $d_{AP-PU} = 17$ m. Au-delà, les conditions de canal rendent le coût des retransmissions trop élevé.

La désactivation de l'interface passive dans les relais MISO et SISO amène des gains non négligeables par rapport à un relais classique. Avant $d_{AP-PU} = 20$ m, les consommations des relais MISO et SISO sont équivalentes lorsque l'interface 802.11g est désactivée : comme il n'y a qu'un seul SU, il n'y a aucune écoute passive. La consommation d'énergie des relais est alors 35 à 40% inférieure à celle des connexions directes MIMO. À grande distance, le relais MISO avec désactivation de l'interface 802.11g est le plus efficace : la consommation globale d'énergie est divisée par deux par rapport aux connexions directes.

Pour plusieurs SUs La Figure 6.12(b) présente les résultats de la consommation globale d'énergie pour $u = 5$ SUs. La désactivation de l'interface 802.11g est toujours combinée au MISO, ce qui permet de réduire les écoutes passives en 802.15.4. Nous remarquons que ces deux stratégies combinées permettent à S_{relay} de consommer moins d'énergie que tous les autres scénarios, et ce, à tout moment. Comme dans le cas avec un seul SU, la consommation d'énergie est deux fois plus efficace que dans les connexions directes, et trois fois meilleure qu'un relais MIMO classique lorsque le PU est loin de l'AP.

L'utilisation de cette stratégie au niveau d'un relais SISO n'apporte pas d'avantage à cause des retransmissions du 802.15.4 à grande distance. Néanmoins, le comportement global reste similaire au cas avec $u = 1$ SU, par rapport un relais SISO classique.

La combinaison de ces deux stratégies permet de réduire considérablement la consommation d'énergie dans le cadre d'un relais multi-antenne et multi-mode. Cependant, cette solution reste soumise aux contraintes énoncées à la section 5.5.

6.4.4 Prise en compte des interférences

Dans cette partie, nous évaluons la consommation d'énergie d'un relais multi-antenne et multi-mode en présence d'interférences. Après une définition du modèle d'interférences utilisé dans les simulations, nous montrons qu'un relais multi-mode et multi-antenne offre une possibilité intéressante de réduire la consommation d'énergie dans un régime d'interférences.

6.4.4.1 Présentation du modèle d'interférences

Définition Nous définissons une *interférence* comme tout signal analogique parasite influant sur la structure d'un signal reçu au cours de son trajet d'une source vers une destination.

Une interférence est donc un signal présent sur une fréquence qui influe directement sur la propagation d'un autre signal, au moment de la transmission de ce dernier. Ainsi, une interférence possède une composante en temps et en fréquence, mais aussi en espace.

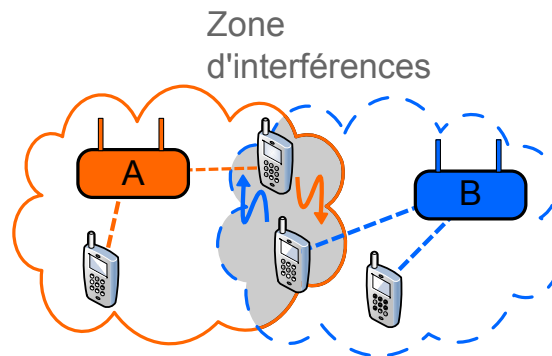


FIGURE 6.13: Zone d'interférences entre deux réseaux A et B

La Figure 6.13 schématise les interférences subies par deux réseaux, A et B, communiquants sur des fréquences interférentes. La « zone d'interférences » caractérise l'aire d'influence des signaux d'un réseau sur l'autre. Ces deux réseaux agissent donc comme interférents réciproques au sein de cette zone d'interférences. Ainsi, les signaux transmis et reçus par les terminaux du réseau A sont influencés par les signaux transmis et reçus par les terminaux du réseau B au sein de cette zone d'interférences, et vice-versa.

Une interférence se caractérise alors par l'augmentation du niveau de bruit au niveau d'un récepteur. Par conséquent, la probabilité d'erreur augmente, de même que les retransmissions. De plus, l'augmentation de la puissance de transmission a pour effet d'augmenter le niveau d'interférences : ce n'est donc pas une solution pour lutter contre les interférences. En effet, si les interférents augmentent leur puissance de transmission de manière réciproque, il en résulte une augmentation du niveau de bruit général et de la consommation d'énergie. Il est donc nécessaire d'utiliser des techniques de réduction d'interférences. Grâce à la diversité, l'utilisation du multi-antenne offre une solution intéressante dans la minimisation des interférences.

Implémentation des interférents dans les simulations WSN Dans WSN, les interférences sont évaluées selon la méthode présentée à la section 6.2.2.3. Ainsi, les signaux interférents sont pris en compte comme du bruit. Nous rappelons que sous WSN, le niveau de bruit auquel est soumis un paquet est stocké au sein de ses méta-données.

Afin de faciliter notre étude, nous implémentons un interférent sous WSN comme un terminal diffusant en continu (*broadcast*) sur un canal donné. Les signaux du terminal interférent sont transmis sur un canal dédié, et sont soumis à un modèle de propagation. Au cours de leur trajet, ce signal interfère avec les signaux des canaux concernés, suivant la matrice d'interférences. Il est possible de réguler le niveau des interférences de deux façons : tout d'abord en variant le facteur d'interférences entre les différents canaux au sein de la matrice d'interférences, puis en limitant la puissance de transmission du terminal interférent.

6.4.4.2 Consommation d'énergie en présence d'interférences

Nous évaluons maintenant la consommation d'un relais multi-mode et multi-antenne en présence d'interférences grâce à des simulations sous WSNNet. Les scénarios étudiés ainsi que les caractéristiques des terminaux sont identiques à ceux présentés précédemment.

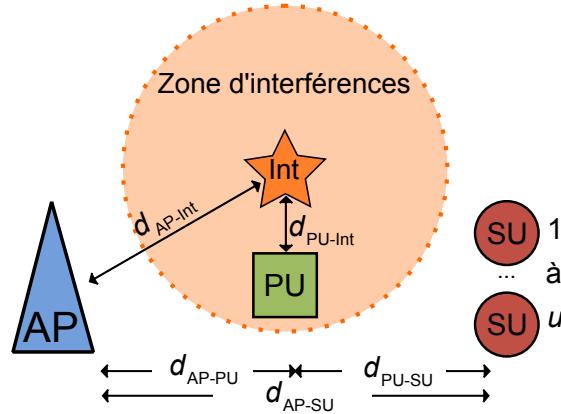


FIGURE 6.14: Représentation schématique du scénario avec interférences sous WSNNet

Présentation du scénario avec interférences Afin de simuler les interférences, nous créons un terminal interférent, noté Int, qui diffuse un signal de manière continue, sur une fréquence donnée avec une puissance fixe. Ce terminal est ensuite positionné à proximité des terminaux existants, à d_{AP-Int} de l'AP et d_{PU-Int} du PU, comme présenté à la Figure 6.14. Comme précédemment, le PU se déplace en ligne droite vers u SUs, placés sur un cercle centré à $d_{AP-PU} = 15$ m.

Nous étudions la consommation globale d'énergie pour le scénario S_{relay} , où le PU relaie les u SUs sur u connexions dédiées, et pour le scénario S_{direct} , où les u SUs et le PU sont directement connectés à l'AP. Nous plaçons le terminal Int à $d_{AP-Int} = 18$ m et $d_{PU-Int} = 10$ m. Int émet un signal continu à une puissance $P_{out} = 10$ dBm, sur une fréquence identique à celle du 802.11g (soit 2,4 GHz). Le modèle de propagation suit un modèle ITU-R à 3 murs. Le niveau d'interférences entre le signal émis par Int est alors maximal avec les signaux 802.11g ($\delta_{802.11g,Int} = 1$), et nul avec les signaux 802.15.4. De plus, les signaux émis par Int et reçus par le PU et les SUs ne sont pas décodés.

En fonction des paramètres utilisés, le PU se trouve dans la zone d'interférences à proximité de $d_{AP-PU} = 15$ m. De plus, les différents signaux 802.11g traversant cette zone sont soumis aux interférences de Int.

Simulations WSNNet pour plusieurs SUs Nous évaluons la consommation des scénarios S_{direct} et S_{relay} sous WSNNet. Dans les scénarios étudiés, les terminaux implémentent la stra-

6 Réduction d'énergie grâce au multi-antenne

tégie d'écoute passive MISO. De plus, nous évaluons la consommation d'énergie d'un relais multi-mode où les SUs désactivent leur interface inactive. Comme précédemment, tous les terminaux ainsi que l'AP adaptent leur puissance d'émission en fonction des conditions de canal.

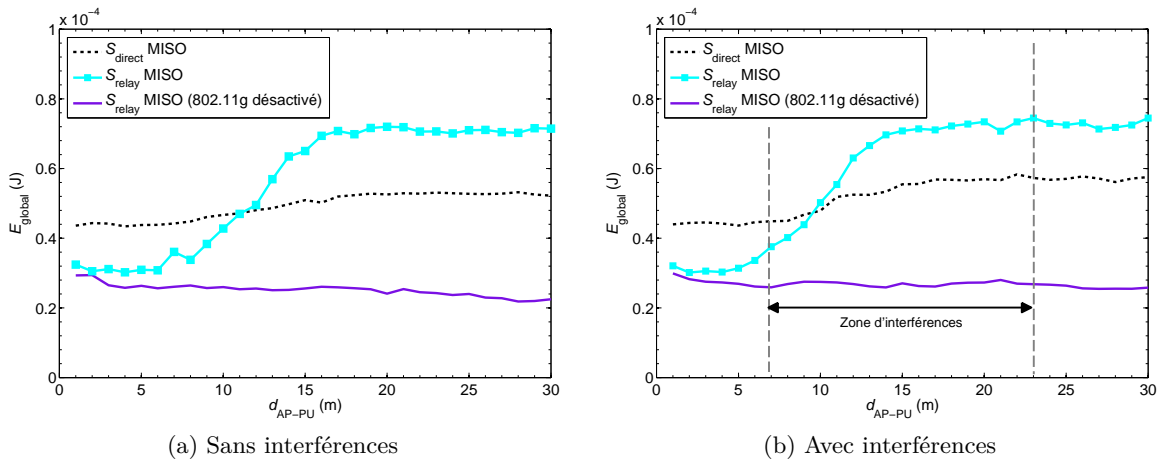


FIGURE 6.15: Comparaison de E_{global} avec et sans interférences pour $u = 5$ SUs

La Figure 6.15 présente les résultats de simulation WSNNet. La Figure 6.15(b) évalue la consommation globale d'énergie en présence d'interférences pour $u = 5$ SUs. Les interférences augmentent le niveau de bruit en 802.11g, ce qui revient à augmenter la probabilité d'erreur en réception, et donc la consommation liée aux retransmissions.

Avant le saut, nous observons que la consommation de tous les scénarios est équivalente aux résultats sans interférences présentés à la Figure 6.15(a). Dans le cadre des connexions directes, les signaux transmis par les SUs ne subissent pas tellement les interférences de Int, du fait de la puissance de transmission élevée au niveau des SUs (par rapport au niveau de bruit dans la zone d'interférences). Comme précédemment, l'utilisation d'un relais MISO demeure plus économe en énergie lorsque le PU est proche de l'AP.

Lorsque le PU se déplace au sein de la zone d'interférences, l'augmentation de la consommation globale d'énergie est plus rapide que dans les simulations sans interférences. En effet, PU et AP ne prennent pas en compte le niveau d'interférences dans l'adaptation de leur puissance de transmission. Ainsi, les données du lien AP-PU ont un risque plus élevé de ne pouvoir être décodées correctement. Sachant que la présence des interférences augmente le bruit subi par ces signaux, le nombre moyen de retransmissions augmente entre le PU et l'AP. Cependant, ce nombre reste faible, la consommation de S_{relay} utilisant les deux stratégies n'augmentant pas visiblement. Ainsi, le fait que le saut se produise plus rapidement en présence d'interférences ne peut être totalement attribué à ces dernières. Il faut aussi considérer l'évanouissement du canal, qui peut entraîner des écoutes passives au niveau des SUs.

6.4 Réduction de l'énergie du réseau grâce à un relais multi-antenne multi-mode

Au delà de la zone d'interférences, la consommation de S_{relay} MISO devient plus importante que pour les connexions directes, comme observé précédemment. Ce comportement est toujours lié aux écoutes passives. En effet, les interférences subies par le PU engendrent des retransmissions qui sont reçues passivement par les SUs. Cet effet est toutefois minimisé de par l'utilisation de la stratégie d'écoute passive MISO. Cependant, la consommation d'énergie de S_{relay} est 30% plus élevée que pour S_{direct} , ce qui reste toutefois plus faible que les 35% rencontrés précédemment (sans interférences). Ce phénomène est dû au fait que les connexions 802.15.4 ne sont pas soumises aux interférences.

À noter que dans les simulations réalisées, le signal émis par le PU et les SUs est suffisamment fort pour garantir le bon déroulement de la communication, même après quelques retransmissions. Toutefois, il est possible de brouiller totalement les communications en augmentant le niveau d'interférences généré par Int.

6.4.4.3 Discussion

Suite aux simulations, nous observons que l'utilisation d'un relais multi-mode et multi-antenne permet de réduire la consommation d'énergie en présence d'interférences lorsque les terminaux utilisent des stratégies appropriées. Le niveau d'interférences dépend à la fois de la position du terminal et de la puissance d'émission des terminaux interférents. Plus ce niveau d'interférences est élevé, plus la probabilité de retransmission augmente.

Lorsque le PU se trouve dans la zone d'interférences, nous avons vu que l'adaptation de la puissance de transmission augmente le nombre de retransmissions. Ainsi, il peut être intéressant de dégager un compromis entre la prise en compte du niveau d'interférences dans l'adaptation de la puissance d'émission (au risque d'augmenter les interférences) et la retransmissions de quelques paquets, le tout dans le but de réduire la consommation d'énergie.

Lors d'une communication, la probabilité de subir des interférences dépend à la fois du mode utilisé pour cette communication et des modes utilisés par les réseaux à proximité. L'utilisation d'une radio logicielle offre la possibilité d'intégrer ces paramètres lors du choix du mode; c'est le principe de la radio cognitive. Ainsi, un terminal est capable de réduire sa consommation d'énergie en fonction de sa position en choisissant d'être relayé ou de se connecter directement à un point d'accès. Si le terminal se trouve dans une zone d'interférences, il aura tout intérêt à chercher un relais dans un autre mode. De plus, si un relais se trouve proche d'utilisateurs relayés en présence d'interférences, les connexions directes permettent de réduire la consommation globale d'énergie (si tant est que le niveau d'interférences est faible). Néanmoins, il reste clair qu'en présence d'interférences, le changement de mode entraîne une réduction de la consommation d'énergie en minimisant le nombre de retransmissions. Finalement, la décision d'utiliser ou non un relais multi-mode et multi-antenne offre une possibilité supplémentaire dans la réduction d'énergie en fonction de l'environnement.

Conclusion

7.1	Synthèse	125
7.2	Perspectives	127
7.2.1	Perspectives à court terme	127
7.2.2	Proposition d'algorithmes de reconfiguration d'un terminal	128
7.2.3	Relais coopératif	128
7.2.4	Les évolutions futures des terminaux	129

7.1 Synthèse

Il est maintenant acquis que les communications modernes nécessitent de réduire la consommation d'énergie. Nous avons montré que l'évolution actuelle des terminaux rend possible les communications sur plusieurs standards. Grâce à cette propriété multi-mode, les terminaux modernes sont capables de réduire leur consommation en communiquant sur le mode le plus efficace en énergie. Combiné avec l'utilisation d'un relais, il devient possible de réduire la consommation globale du réseau.

Modèle d'énergie pour une radio logicielle multi-mode Dans cette thèse, nous avons étudié des terminaux basés sur le principe de la radio logicielle. La radio logicielle permet d'implémenter aisément le multi-mode, grâce à des blocs programmables. De ce fait, la consommation d'énergie est divisée entre la partie numérique et la partie radio.

Afin d'évaluer l'intérêt du multi-mode dans la réduction d'énergie, il est nécessaire de considérer la consommation par bit de chaque mode, et ce dans un but de comparaison. Pour cela, nous avons procédé à une étude de la complexité pour déterminer la consommation d'énergie par bit au sein de chaque mode. Puis, nous avons proposé un modèle d'énergie réaliste pour évaluer la consommation d'un terminal multi-mode, en prenant en compte la couche MAC. Finalement, nous avons comparé la consommation d'énergie d'un relais multi-mode par rapport à des connexions directes suivant des scénarios simples.

7 Conclusion

Développement d'un simulateur réseau Au travers de simulations Matlab, nous avons montré que l'utilisation d'un relais multi-mode n'est pas très intéressante dans le cadre d'un relais 802.11g-vers-UMTS. En effet, la présence d'une « Zone de non-relais » rend négligeable les gains en énergie d'un relais multi-mode, la taille et la position de cette zone dépendant fortement des conditions de canal.

Suite aux simulations Matlab, nous avons énoncé le besoin d'utiliser un simulateur multi-mode pour plus de réalisme. Ainsi, nous avons utilisé WSNNet, un simulateur précis, comme un moyen efficace d'augmenter le réalisme. Nous avons donc implémenté le multi-mode au sein de WSNNet, dans le but d'évaluer la consommation d'énergie de nos scénarios. Nous avons expliqué les points clés dans l'implémentation du multi-mode au sein d'un simulateur réseau : méta-données pour identifier les différents modes et évaluer l'énergie par bit, modèles de canaux propres au multi-mode, prise en compte de la fragmentation.

Relais multi-mode Nous avons réalisé des simulations réseaux sous WSNNet pour évaluer la consommation d'énergie d'un relais 802.15.4-vers-802.11g par rapport à des connexions directes en 802.11g. Ces simulations très précises nous ont permis de montrer que l'utilisation d'un relais multi-mode est soumise à plusieurs contraintes. En effet, la consommation d'énergie d'un tel relais dépend de plusieurs paramètres : les conditions du canal (atténuation et évanouissement), la taille des trames, les paquets de contrôle, les écoutes passives, les retransmissions.

Néanmoins, l'utilisation d'un relais multi-mode demeure une solution moins intéressante qu'envisagée au premier abord. En effet, il est nécessaire d'appliquer des réglages spécifiques aux terminaux dans le but de réduire durablement la consommation d'énergie. Dans ce but, la désactivation de l'interface inactive apporte des gains intéressants.

Le multi-antenne De la même manière, nous avons adapté notre modèle pour évaluer l'énergie d'un terminal multi-antenne. Nous avons simulé cette consommation d'énergie pour plusieurs antennes. Puis, nous avons implémenté le multi-antenne au sein de WSNNet pour évaluer la consommation d'énergie des scénarios étudiés. Nous avons tout d'abord montré l'intérêt des communications MIMO lorsque les retransmissions sont prises en compte. Nous avons proposé des stratégies adaptées pour réduire la consommation d'un réseau grâce à un relais multi-mode et multi-antenne. Nous avons ensuite réalisé des simulations multi-antenne précises en considérant les interférences. En pratique, le multi-antenne apparaît comme une solution intéressante pour réduire la consommation d'énergie en présence d'interférences.

Conclusion générale Au cours de cette thèse, nous avons montré le rôle important de l'énergie numérique dans la consommation d'un terminal radio logicielle, qui dépend à la fois de

l'implémentation logicielle et de l'architecture matérielle. Nous avons choisi de considérer la consommation par bit afin de comparer différents modes sur une base commune.

Grâce à l'utilisation d'un simulateur très précis, nous avons montré que l'utilisation des relais doit être combinée avec des stratégies efficaces, tant au niveau de la couche MAC que de la couche physique. Sans cela, un relais offre des perspectives moins intéressantes que ce qu'on aurait pu penser. Ainsi, la désactivation des interfaces inactive permet à un relais de réduire de moitié la consommation d'énergie par rapport à des communications directes. De plus, un relais multi-antenne permet de minimiser la consommation d'énergie liée aux retransmissions, notamment en présence d'interférences.

Cependant, les résultats présentés dans cette thèse dépendent des hypothèses choisies. En effet, le choix des scénarios joue un rôle important dans l'évaluation de la consommation globale d'énergie, notamment au niveau des écoutes passives. Ainsi, il est possible d'obtenir des résultats différents dans d'autres scénarios.

En conclusion, une radio logicielle multi-mode et multi-antenne offre plusieurs possibilités de configuration. En fonction de ses paramètres, il peut être plus efficace d'utiliser une ou plusieurs antennes, choisir un mode plutôt qu'un autre, de relayer ou d'être relayé par d'autres utilisateurs, etc. La réduction d'énergie n'est pas un problème simple, mais l'utilisation de terminaux qui peuvent s'adapter à différentes situations est un élément clé vers une solution efficace dont les différents paramètres peuvent être évalués avec les outils présentés dans cette thèse. À l'avenir, l'utilisation des relais aura tendance à se généraliser, tant pour réduire les coûts d'implémentation et d'exploitation des réseaux, mais surtout pour offrir aux utilisateurs une connexion permanente et efficace d'un point de vue énergétique. Grâce aux optimisations algorithmiques et matérielles à venir, nous voyons la radio logicielle comme partie intégrante des futurs terminaux. Ces terminaux, efficaces en énergies, utiliseront leurs propriétés multi-mode et multi-antenne pour devenir des briques indéniables, au cœur des réseaux du futur.

7.2 Perspectives

Dans cette section, nous présentons quelques perspectives intéressantes suite à cette thèse.

7.2.1 Perspectives à court terme

Les travaux présentés dans cette thèse sont une première approche vers une réduction de la consommation d'énergie grâce à un relais multi-mode et multi-antenne. Afin de compléter cette étude, il convient de s'intéresser à l'influence du nombre d'antennes sur la consommation d'énergie. En effet, l'utilisation de plusieurs antennes permet de réduire les retransmissions. Cependant, plus le nombre d'antennes est élevé, plus le risque d'augmenter la consommation d'énergie existe. Il est alors important d'évaluer la consommation d'énergie des communi-

7 Conclusion

cations multi-antenne pour un nombre d'antennes variable. Par la suite, il sera possible de déterminer la configuration optimale des terminaux afin de réduire la consommation d'énergie d'un scénario donné.

Dans un réseau moderne, les terminaux peuvent présenter des caractéristiques hétérogènes. Ainsi, certains terminaux peuvent communiquer sur plusieurs antennes, tandis que d'autres ne sont que mono-antenne. Dans ce cas, il est intéressant d'étudier la consommation d'énergie d'un scénario où un terminal multi-antenne agit comme un relais pour des terminaux mono-antennes.

Par la suite, des expérimentations réelles permettront de valider les solutions présentées dans cette thèse. Notamment, dans le cadre du projet FIT (*Future Internet of Things*) [217], qui vise à fournir une plateforme d'implémentation radio logicielle et auquel le laboratoire CITI est rattaché.

7.2.2 Proposition d'algorithmes de reconfiguration d'un terminal

L'utilisation d'une radio logicielle, qui plus est multi-mode et/ou multi-antenne, offre un grand degré de liberté dans l'utilisation de ses caractéristiques. Nous avons montré l'importance de chacun de ces paramètres dans la consommation d'énergie. Un terminal intelligent pourra alors décider de la meilleure configuration à activer lors d'une communication, et ce en fonction de ses besoins et des paramètres extérieurs.

Pour cela, il peut être utile de considérer des métriques de reconfiguration du terminal, en fonction de critères variés. Il est intéressant d'étudier quels peuvent être les compromis entre le prix et l'énergie, le débit et l'énergie, la connectivité et le débit, etc. Ces stratégies d'adaptation devront prendre en compte les contraintes spécifiées à la fois par les utilisateurs et les opérateurs. Le terminal intelligent pourra, par exemple, intégrer des critères de satisfaction afin d'automatiser sa reconfiguration en fonction du contexte.

7.2.3 Relais coopératif

L'utilisation d'un relais multi-mode permet de réduire la consommation d'énergie dans certaines conditions. Cependant, il peut être intéressant de considérer des techniques de coopérations pour, par exemple, mutualiser les ressources. Il serait intéressant d'étudier le comportement d'un relais coopératif, où plusieurs terminaux prennent le rôle de relais, afin de déterminer les critères menant à sélectionner le ou les meilleurs relais d'un point de vue énergétique. De plus, il pourrait être utile d'évaluer l'impact de techniques d'agrégation sur la consommation d'énergie. Ces possibilités s'inscrivent dans une problématique plus large de passage à l'échelle, avec de multiples utilisateurs et la cohabitation de réseaux interférents.

7.2.4 Les évolutions futures des terminaux

Dans un futur proche, les réseaux pourront communiquer sur des plages de fréquences libres, comme le « *white space* ». Ces réseaux peuvent bénéficier des avantages de la reconfiguration des terminaux adaptatifs, en particulier ceux basés sur la radio logicielle. Nous pensons que l'utilisation de relais multi-mode peut constituer une base à ces réseaux du futur. D'une part, les relais multi-mode augmentent les opportunités de connexion, tout en permettant de réduire l'énergie. D'autre part, les relais multi-antenne améliorent la connectivité et le débit. Il est alors intéressant de s'intéresser à l'implémentation de relais multi-mode et/ou multi-antenne, au sein de ces types de réseaux, en imaginant que de telles technologies offriront des solutions intéressantes aux problématiques de débit, d'énergie et de connectivité.

Bibliographie

- [1] IEEE Computer Society, « 802.11g Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer specifications », Juin 2003.
- [2] 3rd Generation Partnership Project, « UMTS Physical layer procedures (TDD) (Release 8) », Mars 2008.
- [3] IEEE Computer Society, « IEEE Std 802.15.4-2006 Part 15.4 : Wireless Medium Access Control and Physical Layer Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) », Septembre 2006.
- [4] N. Reid, *Wireless Mobility : The Why of Wireless*. McGraw-Hill, 2010.
- [5] J. G. Proakis et M. Salehi, *Digital Communications, Fifth Edition*. McGraw Hill, 2008.
- [6] G. Baudoin, *Radiocommunications Numériques - Tome 1, Principes, Modélisation et Simulation, deuxième édition*. Dunod, 2007.
- [7] R. Prasad, *OFDM for wireless communications systems*. Boston Artech House, 2004.
- [8] H. Holma et A. Toskala, *WCDMA for UMTS : HSPA Evolution and LTE, fifth edition*. John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [9] N. Banerjee, M. D. Corner, D. Towsley et B. N. Levine, « Relays, base stations, and meshes : enhancing mobile networks with infrastructure », in *Proceedings of the 14th ACM international conference on Mobile computing and networking (MobiCom '08)*, (San Francisco, California, USA), p. 81 –91, Septembre 2008.
- [10] D. Soldani et S. Dixit, « Wireless relays for broadband access [radio communications series] », *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, p. 58 –66, Mars 2008.
- [11] A. So et B. Liang, « Optimal placement of relay infrastructure in heterogeneous wireless mesh networks by Bender's decomposition », in *Proceedings of the 3rd international conference on Quality of service in heterogeneous wired/wireless networks (QShine '06)*, (Waterloo, Ontario, Canada), Août 2006.
- [12] A. So et B. Liang, « Minimum cost configuration of relay and channel infrastructure in heterogeneous wireless mesh networks », in *Proceedings of the 6th international IFIP-TC6 conference on Ad Hoc and sensor networks, wireless networks, next generation Internet (NETWORKING'07)*, (Atlanta, GA, USA), p. 275 –286, Mai 2007.

Bibliographie

- [13] B. Lin, P.-H. Ho, L.-L. Xie et X. Shen, « Optimal relay station placement in IEEE 802.16j networks », in *Proceedings of the 2007 international conference on Wireless communications and mobile computing (IWCMC '07)*, (Honolulu, Hawaii, USA), p. 25–30, Août 2007.
- [14] M. Conti, A. Passarella et L. Pelusi, « Mobile-relay forwarding in opportunistic networks », in *Chapter in Adaptive Techniques in Wireless Networks (M. Ibnkahla, Editor, CRC Press, 2007)*.
- [15] M. Yu et J. Li, « Is amplify-and-forward practically better than decode-and-forward or vice versa ? », in *Proceedings of the 30th IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '05)*, vol. 3, p. iii/365–iii/368 Vol. 3, Mars 2005.
- [16] M. Souryal et B. Vojcic, « Performance of Amplify-and-Forward and Decode-and-Forward Relaying in Rayleigh Fading with Turbo Codes », in *Proceedings of the 31th IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '05)*, vol. 4, p. IV, Mai 2006.
- [17] K. Gomadam et S. Jafar, « On the Capacity of Memoryless Relay Networks », in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC '06)*, vol. 4, (Istanbul, Turkey), p. 1580–1585, Juin 2006.
- [18] R. Pabst, B. Walke, D. Schultz, P. Herhold, H. Yanikomeroglu, S. Mukherjee, H. Viswanathan, M. Lott, W. Zirwas, M. Dohler, H. Aghvami, D. Falconer et G. Fettweis, « Relay-based deployment concepts for wireless and mobile broadband radio », *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, p. 80–89, Septembre 2004.
- [19] H. Hu, H. Yanikomeroglu, D. Falconer et S. Periyalar, « Range extension without capacity penalty in cellular networks with digital fixed relays », in *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '04)*, vol. 5, (Dallas, Texas, USA), p. 3053–3057, 29 Novembre-3 Décembre 2004.
- [20] D. Cavalcanti, N. Nandiraju, D. Nandiraju, D. P. Agrawal et A. Kumar, « Connectivity opportunity selection in heterogeneous wireless multi-hop networks », *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 4, p. 390–420, Juin 2008.
- [21] J. Chen, L. Clavier, N. Rolland et P.-A. Rolland, « α -stable multiple access interference modelling for amplify-and-forward multihop ad hoc networks », *Electronics Letters*, vol. 46, p. 1160–1162, 5 2010.
- [22] A. Kashyap, S. Khuller et M. Shayman, « Relay Placement for Higher Order Connectivity in Wireless Sensor Networks », in *Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM '06)*, (Barcelona, Spain), p. 1–12, Avril 2006.

- [23] A. Florea et H. Yanikomeroglu, « On the optimal number of hops in infrastructure-based fixed relay networks », in *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '05)*, vol. 6, p. 6 pp. –3247, Décembre 2005.
- [24] P. Herhold, E. Zimmermann et G. Fettweis, « Cooperative multi-hop transmission in wireless networks », *Computer Networks*, vol. 49, no. 3, p. 299 –324, 2005.
- [25] I. Hammerstrom, M. Kuhn et A. Wittneben, « Impact of relay gain allocation on the performance of cooperative diversity networks », in *Proceedings of the 60th IEEE Vehicular Technology Conference Fall (VTC2004-Fall)*, vol. 3, p. 1815 – 1819 Vol. 3, Septembre 2004.
- [26] Y. Liang et G. Kramer, « Capacity Theorems for Cooperative Relay Broadcast Channels », in *Proceedings of the 40th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS '06)*, p. 1719 –1724, Mars 2006.
- [27] Y. Shi, S. Sharma, Y. T. Hou et S. Kompella, « Optimal relay assignment for cooperative communications », in *Proceedings of the 9th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing (MobiHoc '08)*, (Hong Kong, Hong Kong, China), p. 3 –12, 2008.
- [28] J. Hoffmeyer et W. Bonser, « Standards requirements and recommendations development for multiband multimode radio systems », in *Proceedings of MILCOM '97*, vol. 3, p. 1184 –1191 vol.3, Novembre 1997.
- [29] P. Agrawal et D. Famolari, « Mobile computing in next generation wireless networks », in *Proceedings of the 3rd international workshop on Discrete algorithms and methods for mobile computing and communications (DIALM '99)*, (Seattle, Washington, United States), p. 32 –39, 1999.
- [30] A. Silva, J. Guilherme et N. Horta, « Reconfigurable multi-mode sigma-delta modulator for 4G mobile terminals », *Integration, the VLSI Journal*, vol. 42, no. 1, p. 34 –46, 2009.
- [31] U. Rohde et A. Poddar, « Reconfigurable concurrent oscillators for multi-band multi-mode wireless communication systems », in *Proceedings of the 30th IEEE Sarnoff Symposium 2007*, (Princeton, New Jersey, USA), p. 1 –6, 30 Avril-2 Mai 2007.
- [32] E. McCune, « High-efficiency, multi-mode, multi-band terminal power amplifiers », *IEEE Microwave Magazine*, vol. 6, p. 44 – 55, Mars 2005.
- [33] D. Kang, D. Kim, J. Choi, J. Kim, Y. Cho et B. Kim, « A Multimode/Multiband Power Amplifier With a Boosted Supply Modulator », *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 58, p. 2598 –2608, Octobre 2010.
- [34] R. Becker, V. Maurer et R. Ryter, « Multi-mode baseband transmit path for EDGE, TD-SCDMA, and WCDMA in 45-nm CMOS », in *Proceedings of the 16th IEEE Inter-*

Bibliographie

- national Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS '09)*, p. 359 –362, Décembre 2009.
- [35] J.-H. Kim, Y.-K. Jang et H.-J. Yoo, « Design of reconfigurable RF front-end for multi-standard receiver using switchable passive networks », *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 50, p. 81 –88, Février 2007.
- [36] A. Silva, N. Horta et J. Guilherme, « Design of a multimode reconfigurable sigma-delta converter for 4G wireless receivers », in *Proceedings of the 18th European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD '07)*, p. 132 –135, Août 2007.
- [37] F. Agnelli, G. Albasini, I. Bietti, A. Gnudi, A. Lacaita, D. Manstretta, R. Rovatti, E. Sacchi, P. Savazzi, F. Svelto, E. Temporiti, S. Vitali et R. Castello, « Wireless multi-standard terminals : system analysis and design of a reconfigurable RF front-end », *IEEE Circuits and Systems Magazine*, vol. 6, no. 1, p. 38 – 59, 2006.
- [38] H. Izumikawa, Y. Kishi et R. Nagareda, « Novel WLAN Coverage Area Estimation Leveraging Transition of Cellular Signal Using Multi-Mode Mobile Terminal for Heterogeneous Networks », in *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '09)*, p. 1 –6, Avril 2009.
- [39] A. Kaloxylos, F. Georgiadis, I. Modeas et N. Passas, « Design and Implementation of a Radio Access Selection Algorithm for Multi-mode Mobile Terminals », in *Mobile Networks and Management*, vol. 32 in *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, p. 131 –142, Springer Berlin Heidelberg.
- [40] K. Taniuchi, Y. Ohba, V. Fajardo, S. Das, M. Tauil, Y.-H. Cheng, A. Dutta, D. Baker, M. Yajnik et D. Famolari, « IEEE 802.21 : Media independent handover : Features, applicability, and realization », *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, p. 112 –120, Janvier 2009.
- [41] G. Lawton, « Is MIMO the future of wireless communications? », *Computer*, vol. 37, p. 20 – 22, Juillet 2004.
- [42] G. Wen, « Multi-antenna information theory », *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 75, p. 11 – 50, 2007.
- [43] A. Hottinen, O. Tirkkonen et R. Wichman, *Multi-antenna transceiver techniques for 3G and beyond*. John Wiley & Sons, 2003.
- [44] A. Paulraj, R. Nabar et D. Gore, *Introduction to space-time wireless communications*. Cambridge University Press, 2003.
- [45] M. Jankiraman, *Space-Time Codes and MIMO Systems* . Artech House Publishers, 2004.

- [46] A. Ghosh, J. Zhang, J. G. Andrews et R. Muhamed, *Fundamentals of LTE*. Prentice Hall, 2009.
- [47] F. Khalid et J. Speidel, « Advances in MIMO Techniques for Mobile Communications – A Survey », *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, vol. 3, p. 213 –252, Mars 2010.
- [48] A. Hesham Mehana et A. Nosratinia, « Diversity of MMSE MIMO Receivers », *ArXiv e-prints*, Février 2011.
- [49] M. Larsen, A. Swindlehurst et T. Svantesson, « Performance Bounds for MIMO-OFDM Channel Estimation », *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 57, p. 1901 –1916, Mai 2009.
- [50] A. Soysal et S. Ulukus, « Joint channel estimation and resource allocation for MIMO systems-part I : single-user analysis », *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, p. 624 –631, Février 2010.
- [51] Jingming-Wang et B. Daneshrad, « A comparative study of MIMO detection algorithms for wideband spatial multiplexing systems », in *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '05)*, vol. 1, p. 408 – 413 Vol. 1, Mars 2005.
- [52] C. Li et X. Wang, « Performance comparisons of MIMO techniques with application to WCDMA systems », *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, vol. 2004, p. 649 –661, Janvier 2004.
- [53] D. Gesbert, M. Shafi, D. shan Shiu, P. Smith et A. Naguib, « From theory to practice : an overview of MIMO space-time coded wireless systems », *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, p. 281 – 302, Avril 2003.
- [54] S. Alamouti, « A simple transmit diversity technique for wireless communications », *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, p. 1451 –1458, Octobre 1998.
- [55] P. Wolniansky, G. Foschini, G. Golden et R. Valenzuela, « V-BLAST : an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel », in *Proceedings of URSI International Symposium on the Signals, Systems, and Electronics (ISSSE '98)*, (Pisa, Italy), p. 295 –300, 29 Septembre-2 Octobre 1998.
- [56] B. Vucetic et J. Yuan, *Space-Time Coding*. John Wiley & Sons, 2003.
- [57] J.-P. Rissen *Mapping the wireless technology migration path : The evolution to 4G systems*, vol. 2, no. 1, p. 73 –79, 2008.
- [58] A. Paulraj, D. Gore, R. Nabar et H. Bolcskei, « An overview of MIMO communications - a key to gigabit wireless », *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, p. 198 – 218, Février 2004.

Bibliographie

- [59] 3rd Generation Partnership Project, « Long Term Evolution », Mars 2011.
- [60] S. Jafar et M. Fakhereddin, « Degrees of Freedom for the MIMO Interference Channel », *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 53, p. 2637 –2642, Juillet 2007.
- [61] B. Walkenhorst et M. Ingram, « Multiple Repeater Placement for Assisting Long-Range LOS MIMO Links », in *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '09)*, p. 1 –5, 30 Novembre-Décembre 4 2009.
- [62] G. Boudreau, J. Panicker, N. Guo, R. Chang, N. Wang et S. Vrzic, « Interference coordination and cancellation for 4G networks », *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, p. 74 –81, Avril 2009.
- [63] C. Manchon, G. Kirkelund, B. Fleury, P. Mogensen, L. Deneire, T. Sorensen et C. Rom, « Interference Cancellation Based on Divergence Minimization for MIMO-OFDM Receivers », in *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '09)*, p. 1 –6, 30 Novembre-Décembre 4 2009.
- [64] A. Nosratinia, T. Hunter et A. Hedayat, « Cooperative communication in wireless networks », *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, p. 74 – 80, Octobre 2004.
- [65] P. Herhold, E. Zimmermann et G. Fettweis, « On the Performance of Cooperative Amplify-and-Forward Relay Networks », 2004.
- [66] A. Özgür, O. Lévêque et D. Tse, « Beyond Multi-Hop : Optimal Cooperation in Large Wireless Networks », in *Proceedings of 19th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN '10)*, p. 1 –6, Août 2010.
- [67] S. Sugiura, S. Chen et L. Hanzo, « Space-Time Shift Keying : A Unified MIMO Architecture », 2010.
- [68] N. Souto, J. Silva, R. Dinis, F. Cercas et A. Correia, « An Iterative Receiver for WCDMA Systems with MIMO Transmissions and Hierarchical Constellations », in *Proceedings of the 9th IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications (ISSSTA '06)*, p. 233 –237, Août 2006.
- [69] J.-M. Lin et H.-P. Ma, « A high performance baseband transceiver for SISO-/MIMO-OFDMA uplink communications », *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, p. 3330 –3334, Juillet 2009.
- [70] M. Gautier et G. Villemaud, « Low Complexity Antenna Diversity Front-End : Use of Code Multiplexing », in *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '09)*, p. 1 –6, Avril 2009.
- [71] M. Gautier, I. Burciu et G. Villemaud, « New antenna diversity front-end using code multiplexing », in *Proceedings of the 3rd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP '09)*, p. 1052 –1056, Mars 2009.

- [72] T. Nesimoglu, « A review of Software Defined Radio enabling technologies », in *Proceedings of the 10th Mediterranean Microwave Symposium (MMS '10)*, p. 87 –90, Août 2010.
- [73] V. Sharma et Y. S. Mann, « Software Radio », *Journal of Emerging Technologies in Web Intelligence*, vol. 2, p. 115 –121, Mai 2010.
- [74] I. Mitola, J., « Software radio architecture : a mathematical perspective », *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, p. 514 –538, Avril 1999.
- [75] P. Leppanen, J. Reinila, A. Nykanen, V. Tapio, M. Isohookana, J. Pyhtila, T. Kokkonen et J. Sillanpaa, « Software radio-an alternative for the future in wireless personal and multimedia communications », in *Proceedings of the IEEE International Conference on Personal Wireless Communication (ICPWC '99)*, p. 364 –368, 1999.
- [76] A. Haghighat, « A review on essentials and technical challenges of software defined radio », in *Proceedings of MILCOM '02*, vol. 1, p. 377 – 382 vol.1, Octobre 2002.
- [77] J. Oberg, « Titan Calling », *IEEE Spectrum*, vol. 41, p. 28 – 33, Octobre 2004.
- [78] J. Hamkins et M. K. Simon, *Autonomous Software-Defined Radio Receivers for Deep Space Applications*. Jet Propulsion Laboratory.
- [79] A. McCann et B. Brannon, « DSP brings base station SDR reality », *RF Design*, vol. 27, no. 9, p. 50–59, 2004.
- [80] G. Bhanage, I. Seskar, R. Mahindra et D. Raychaudhuri, « Virtual basestation : architecture for an open shared WiMAX framework », in *Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM workshop on Virtualized infrastructure systems and architectures*, VISA '10, (New York, NY, USA), p. 1 –8, ACM, 2010.
- [81] S. Muir, « Trends in the Evolving Software Defined Radio (SDR) Market Landscape », 2009.
- [82] E.J.L. Wireless Research, « Multi-Standard, Multi-Mode, Multi-RAT Base Station Analysis and Forecast », rap. tech., Février 2009.
- [83] P. Cook et W. Bonser, « Architectural overview of the SPEAKeasy system », *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, p. 650 –661, Avril 1999.
- [84] I. Mitola, J. et J. Maguire, G.Q., « Cognitive radio : making software radios more personal », *IEEE Personal Communications*, vol. 6, p. 13 –18, Août 1999.
- [85] T. Leising, D. Barton, K. Chang, M. Blair, F. Hasan, A. Pavlotskiy, D. Davis et M. Totaro, « 64 radio node testbed for Dynamic Spectrum Access investigations using GNU radio », in *Proceedings of the IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS '10)*, p. 1 –4, 28 Août-3 Septembre 2010.

Bibliographie

- [86] U. Ramacher, « Software-Defined Radio Prospects for Multistandard Mobile Phones », *Computer*, vol. 40, p. 62–69, Octobre 2007.
- [87] A. Abidi, « Will the multimode wireless transceiver soon resemble a software-defined radio? », in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT '09)*, p. 1–4, 9 Novembre-11 Décembre 2009.
- [88] J. Lallet, S. Pillement et O. Sentieys, « Efficient and Flexible Dynamic Reconfiguration for Multi-Context Architectures », *Journal of Integrated Circuits and Systems*, vol. 4, p. 36–44, 2009.
- [89] J. Shao et X. Liang, « Design and implementation of cognitive radio model based on FPGA », in *Proceedings of the International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCAASM '10)*, vol. 2, p. V2–415–V2–418, Octobre 2010.
- [90] A. Dutta, D. Saha, D. Grunwald et D. Sicker, « An architecture for Software Defined Cognitive Radio », in *Proceedings of the ACM/IEEE Symposium on Architectures for Networking and Communications Systems (ANCS '10)*, p. 1–12, Octobre 2010.
- [91] M. Palkovic, P. Raghavan, M. Li, A. Dejonghe, L. Van der Perre et F. Catthoor, « Future Software-Defined Radio Platforms and Mapping Flows », *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 27, p. 22–33, Mars 2010.
- [92] S. Hasan, R. Nealy, T. Brisebois, T. Newman, T. Bose et J. Reed, « Wideband RF front end design considerations for a flexible white space software defined radio », in *Proceedings of the IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS '10)*, p. 484–487, Janvier 2010.
- [93] T. Becker, W. Luk et P. Cheung, « Parametric design for reconfigurable software-defined radio », in *Reconfigurable Computing : Architectures, Tools and Applications* (J. Becker, R. Woods, P. Athanas et F. Morgan, édés), vol. 5453 in *Lecture Notes in Computer Science*, p. 15–26, Springer Berlin / Heidelberg, 2009.
- [94] « Configurable symbol synchronizers for software-defined radio applications », *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 32, no. 3, p. 607–615, 2009.
- [95] M.-U.-R. Awan, M. M. Alam, P. Koch et N. Behjou, « Design & Implementation of FPGA-Based Multi-Standard Software Radio Receiver », Mém. D.E.A., Aalborg University, Juin 2007.
- [96] IEEE Standards Coordinating Committee 41 (Dynamic Spectrum Access Networks), Février 2009.
- [97] A. Galani, K. Tsagkaris, N. Koutsouris et P. Demestichas, « Design and assessment of functional architecture for optimized spectrum and radio resource management in heterogeneous wireless networks », *International Journal of Network Management*, vol. 20, p. 219–242, Juillet 2010.

- [98] F. Granelli, P. Pawelczak, R. Prasad, K. Subbalakshmi, R. Chandramouli, J. Hoffmeyer et H. Berger, « Standardization and research in cognitive and dynamic spectrum access networks : IEEE SCC41 efforts and other activities », *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, p. 71 –79, Janvier 2010.
- [99] C. Stevenson, G. Chouinard, Z. Lei, W. Hu, S. Shellhammer et W. Caldwell, « IEEE 802.22 : The first cognitive radio wireless regional area network standard », *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, p. 130 –138, Janvier 2009.
- [100] Y. Neuvo, « Future Directions in Mobile Communications », in *Proceedings of the 22nd European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC '96)*, p. 35 –39, Septembre 1996.
- [101] G. Weinberger, « The new millennium : wireless technologies for a truly mobile society », in *Proceedings of the IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC '00)*, p. 20 –24, Février 2000.
- [102] G. E. Corazza, A. Vanelli-Coralli et R. Pedone, « Technology as a Need : Trends in the Evolving Information Society », *Advances in Electronics and Telecommunications*, vol. 1, p. 124 –132, Avril 2010.
- [103] M. Woh, S. Mahlke, T. Mudge et C. Chakrabarti, « Mobile Supercomputers for the Next-Generation Cell Phone », *Computer*, vol. 43, p. 81 –85, Janvier 2010.
- [104] K. Ramachandran, I. Sheriff, E. Belding et K. Almeroth, « A multi-radio 802.11 mesh network architecture », *Mobile Networks and Applications*, vol. 13, p. 132–146, 2008. 10.1007/s11036-008-0026-8.
- [105] A. Ghosh, R. Ratasuk, B. Mondal, N. Mangalvedhe et T. Thomas, « LTE-advanced : next-generation wireless broadband technology [Invited Paper] », *IEEE Wireless Communications*, vol. 17, p. 10 –22, Juin 2010.
- [106] D. Gündüz, M. Khojastepour, A. Goldsmith et H. Poor, « Multi-hop MIMO relay networks : diversity-multiplexing trade-off analysis », *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, p. 1738 –1747, Mai 2010.
- [107] D. Xu, Z. Bai, A. Waadt, G. H. Bruck et P. Jung, « Combining MIMO with Network Coding : A Viable Means to Provide Multiplexing and Diversity in Wireless Relay Networks », in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC '10)*, p. 1 –5, Mai 2010.
- [108] E. Baccarelli, M. Biagi, C. Pelizzoni et N. Cordeschi, « Cognitive MIMO radio : an emerging paradigm for enhancing wireless access capability », *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*, vol. 2, p. 302 –330, Janvier 2009.
- [109] T. Shimomura, S. Selvanathan, R. S. Sudhaakar et C. Qiao, « Towards fully collaborative MIMO communication in cellular networks », in *Proceedings of the 6th Inter-*

Bibliographie

- national Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC '10)*, p. 1081 –1085, 2010.
- [110] L. Bloom, R. Eardley, E. Geelhoed, M. Manahan et P. Ranganathan, « Investigating the Relationship Between Battery Life and User Acceptance of Dynamic, Energy-Aware Interfaces on Handhelds », in *Mobile Human-Computer Interaction (MobileHCI '04)* (S. Brewster et M. Dunlop, édés), vol. 3160 in *Lecture Notes in Computer Science*, p. 43–79, Springer Berlin / Heidelberg, 2004.
- [111] S. Dhume, S. Kamble et R. Raut, « Mobile brand choice criteria : An empirical analysis using fishbein model », *Journal of Commerce & Management Thought*, vol. 2, no. 1, 2011.
- [112] K. Pentikousis, « In search of energy-efficient mobile networking », *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 1, p. 95 –103, 2010.
- [113] M. Marcu, D. Tudor, H. Moldovan et M. Micea, « Power Profile Evaluation of Battery-Powered Mobile Applications », in *Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS '07)*, p. 1015 –1018, Décembre 2007.
- [114] W. Arden, M. Brillouët, P. Cogez, M. Graef, B. Huizing et R. Mahnkopf, « More-than-Moore (White Paper) », 2010.
- [115] G. Mehta et A. Jones, « An architectural space exploration tool for domain specific reconfigurable computing », in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Parallel Distributed Processing, Workshops and Phd Forum (IPDPSW '10)*, p. 1 –8, Avril 2010.
- [116] C. Silvano, M. Lajolo et G. Palermo, *Low Power Networks-on-Chip*. Springer-Verlag, 2011.
- [117] W.-S. Feng, H.-C. Hsu, C.-M. Tsao, C.-H. Chen, H.-H. Li et C.-C. Wei, « Green design techniques for RF front-end circuits », in *Proceedings of the International Conference on Green Circuits and Systems (ICGCS '10)*, p. 1 –4, Juin 2010.
- [118] W. Baek et T. M. Chilimbi, « Green : a framework for supporting energy-conscious programming using controlled approximation », *ACM SIGPLAN Notices*, vol. 45, p. 198 –209, Juin 2010.
- [119] Bluetooth SIG, « Bluetooth low energy », Décembre 2009.
- [120] N. Ravi, J. Scott, L. Han et L. Iftode, « Context-aware Battery Management for Mobile Phones », in *Proceedings of the 6th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom '08)*, p. 224 –233, Mars 2008.
- [121] A. Shye, B. Scholbrock et G. Memik, « Into the wild : Studying real user activity patterns to guide power optimizations for mobile architectures », in *Proceedings of the*

- 42nd Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture (MICRO '09)*, p. 168 –178, Décembre 2009.
- [122] H.-O. Scheck, « ICT & wireless networks and their impact on global warming », in *Proceedings of the European Wireless Conference (EW '10)*, p. 911 –915, Avril 2010.
- [123] M. Younis et K. Akkaya, « Strategies and techniques for node placement in wireless sensor networks : A survey », *Ad Hoc Networks*, vol. 6, no. 4, p. 621 –655, 2008.
- [124] N. Pantazis et D. Vergados, « A survey on power control issues in wireless sensor networks », *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 9, no. 4, p. 86 –107, 2007.
- [125] G. Anastasi, M. Conti, M. D. Francesco et A. Passarella, « Energy conservation in wireless sensor networks : A survey », *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 3, p. 537 –568, 2009.
- [126] S. Chalasani et J. Conrad, « A survey of energy harvesting sources for embedded systems », in *Proceedings of the IEEE Southeastcon 2008*, p. 442 –447, Avril 2008.
- [127] S. K. Singh, M. P. Singh et D. K. Singh, « A Survey of Energy-Efficient Hierarchical Cluster-Based Routing in Wireless Sensor Networks », *International Journal of Advanced Networking and Applications*, vol. 2, no. 2, p. 570–580, 2010.
- [128] E. Fasolo, M. Rossi, J. Widmer et M. Zorzi, « In-network aggregation techniques for wireless sensor networks : a survey », *IEEE Wireless Communications*, vol. 14, p. 70 –87, Avril 2007.
- [129] H. AbdelSalam et S. Olariu, « On prolonging network lifetime by adjusting sleep/awake cycles in wireless sensor networks », in *Proceedings of the 6th International Conference on Networked Sensing Systems (INSS '09)*, p. 1 –6, Juin 2009.
- [130] X. Ning et C. G. Cassandras, « Dynamic sleep time control in wireless sensor networks », *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 6, p. 21 :1 –21 :37, Juin 2010.
- [131] T. Yang, M. Ikeda, G. Mino, L. Barolli, A. Durresi et F. Xhafa, « Performance Evaluation of Wireless Sensor Networks for Mobile Sink Considering Consumed Energy Metric », in *Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA '10)*, p. 245 –250, Avril 2010.
- [132] S.-Y. Choi, J.-S. Kim, S.-J. Han, J.-H. Choi, K.-W. Rim et J.-H. Lee, « Dynamic Routing for Mitigating the Energy Hole Based on Heuristic Mobile Sink in Wireless Sensor Networks », in *Advances in Computer Science and Information Technology* (T.-h. Kim et H. Adeli, édés), vol. 6059 in *Lecture Notes in Computer Science*, p. 159–174, Springer Berlin / Heidelberg, 2010.

Bibliographie

- [133] E. Oh, B. Krishnamachari, X. Liu et Z. Niu, « Towards dynamic energy-efficient operation of cellular network infrastructure », *IEEE Communications Magazine*, Novembre 2010.
- [134] K. Son, H. Kim, Y. Yi et B. Krishnamachari, « Base Station Operation and User Association Mechanisms for Energy-Delay Tradeoffs in Green Cellular Networks », rap. tech., Décembre 2010.
- [135] O. Blume, D. Zeller et U. Barth, « Approaches to energy efficient wireless access networks », in *Proceedings of the 4th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP '10)*, p. 1 –5, Mars 2010.
- [136] R. Bolla, R. Bruschi, F. Davoli et F. Cucchietti, « Energy Efficiency in the Future Internet : A Survey of Existing Approaches and Trends in Energy-Aware Fixed Network Infrastructures », *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, p. 1 –22, 2011. À paraître.
- [137] A. Amanna, J. Reed, T. Bose et T. Newman, « Metric and measurement technologies for green communications, national institute of standards and technology technology innovation program », Mars 2009.
- [138] R. Verdone, « Cooperative radio communications for green smart environments », Décembre 2010.
- [139] C. Han, T. Harrold, I. Krikidis, I. Ku, T. A. Le, S. Videv, J. Zhang, S. Armour, P. M. Grant, H. Haas, L. Hanzo, M. R. Nakhai, J. S. Thompson et C.-X. Wang, « Green Radio : Radio Techniques to Enable Energy Efficient Wireless Networks », *IEEE Communications Magazine Special Issue : Green Communications*, p. 19, Novembre 2010.
- [140] G. de la Roche et J. Zhang, *Femtocells : Technologies and Deployment*. John Wiley & Sons, 2010.
- [141] V. Chandrasekhar, J. Andrews et A. Gatherer, « Femtocell networks : a survey », *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, p. 59 –67, Septembre 2008.
- [142] S. Benedetto et L. M. Correia, « A Vision into Medium-Long Term Research in Wireless Communications », *Advances in Electronics and Telecommunications*, vol. 1, p. 13 –25, Avril 2010.
- [143] P. Popovski, « On Designing Future Communication Systems : Some Clean-Slate Perspectives », in *Globalization of Mobile and Wireless Communications* (R. Prasad, S. Dixit, R. van Nee et T. Ojanpera, édés), Signals and Communication Technology, p. 129–143, Springer Netherlands, 2011.
- [144] F. Kerasiotis, A. Prayati, C. Antonopoulos, C. Koulamas et G. Papadopoulos, « Battery Lifetime Prediction Model for a WSN Platform », in *Proceedings of the 4th International*

- Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM '10)*, p. 525 – 530, Juillet 2010.
- [145] W. Dargie, X. Chao et M. Denko, « Modelling the energy cost of a fully operational wireless sensor network », *Telecommunication Systems*, vol. 44, p. 3 –15, 2010.
- [146] R. Ahmad, F.-C. Zheng, M. Driberg, S. Olafsson et M. Fitch, « Modelling Energy Consumption of Relay-Enabled MAC Protocols in Ad Hoc Networks », in *Proceedings of the 4th International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC '09)*, p. 1 –6, Février 2009.
- [147] M. M. Alam, O. Berder, D. Menard, T. Anger et O. Sentieys, « A hybrid model for accurate energy analysis of WSN nodes », *EURASIP Journal on Embedded Systems*, vol. 2011, p. 4 :1–4 :16, Janvier 2011.
- [148] L. Tran, O. Berder et O. Sentieys, « Energy efficiency of cooperative strategies in wireless sensor networks », in *Proceedings of the International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC '10)*, p. 29 –32, Octobre 2010.
- [149] R. Zhang, J.-M. Gorce, R. Dong et K. Jaffrès-Runser, « Energy efficiency of opportunistic routing with unreliable links », in *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '09)*, (Hungary), Avril 2009.
- [150] Q. Gao, J. Zhang, X. Shen et B. Larish, « A cross-layer optimization approach for energy efficient wireless sensor networks : coalition-aided data aggregation, cooperative communication, and energy balancing », *Advanced in MultiMedia*, vol. 2007, no. 1, p. 2 –2, 2007.
- [151] R. Madan, N. Mehta, A. Molisch et J. Zhang, « Energy-efficient cooperative relaying over fading channels with simple relay selection », *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, p. 3013 –3025, Août 2008.
- [152] K.-S. Hwang et Y.-C. Ko, « An efficient relay selection algorithm for cooperative networks », in *Proceedings of the 66th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-2007 Fall)*, p. 81 –85, 30 Septembre-3 Octobre 2007.
- [153] K. G. Seddik, A. K. Sadek, W. Su et K. J. R. Liu, « Outage Analysis and Optimal Power Allocation for Multinode Relay Networks », *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 14, p. 377 –380, Juin 2007.
- [154] H. Y. Lee, W. K. Seah et P. Sun, « Energy implications of clustering in heterogeneous wireless sensor networks - an analytical view », in *Proceedings of the 17th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC '06)*, p. 1 –5, Septembre 2006.

Bibliographie

- [155] J. Feng, R. Zhang, S. Ng et L. Hanzo, « Relay selection for energy-efficient cooperative media access control », in *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '11)*, (Cancun, Mexico), Mars 2011.
- [156] A. Ben Nacef, S.-M. Senouci, Y. Ghamri-Doudane et A. Beylot, « Enhanced relay selection decision for cooperative communication in energy constrained networks », in *Proceedings of the 2nd IFIP Wireless Days (WD '09)*, p. 1 –5, Décembre 2009.
- [157] X. He et F. Li, « Throughput and energy efficiency comparison of one-hop, two-hop, virtual relay and cooperative retransmission schemes », in *Proceedings of the European Wireless Conference (EW '10)*, p. 580 –587, Avril 2010.
- [158] H. Lei, X. F. Wang et P. Chong, « Opportunistic Relay Selection in Future Green Multihop Cellular Networks », in *Proceedings of the 72th IEEE Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall)*, p. 1 –5, Septembre 2010.
- [159] Y. Zhu et Q. Han, « The More Relay Nodes, the More Energy Efficient ? », in *Proceedings of the International Conference on Computational Science and Engineering (CSE '09)*, vol. 2, p. 87 –92, Août 2009.
- [160] J. Chen, A. Massouri, L. Clavier, C. Loyez, C. Lethien, N. Rolland et P.-A. Rolland, « Relay characteristic impact on energy consumption for heterogeneous networks in a LOS channel », in *Proceedings of the European Wireless Technology Conference (EuWiT '09)*, p. 57 –60, Septembre 2009.
- [161] P. Jiang, J. Bigham et J. Wu, « Self-organizing relay stations in relay based cellular networks », *Computer Communications*, vol. 31, p. 2937 –2945, Août 2008.
- [162] H. Nourizadeh, S. Nourizadeh et R. Tafazolli, « Performance evaluation of cellular networks with mobile and fixed relay station », in *Proceedings of the 64th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-2006 Fall)*, (Montréal, Canada), Septembre 2006.
- [163] W. Wang, V. Srinivasan et K.-C. Chua, « Extending the lifetime of wireless sensor networks through mobile relays », *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 16, p. 1108 –1120, Octobre 2008.
- [164] M. Haüge et Ø. Kure, « A heterogeneous cellular and ad hoc network architecture for multipoint streaming : A detailed performance analysis », in *Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU '06)*, (London), Octobre 2006.
- [165] H.-Y. Wei, S. Ganguly et R. Izmailov, « Adhoc relay network planning for improving cellular data coverage », in *Proceedings of the 15th International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC '04)*, (Barcelona, Spain), Septembre 2004.

- [166] S. Sengupta, M. Chatterjee, S. Ganguly et R. Izmailov, « WRN : improving system performance in 3G networks through fixed multi-hop relay nodes », *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '05)*, vol. 3, p. 1708 – 1713 Vol. 3, Mars 2005.
- [167] B. Calhoun, J. Ryan, S. Khanna, M. Putic et J. Lach, « Flexible Circuits and Architectures for Ultralow Power », *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, p. 267 –282, Février 2010.
- [168] J.-S. Paek, H.-Y. Lee et S. Hong, « Low-power CMOS polar modulator for multiband and multimode RF transmitter », *Electronics Letters*, vol. 46, p. 1032 –1033, Juillet 2010.
- [169] P.-W. Chen, T.-Y. Lin, L.-W. Ke, R. Yu, M.-D. Tsai, C.-W. Yeh, Y.-B. Lee, B. Tzeng, Y.-H. Chen, S.-J. Huang, Y.-H. Lin et G.-K. Dehng, « A 0.13 m CMOS Quad-Band GSM/GPRS/EDGE RF Transceiver Using a Low-Noise Fractional-N Frequency Synthesizer and Direct-Conversion Architecture », *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 44, p. 1454 –1463, Mai 2009.
- [170] I. Burciu, G. Villemaud, J. Verdier et M. Gautier, « Low Power Front-End Architecture dedicated to the Multistandard Simultaneous Reception », *International journal of microwave and wireless technologies*, Août 2010.
- [171] B. Kim, B. Gu, J. Kim, C. Lim et J. Hong, « Energy efficient power management for multi-mode wireless network devices », in *Proceedings of the Reliable and Autonomous Computational Science 2010*, (Atlanta, GA, USA), p. 223,244, Springer, Décembre 2010.
- [172] J. Inwhae, K. Won-Tae et H. Seokjoon, « A network selection algorithm considering power consumption in hybrid wireless networks », *IEICE Transactions*, vol. 91-B, no. 1, p. 314 –317, 2008.
- [173] D. Charlet, V. Issarny et R. Chibout, « Energy-efficient middleware-layer multi-radio networking : An assessment in the area of service discovery », *Computer Networks*, vol. 52, no. 1, p. 4 –24, 2008.
- [174] F. Albiero, F. H. Fitzek et M. Katz, « Cooperative Power Saving Strategies in Wireless Networks : an Agent-based Model », in *Proceeding of the 4th IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS '07)*, p. 287 –291, Octobre 2007.
- [175] F. Albiero, M. Katz et F. H. Fitzek, « Energy-efficient cooperative techniques for multimedia services over future wireless networks », in *Proceeding of the IEEE International Conference on Communications (ICC '08)*, p. 2006 –2011, Mai 2008.
- [176] K. Yamazaki, I. Kanno, Y. Ikeda et H. Ishikawa, « Radio access selection method designed to enhance node availability in multi-mode wireless sensor network », in *Procee-*

Bibliographie

- dings of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC '10)*, (Caen, France), p. 696 –700, 2010.
- [177] S. Cui, A. Goldsmith et A. Bahai, « Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks », *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, p. 1089 –1098, Août 2004.
- [178] G. Bravos et A. G. Kanatas, « Energy efficiency comparison of MIMO-based and multihop sensor networks », *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2008, p. 1 –13, 2008.
- [179] W. Liu, X. Li et M. Chen, « Energy efficiency of MIMO transmissions in wireless sensor networks with diversity and multiplexing gains », in *Proceedings of ICASSP '05*, (Philadelphia, USA), Mars 2005.
- [180] H. Yu, L. Zhong et A. Sabharwal, « Adaptive RF chain management for energy-efficient spatial-multiplexing MIMO transmission », in *Proceedings of the 14th ACM/IEEE international symposium on Low power electronics and design, ISLPED '09*, (New York, NY, USA), p. 401 –406, ACM, 2009.
- [181] M. Siam, M. Krunz, S. Cui et A. Muqattash, « Energy-efficient protocols for wireless networks with adaptive MIMO capabilities », *Wireless Networks*, vol. 16, p. 199–212, 2010.
- [182] C. K. Lo, S. Vishwanath et J. Robert W. Heath, « An Energy-Based Comparison of Long-Hop and Short-Hop Routing in MIMO Networks », *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, p. 394 –405, Janvier 2010.
- [183] Y. Guo, G. Kang, Y. Yu et P. Zhang, « A Relay Selection Cooperative MIMO Communication Scheme for Network Lifetime Maximization », in *Proceedings of the 70th IEEE Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall)*, p. 1 –5, Septembre 2009.
- [184] T.-D. Nguyen, L. Mai, O. Berder et O. Sentieys, « Cooperative MIMO and relay association strategy », in *Proceedings of the International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC '10)*, p. 327 –330, Octobre 2010.
- [185] J. Palicot, « Cognitive radio : an enabling technology for the green radio communications concept », in *Proceedings of the 5th International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing : Connecting the World Wirelessly (IWCMC '09)*, (Leipzig, Germany), p. 489 –494, 2009.
- [186] D. Noguét, G. Masera, V. Ramakrishnan, M. Belleville, D. Morche et G. Asheid, « Considering Microelectronic Trends in Advanced Wireless System Design », *Advances in Electronics and Telecommunications*, vol. 1, p. 112 –123, Avril 2010.
- [187] Y. Lin, H. Lee, M. Woh, Y. Harel, S. Mahlke, T. Mudge, C. Chakrabarti et K. Flautner,

- « SODA : A High-Performance DSP Architecture for Software-Defined Radio », *IEEE Micro*, vol. 27, p. 114–123, 2007.
- [188] H. Lee, C. Chakrabarti et T. Mudge, « A Low-Power DSP for Wireless Communications », *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 18, p. 1310–1322, Septembre 2010.
- [189] M. Schulte, J. Glossner, S. Jinturkar, M. Moudgill, S. Mamidi et S. Vassiliadis, « A Low-Power Multithreaded Processor for Software Defined Radio », *Journal of VLSI Signal Processing Systems*, vol. 43, p. 143–159, Juin 2006.
- [190] Z. Wang, A. T. Erdogan et T. Arslan, « SDR Platform for Mobile Wi-Fi/3G UMTS System on a Dynamic Reconfigurable Architecture », in *Proceedings of the 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009)*, (Glasgow, Scotland), Août 2009.
- [191] G. K. Rauwerda, P. M. Heysters et G. J. M. Smit, « Mapping wireless communication algorithms onto a reconfigurable architecture », *Journal of Supercomputing*, vol. 30, no. 3, p. 263–282, 2004.
- [192] L. Berlemann, R. Pabst et B. Walke, « Multimode communication protocols enabling reconfigurable radios », *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2005, no. 3, p. 390–400, 2005.
- [193] J. Laskar et K. Lim, *Low-Power Spectrum Processors for Cognitive Radios*, p. 533–556. John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [194] O. Zlydareva et C. Sacchi, « A software radio architecture for the baseband level of the multi-standard user terminal : Design methodology and computational assessment », in *Wireless Days (WD), 2010 IFIP*, p. 1–5, Octobre 2010.
- [195] B. Debaillie, B. Bougard, G. Lenoir, G. Vandersteen et F. Catthoor, « Energy-scalable OFDM transmitter design and control », in *Proceedings of the 43rd annual conference on Design automation (DAC '06)*, (San Francisco, CA, USA), p. 536–541, Juillet 2006.
- [196] J. pyo Hong et W. Choi, « Dynamically Reconfigurable Relay Communications With Multiple Radio Access Technologies », *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, p. 4608–4614, Novembre 2010.
- [197] G. Ganesan et Y. Li, « Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio, Part I : Two User Networks », *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, p. 2204–2213, Juin 2007.
- [198] A. Adinoyi et H. Yanikomeroğlu, « Cooperative relaying in multi-antenna fixed relay networks », *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, p. 533–544, Février 2007.
- [199] J. Zhang, J. Jia, Q. Zhang et E. Lo, « Implementation and Evaluation of Cooperative Communication Schemes in Software-Defined Radio Testbed », in *Proceedings of 29th*

Bibliographie

- IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM '10)*, p. 1 –9, Mars 2010.
- [200] A. Wang et A. Chandrakasan, « Energy-efficient dsps for wireless sensor networks », *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 19, p. 68 –78, Jul 2002.
- [201] E. Shih, S.-H. Cho, N. Ickes, R. Min, A. Sinha, A. Wang et A. Chandrakasan, « Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks », in *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom '01)*, (Rome, Italy), p. 272 –287, Juillet 2001.
- [202] ITU Radiocommunication Assembly, « Recommendation ITU-R P.1238-1 : Propagation data and prediction models for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz », Octobre 1999.
- [203] D. J. Cichon et T. Kürner, « Cost 231 Final Report – Chapter 4 : Propagation Prediction Models », 1998.
- [204] K. Laasonen, « Radio propagation modeling », rap. tech., University of Helsinki, 2003.
- [205] G. Chelius, A. Fraboulet et E. Ben Hamida, « WSNNet – An event-driven simulator for large scale wireless sensor networks », 2008.
- [206] G. E. Moore, « Cramming More Components onto Integrated Circuits », *Electronics*, vol. 38, p. 114 –117, Avril 1965.
- [207] M. Safadi et D. Ndzi, « Digital Hardware Choices For Software Radio (SDR) Baseband Implementation », in *Information and Communication Technologies, 2006. ICTTA '06. 2nd*, vol. 2, p. 2623 –2628, 2006.
- [208] Executive Office of the President and President’s Council of Advisors on Science and Technology, « Designing a digital future : federally funded research and development in networking and information technology », Décembre 2010.
- [209] J. Neel, J. Reed et M. Robert, « A formal methodology for estimating the feasible processor solution space for a software radio », in *Proceedings of SDRForum '05*, (Orange County, CA, USA), Novembre 2005.
- [210] K. Masselos et N. S. Voros, « Implementation of wireless communications systems on fpga-based platforms », *EURASIP Journal on Embedded Systems*, vol. 2007, p. 1 –1, Janvier 2007.
- [211] ARM Processor, « ARM 968 E-S processor », Consulté en Mars 2011.
- [212] I. Burciu, M. Gautier, G. Villemaud et J. Verdier, « A 802.11g and UMTS Simultaneous Reception Front-End Architecture using a double IQ structure », in *Proceedings of the 69th IEEE Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Spring)*, (Barcelona, Spain), Avril 2009.

- [213] C.-C. Wang, J.-M. Huang, C.-Y. Chang, K.-T. Cheng et C.-P. Li, « A 6.57 mW ZigBee transceiver for 868/915 MHz band », in *Proceedings of ISCAS '06*, p. 4 pp. –5198, 0-0 2006.
- [214] D. Datla, T. Tsou, T. Newman, J. Reed et T. Bose, « Waveform Level Computational Energy Management in Software Defined Radios », in *Proceedings of SDRForum '09*, (Washington, DC, United States), Décembre 2009.
- [215] R. Hachemani, J. Palicot et C. Moy, « A new standard recognition sensor for cognitive radio terminal », in *Proceedings of EUSIPCO 2007*, (Poznan, Poland), Septembre 2007.
- [216] I. Medvedev, B. Bjerke, R. Walton, J. Ketchum, M. Wallace et S. Howard, « A Comparison of MIMO Receiver Structures for 802.11N WLAN - Performance and Complexity », in *Proceedings of the 17th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC '06)*, p. 1 –5, Septembre 2006.
- [217] « Équipement d'Excellence : Future Internet of Things », 2011. <http://www.inria.fr/centre-de-recherche-inria/grenoble-rhone-alpes/actualites/fit-pour-l-internet-du-futur>.

Liste des publications

Chapitres de livre

- [Gaut11] M. Gautier, G. Villemaud, C. Lévy-Bencheton, D. Noguét et T. Risset, “Cross-layer design and digital front-end for cognitive wireless link”, dans *Digital Front-End in Wireless Communication and Broadcasting*, Fa-Long LUO, Digital Front-End in Wireless Communication and Broadcasting, Ed. Cambridge University Press, 2011. (Sous presse).

Articles de Journaux

- [Annals11] C. Lévy-Bencheton, D. Ammar, G. Villemaud, T. Risset et C. Reboul, “Multi-mode relaying for energy consumption reduction”, *Annals of Telecommunications*, 2011. (Version révisée soumise).

Conférences internationales avec comité de lecture et actes

- [WD11] C. Lévy-Bencheton, G. Villemaud et T. Risset, “Toward an energy reduction in mobile relays : combining MIMO and multi-mode”, Soumis à Wireless Days 2011.
- [RWS11] C. Lévy-Bencheton, D. Ammar, G. Villemaud et T. Risset, “Multi-mode relay simulations : an energy evaluation on WSNets”, dans les *Actes du 8ème IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS '11)*, Phoenix, Arizona, États-Unis, Janvier 2011.
- [EuWiT09] C. Lévy-Bencheton et G. Villemaud, “Power consumption optimization in multi-mode mobile relay”, dans les Actes de la 12ème European Conference on Wireless Technology (EuWiT '09), Rome, Italie, Septembre 2009.

Conférences nationales avec comité de lecture et actes

- [JDIR09] C. Lévy-Bencheton et G. Villemaud, “Optimisation de la consommation dans les relais mobiles multi-mode”, dans les *Actes des 10ème Journées Doctorales en Informatique et Réseaux (JDIR '09)*, Université Technologique de Belfort, Belfort, France, 2-4 Février 2009.

Rapports de Recherche

- [RR10] C. Lévy-Bencheton, D. Ammar, G. Villemaud et T. Risset, “Multi-mode relaying for energy consumption reduction”, Rapport de recherche INRIA RR-7245, 31 pages, Octobre 2010. Disponible en ligne : <http://hal.inria.fr/inria-00470533/>

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

NOM : LÉVY-BENCHETON
(avec précision du nom de jeune fille, le cas échéant)

DATE de SOUTENANCE : 28 Juin 2011

Prénoms : Cédric Thomas Meyer

TITRE : Étude de relais multi-mode sous contrainte d'énergie dans un contexte de radio logicielle

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre : 2011-ISAL-0052

Ecole doctorale : Informatique et Mathématiques (INFOMATHS)

Spécialité : Informatique

Cote B.I.U. - Lyon : T 50/210/19 / et bis

CLASSE :

RESUME :

La réduction d'énergie apparaît comme un besoin crucial dans les télécommunications modernes, tant au niveau des terminaux que des réseaux. Dans les réseaux modernes, un terminal peut se connecter à Internet via d'autres terminaux ou infrastructures à proximité, appelés relais. Bien que les relais offrent une solution intéressante pour limiter la puissance de transmission des terminaux, il n'est pas simple de garantir une réduction de la consommation d'énergie globale. Il devient alors nécessaire de développer des outils pour évaluer et quantifier la consommation d'énergie.

Un terminal moderne dispose de plusieurs interfaces de communications, ce qui lui permet d'utiliser plusieurs standards. Sachant qu'un standard dispose de différents modes de communications, un terminal est multi-mode lorsqu'il possède cette capacité à communiquer sur les différents standards et modes disponibles. Nous nous sommes alors intéressés à l'utilisation du multi-mode dans le cadre des relais. Nous nous positionnons dans un contexte de radio logicielle, où la couche physique d'un terminal est représentée par des blocs programmables, ce qui facilite l'implémentation du multi-mode. Afin d'estimer la consommation d'énergie d'une radio logicielle, nous avons calculé la complexité algorithmique pour les couches physiques du 802.11g (ou Wi-Fi), de l'UMTS et du 802.15.4 (ou Zigbee).

Dans cette thèse, nous avons développé des outils nous permettant d'évaluer l'intérêt d'un relais multi-mode dans la réduction d'énergie. Nous avons proposé un modèle d'énergie réaliste pour le multi-mode, qui prend en compte la couche d'accès au medium des protocoles considérés. Dans un but de réalisme accru, nous avons implémenté le multi-mode au sein de WSNNet, un simulateur réseau précis, grâce auquel nous avons déterminé les paramètres ayant un impact sur la consommation d'énergie. Puis, nous avons proposé et validé des stratégies permettant de minimiser l'influence de ces paramètres.

Suite à cela, nous avons évalué l'apport du multi-antenne au sein d'un relais multi-mode, toujours dans le but de réduire la consommation d'énergie. Après avoir modifié notre modèle d'énergie et notre simulateur réseau pour y intégrer le multi-antenne, nous avons évalué les gains énergétiques du multi-antenne pour un lien de communication, puis pour un relais multi-mode.

Mots clés : consommation d'énergie, relais, multi-mode, multi-antenne, radio logicielle

Laboratoire (s) de recherche : CITI

Directeur de thèse : Tanguy RISSET

Président de jury : Bruno ALLARD

Composition du jury :

Laurent CLAVIER	Maître de conférences HDR	TELECOM Lille 1	Rapporteur
Olivier SENTIEYS	Professeur	Université de Rennes	Rapporteur
Bruno ALLARD	Professeur	INSA de Lyon	Examineur
Cyril DECROZE	Maître de conférences	Université de Limoges	Examineur
Tanguy RISSET	Professeur	INSA de Lyon	Directeur
Guillaume VILLEMAUD	Maître de conférences	INSA de Lyon	Co-Directeur