HAL
open science

Protocoles de support IPv6 pour réseaux de capteurs sur courant porteur en ligne

Cédric Chauvenet

To cite this version:

Cédric Chauvenet. Protocoles de support IPv6 pour réseaux de capteurs sur courant porteur en ligne. Autre [cs.OH]. Université de Grenoble, 2013. Français. NNT : 2013GRENM067 . tel-01168472

HAL Id: tel-01168472

https://theses.hal.science/tel-01168472v1

Submitted on 25 Jun 2015

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

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

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Informatique**

Arrêté ministériel : 7 Août 2006

Présentée par

Cédric Chauvenet

Thèse dirigée par **Bernard Tourancheau**

préparée au sein **LIG**
et de **MSTII**

Protocoles de support IPv6 pour réseaux de capteurs sur courant porteur en ligne

Thèse soutenue publiquement le ,
devant le jury composé de :

Mr, Fabrice Valois
Professeur - CITI EA Insa-Lyon / INRIA, Président
Mr André-Luc Beylot
Professeur - ENSEEIHT IRIT - UMR 5505, Rapporteur
Kun-Mean Hou
Professeur - ISIMA LIMOS - UMR 6158 CNRS, Rapporteur
Pierre-Emmanuel Goudet
Responsable des développements Informatiques - Watteco, Examinateur
Jean Phillippe Vasseur
CISCO Fellow, Examinateur
Michel Gaeta
Directeur - Taluko, Examinateur
Bernard Tourancheau
Professeur - LIG - UMR 5217, Directeur de thèse
Denis Genon Catalot
Maître de conférences - LCIS EA 3747 Grenoble INP, Co-Encadrant

Remerciements

Cette thèse est le fruit d'un peu plus de 3 ans de travail effectué en collaboration avec un nombre impressionnant de personnes dont je vais m'efforcer de n'en manquer aucun. Il est évident que cette thèse n'aurait pu aboutir sans leurs précieux conseils, et je les en remercie chaleureusement.

Tout d'abord, je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui ont travaillé à Watteco depuis le début de ma thèse, à la fin de l'année 2009. Comme toute PME qui se respecte, les liens sont vites tissés, et je garderai toujours un bon souvenir de l'ambiance de travail qui m'a été offerte. Ils ont tous de près ou de loin collaboré à mon projet de thèse et m'ont permis de prendre du recul sur mon travail.

J'adresse des remerciements appuyés à Pierre, pour sa grande polyvalence, sa disponibilité et son accent chantant, Tony pour sa dextérité et son efficacité à réparer manuellement mes erreurs de manipulation que je tairai ici, Emilie pour son support sur les implémentations, les aspects radio et le doux bruit de ses chaussures en bois qui ont rythmé cette thèse, Christian, pour sa pédagogie sur le matériel ultra flexible et hyper robuste qu'il conçoit et dont j'ai pu profiter, qui m'a montré qu'on peut encore travailler et faire des marathons après 100 ans, Marie pour avoir signé mes nombreuses notes de frais et donc permis de me nourrir régulièrement, et Magali, pour son suivi indispensable et sa capacité à planifier des actions pour la veille.

Je n'ai pas trouvé de mots plus fort que "remerciements" à adresser à Pierre-Emmanuel et Mathieu. Le trinôme de geeks parfois incompris que nous avons formés depuis maintenant plus de 4 ans a probablement été décisif dans ma détermination à mener à bien cette thèse et je leur doit beaucoup, tant sur le plan personnel que technique. Au delà du cadre de Watteco, nous avons construit des liens que j'espère garder pour longtemps quoiqu'il advienne.

De nombreuses personnes sont passées par Watteco durant la thèse, et ont fait vivre l'entreprise. Je pense notamment à Michel, Paul, Noé-Jean, Julien, Didier, Franck, Romain et Jenna. Un remerciement particulier à Michel pour sa disponibilité, la justesse de ses conseils et la confiance qu'il m'a accordée à Watteco. Egalement un grand merci à Paul pour avoir eu l'ambition de créer et de faire vivre une PME comme Watteco. Je souhaite une bonne suite à toutes ces personnes après leur passage chez Watteco.

Un grand merci également à Denis Genon-Catalot qui a permis de rassembler les acteurs de cette thèse. Denis a certainement été le déclencheur de cette thèse et je lui dois en grande partie ma situation actuelle. Il ne fait aucun doute que nos chemins se recroiseront par la suite.

Cette thèse n'aurait pu être menée à bien sans la bienveillance de Bernard Tourancheau. Nos échanges ont largement dépassé le cadre de la thèse, et je le remercie au plus haut point pour sa patience et son engagement. Bernard fait partie des personnes avec lesquelles j'ai le plus appris, tant sur le plan de la démarche scientifique que de sujets extra-techniques, qu'ils soient énergétiques, technologiques ou oenologiques ! OK on me reprochera certainement de manquer d'objectivité avec le maître jedi du thésard qu'on appelle "directeur de thèse", mais je ne suis pas parvenu à être moins sincère (et comme dirait Fabrice "c'est bon pour ta carrière").

J'ai eu la chance d'être encadré par des laboratoires renommés et très compétents qui m'ont permis de me sortir la tête du monde industriel et de m'éloigner du grand lac à l'influence néfaste au travail qu'on appelle mer Méditerranée.

Le laboratoire CITI, avec lequel j'ai effectué mes 2 premières années de thèse, et en particulier son directeur Jean-Marie Gorce, et Fabrice Valois, qui a gentiment accepté d'être démocratiquement nommé président de mon jury de thèse à l'unanimité après que je lui ai proposé en 2 minutes 1 an avant la soutenance... Cet homme finira ministre du redressement scientifique de la France à n'en pas douter ;-) (Bon pour ma carrière 2. Mon CV est en Annexe).

Le laboratoire LIG, et l'équipe Drakkar, dirigée par Andrzej Duda, dont le h index doit approcher le nombre de points de son prénom posé sur un plateau de Scrabble. Changer de

laboratoire permet de se confronter à de nouvelles idées, et je garde un bon souvenir des discussions passionnées dont les murs de la cafétéria résonnent encore. Je remercie l'équipe et leur disponibilité qui ont permis de structurer mes réflexions et d'enrichir ma culture scientifique.

Enfin, je remercie tout particulièrement chacun des membres de mon jury de thèse, qui ont accepté d'apporter leur aval scientifique et technique à mes travaux. Je remercie en particulier les 2 rapporteurs, Kun-Mean et André-Luc, qui ont produit une revue très juste du manuscrit dans un timing particulièrement serré. Merci beaucoup pour leur implication.

Je finirai mes remerciements par une pensée à tous les gens qui m'ont entouré durant cette période, le soutient de ma famille, de mes amis, et les personnes qui ont été proches de moi durant cette tranche de vie. Je suis particulièrement fier d'avoir pu mener à bien ce projet et ils ont pesé dans l'équilibre nécessaire avec la vie réelle.

J'espère n'avoir oublié personne, mais dans cette éventualité, je m'en excuse et les prie de ne pas me forcer à refaire une thèse pour les ajouter à une nouvelle section de remerciements.

Merci aussi à Apple pour la machine qui m'a permis de rédiger ce manuscrit, à EDF pour l'électricité qui l'a fait fonctionné et à Nespresso qui m'a permis d'arriver au bout du manuscrit tard le soir.

A mon grand père Marcel, qui aurait été très fier de savoir son petit fils devenir Docteur. Cette thèse lui est dédiée.

Résumé

Cette thèse démontre la pertinence de l'utilisation du Courant Porteur en Ligne (CPL) pour des applications de réseaux de capteurs. Nous nous focalisons sur la technologie basse consommation et bas débit "WPC" développée par la société Watteco et nous montrons que son utilisation est justifiée pour des applications de réseaux de capteurs. Nous situons la solution WPC dans le paysage du CPL et déterminons les protocoles compatibles. Nous décrivons ensuite l'implémentation du module WPC et du média CPL dans le simulateur de réseau COOJA afin de proposer une solution réseau reposant sur l'adaptation du standard 802.15.4 sur la technologie WPC. Nous démontrons ensuite l'intérêt de la convergence des médias au niveau réseau par l'utilisation du standard IPv6, que nous adaptons sur notre solution CPL grâce au protocole 6LoWPAN. Nous justifions l'utilisation des protocoles standards de l'IETF sur notre solution CPL et nous montrons qu'une solution de routage sur CPL doit être développée. Nous montrons par des expérimentations que notre solution CPL correspond aux critères des réseaux basse puissance et supportant les pertes de transmissions (LLNs) pour lesquels le protocole standard RPL a été conçu. Nous justifions l'utilisation de ce protocole sur CPL, et validons son implémentation dans le cadre de 2 expérimentations. Formées respectivement de 7 puis 26 noeuds CPL, les résultats montrent que le routage créé par RPL permet de couvrir un étage d'un bâtiment avec une topologie de type arbre et une profondeur de 3 sauts maximum. Nous montrons également que la technologie WPC permet une connectivité importante entre les noeuds du réseau et que la qualité des liens est fortement dynamique, mais que le routage permet de s'adapter à ces variations. Nous pointons également les limites de notre solution CPL qui présente des délais importants et des débits faibles, générant de contraintes fortes sur les applications. Notre solution de réseau de capteur sur CPL repose sur le standard IP, permettant des échanges de paquets avec d'autres technologies. Nous étudions ainsi la possibilité de créer des réseaux hétérogènes mélangeant la technologie WPC et radio 802.15.4. Nous montrons que notre pile protocolaire permet la création de ce type de réseau, afin de profiter du meilleur des 2 mondes. Nous décrivons ainsi l'architecture d'un noeud hybride Radio Fréquence (RF) / CPL permettant de faire transiter les paquets entre ces 2 médias. Nous montrons ensuite que l'utilisation combinée de ces 2 médias augmente le nombre de chemins disponibles et permet de faciliter le routage, en diminuant le nombre de sauts et le risque que certains noeuds du réseau soient inaccessibles. Nous démontrons ensuite que l'injection de noeuds CPL et RF/CPL dans un réseau formé de noeuds RF sur batterie permet de les délester de leur charge de routage afin de prolonger leur durée de vie. Nous présentons ensuite une optimisation énergétique matérielle et logicielle d'un noeud radio. Nous déterminons les paramètres des protocoles et les optimisations logicielles permettant de tirer au mieux partie de cette architecture et nous réalisons l'étude énergétique de la sonde embarquée sur le noeud. Au final, notre architecture présente une consommation totale inférieure à 17 μW. Nous indiquons dans les annexes nos implications dans les organismes de standardisation qui ont permis de valider l'implémentation.

Abstract

This thesis demonstrate the relevance of Powerline Communication (PLC) usage for sensor networks applications. We focus in particular on the low power and low data rate PLC technology "Watt Pulse Communication" (WPC) developed by the Watteco company and justify its usage for sensor network applications. We situate the WPC technology in the PLC landscape and define compatible protocols. We then describe the WPC module and the PLC media implementation in the COOJA network simulator. This allows us to propose a network solution over this technology, leveraging on the adaptation of the 802.15.4 standard over the WPC technology. We then demonstrate the benefit of media convergence at the network layer level, with the use of the IPv6 standard that we adapted over our PLC solution thanks to the 6LoWPAN protocol. We justify the usage of standards protocols over our PLC solution and show that a routing solutions must be developed over WPC. We show through experiments that our PLC solution match low power and lossy network (LLNs) criterions for which the RPL standard protocol has been designed. We justify the usage of this routing protocol over our PLC solution, and validate its implementation through 2 experiments conducted in tertiary types buildings. Respectively composed of 7 and 26 PLC nodes, results show that the routing topology created by RPL enable the coverage an entire floor of a tertiary building with a tree based topology and 3 hops maximum path length. We also show that the WPC technology exhibits a high connectivity between nodes and that the link quality is highly dynamic. Though, we observed that the routing topology was able to handle these variations. We point out the limitations of our PLC solution, which presents high delays and low throughput, creating high constraints on applications. Our sensor network solution over PLC relies on the IP standard, enabling packets exchanges with other technologies using the same protocol. In particular, we study the possibility to create heterogeneous networks mixing the WPC technology with 802.15.4 radio. We show that our protocol stack used over PLC enable to create this type of network, in order to benefit from the best of these 2 worlds. We purpose an architecture of a hybrid Radio / PLC node enabling to transfer packets between these 2 media. Then, we show that the combined usage of these 2 media increase the number of available paths and facilitate the routing, while diminishing the number of hops and possible unreachability of nodes. We then demonstrate that the addition of PLC and Radio/PLC nodes in a RF based battery powered sensor network enable to relieve their routing charge in order to expand their lifetime. We then continue the energy study with a power consumption optimization of a wireless sensor network platform from the hardware and software standpoint. We first determine the operating frequency, the wake up frequency and the mode of operation of the micro controller offering the lowest power consumption. We then conduct an energy study of 4 different radio transceivers using the 2.4 GHz and 868 MHz frequency band, in order to determine the most efficient architecture. We determine the protocols parameters and the software optimization to reach the lower power consumption of this architecture. Finally, we realize the energy study of several probes than can be embedded on the node, according to their nature and functioning mode. Our final architecture exhibits a total power consumption that is lower than 17 μW, with an applicative reporting each 10 minutes and the maintenance of the reachability with the network. We also mention in annex parts our implication in standards developments organizations such as the IETF a the IPSO alliance, that allow us to validate the implementation of our solution through interoperability events.

Contents

Glossaire . . . 5
Positionnement de la thèse . . . 6

1 Introduction **10**
1.1 La 3ème vague de l'internet : L'internet des objets . . . 11
1.2 Exemples d'applications de l'internet des objets . . . 14
1.2.1 Instrumentation des bâtiments . . . 14
1.2.2 Réseaux Electriques Intelligents . . . 16
1.2.3 Autres types d'applications . . . 17
1.3 L'hétérogénéité dans les réseaux de capteurs . . . 18

2 Etat de l'art des réseaux de capteurs **21**
2.1 Académique . . . 23
2.1.1 Micro Systèmes d'Exploitation . . . 24
2.1.2 Simulateurs . . . 26
2.1.3 Plateformes matérielles . . . 29
2.1.4 Recherches appliquées au CPL . . . 30
2.2 Standardisation . . . 32
2.2.1 IEEE . . . 32
2.2.2 IETF . . . 37
2.2.3 ETSI . . . 44
2.3 Alliances industrielles . . . 44
2.3.1 IPSO . . . 45
2.3.2 Enocean . . . 45
2.3.3 ZigBee . . . 46
2.3.4 Zwave . . . 46
2.3.5 Dash7 . . . 46
2.3.6 Wave2m . . . 47
2.3.7 G3 alliance . . . 48
2.3.8 PRIME Alliance . . . 49
2.3.9 Homeplug Powerline Alliance . . . 51

3 Le CPL **52**
3.1 Présentation du média . . . 53
3.1.1 Principe du CPL . . . 53
3.1.2 Approche théorique et modèles . . . 57
3.1.3 Les transmissions CPL d'un point de vue pratique . . . 59
3.1.4 Les régulations, les normes et les standards . . . 66
3.1.5 La consommation électrique . . . 66
3.2 Comparaison des solutions CPL existantes . . . 67

3.2.1 Solutions "historiques" . . . 67
3.2.2 Solutions à haut débit . . . 68
3.2.3 Solutions à bas débit . . . 68
3.2.4 Comparatif des solutions CPL existantes . . . 68
3.2.5 Produits CPL . . . 69
3.3 Technologie WPC . . . 70
3.3.1 L'importance de la consommation énergétique sur le CPL . . . 70
3.3.2 Caractéristiques principales de la technologie WPC . . . 70
3.3.3 Principe du WPC : le pulse . . . 70
3.3.4 Applications . . . 73
3.3.5 Coexistence . . . 73
3.4 Conclusion . . . 74
3.4.1 Avantages du CPL . . . 74
3.4.2 Inconvénients du CPL . . . 75
3.4.3 Challenges et travaux futurs . . . 76

4 Simulation de la technologie WPC 77
4.1 Avantages et limites de la simulation CPL . . . 77
4.2 Choix du simulateur . . . 77
4.3 Comparaison entre RF et CPL dans la simulation . . . 78
4.3.1 Similitudes . . . 78
4.3.2 Différences . . . 79
4.4 Intégration de la technologie WPC dans le simulateur COOJA . . . 79
4.4.1 Architecture de COOJA . . . 79
4.4.2 Approche de la simulation . . . 81
4.4.3 implantation du média CPL dans COOJA . . . 82
4.4.4 implantation d'un noeud WPC dans COOJA . . . 85
4.5 Tests et résultats de l'implantation . . . 87
4.5.1 Comportement . . . 87
4.5.2 Comportement de la couche MAC . . . 89
4.5.3 Limites et perspectives . . . 91
4.6 Conclusion . . . 92

5 Intégration du média CPL dans les réseaux de capteurs 93
5.1 Introduction . . . 94
5.2 IEEE 802.15.4 : Une solution d'adaptation au niveau MAC pour le CPL . . . 94
5.3 implantation du standard IEEE 802.15.4 sur CPL . . . 95
5.3.1 Emulation d'un transceiver RF sur CPL . . . 95
5.3.2 Adaptation au niveau physique . . . 96
5.3.3 Adaptation au niveau MAC . . . 96
5.3.4 Résultats de l'adaptation . . . 97
5.4 Expérimentations . . . 97
5.4.1 Description du matériel . . . 97
5.4.2 Description Matérielle . . . 99
5.5 Résultats de l'adaptation . . . 99
5.6 Conclusion . . . 102
5.6.1 Niveau d'interopérabilité possible . . . 102
5.6.2 Architecture d'un réseau hétérogène . . . 102
5.6.3 Ouverture au protocole de routage RPL . . . 103

6 Routage sur CPL **104**
6.1 Le besoin du routage sur un média câblé . . . 105
6.2 Critères du routage sur CPL . . . 106
6.3 Etat de l'art des protocoles de routages adaptés au CPL . . . 108
6.4 Description et applicabilité du protocole RPL au CPL . . . 109

7 Expérimentations **112**
7.1 Implémentation et paramétrage de RPL adapté au CPL . . . 113
7.2 Déploiement au laboratoire CITI . . . 114
7.2.1 Topologie . . . 115
7.2.2 Résultats . . . 120
7.2.3 Discussions . . . 121
7.2.4 Simulation des topologies dans COOJA . . . 122
7.3 Déploiement au laboratoire LIG . . . 127
7.3.1 Description de l'expérience . . . 127
7.3.2 Paramètres de l'expérience : . . . 128
7.3.3 Résultats . . . 129
7.4 Conclusion . . . 138

8 Optimisation de l'énergie dans les WSN **140**
8.1 Optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs RF . . . 141
8.1.1 Approches classiques d'optimisation énergétique . . . 141
8.1.2 Approches classiques : les limites de l'intégration . . . 144
8.1.3 Implémentation d'une solution complète basse consommation . . . 144
8.1.4 Performances énergétique de la plateforme . . . 152
8.1.5 Améliorations envisagées . . . 156
8.1.6 Conclusion . . . 159
8.2 Optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs CPL . . . 159
8.3 Utilisation de réseaux hybrides RF/CPL . . . 160
8.3.1 Prérequis et faisabilité . . . 162
8.3.2 Etat de l'art des réseaux hétérogènes . . . 162
8.3.3 Motivations . . . 163
8.3.4 Proposition d'architecture . . . 164
8.3.5 Conclusion . . . 166

9 Conclusion Générale **167**
9.1 Accomplissements . . . 168
9.1.1 Pertinence du CPL pour les réseaux de capteurs . . . 168
9.1.2 Solutions d'intégration du CPL à l'Internet des objets . . . 169
9.1.3 Importance du routage pour le CPL . . . 170
9.2 Les limites et les améliorations possibles . . . 170
9.3 Le CPL : un média a considérer pour l'avenir ? . . . 171
9.4 Perspectives . . . 172

10 Annexes **173**
10.1 Contribution aux organismes de standardisation . . . 174
10.1.1 Investissement dans l'alliance IPSO . . . 174
10.1.2 Draft IPSO profile . . . 174
10.1.3 Draft OMA LWM2M . . . 174
10.1.4 Draft-hui-vasseur-roll-rpl-deployment-02 . . . 174

10.2 Publications 175
10.2.1 802.15.4, a MAC layer solution for PLC 175
10.2.2 Interoperable IPv6 sensor networking over PLC and RF media 175
10.2.3 A communication stack over PLC for multi physical layer IPv6 Networking 175
10.2.4 RPL : The IP routing protocol designed for low power and lossy networks 175
10.2.5 Heterogeneous IPv6 Infrastructure for Smart Energy Efficient Building . . 176
10.2.6 Simulation of the RPL Routing Protocol for IPv6 Sensor Networks: two cases studies 176
10.2.7 Poster Abstract: Interconnecting Low-Power Wireless and Power-Line Communications using IPv6 176
10.2.8 Qualification and performance of WPC component in Homes environments 176
10.2.9 Heterogeneous PLC-RF networking for LLNs 177
10.2.10 Standardized and flexible IPv6 Architecture for Advanced Metering Infrastructure (AMI) Networks 177
10.2.11 IPv6 (Internet Protocol version 6) heterogeneous networking infrastructure for energy efficient building 177
10.2.12 RPL deployment experience in large scale networks 177
10.2.13 The IPSO Application Framework 178
10.2.14 Wireless IPv6 Sensor Nodes Energy Evaluations 178
10.2.15 Energy Evaluations for Wireless IPv6 Sensor Nodes 178
10.3 Formations suivies dans le cadre des études de l'école doctorale 178
10.4 Participations aux conférences 178

Glossaire

6LoWPAN IPv6 LoW Power wireless Area Networks

CoAP Constrained Application Protocol

CPL Courant Porteur en Ligne

DAG Directed Acyclic Graph

IP Internet Protocol

LLN Low power and Lossy Networks

ND Neighbor Discovery

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

RF Radio Fréquence

RPL IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks

ZCL Zigbee Cluster Library

Positionnement de la thèse

Contexte

Cette thèse a été financée par une convention CIFRE entre l'entreprise Watteco et le laboratoire CITI pour les deux premières années puis le laboratoire LIG pour la dernière année, le tout en collaboration avec le LCIS. Le domaine d'activité de l'entreprise Watteco se concentrait à l'époque sur les communications Courant Porteur en Ligne (CPL), par l'utilisation de sa technologie "Watt Pulse Communication" (WPC). La particularité de cette technologie est qu'elle repose sur le principe de la génération d'une simple impulsion ("pulse") qui permet de réaliser un émetteur/récepteur CPL avec très peu de composants, réduisant de manière très importante, le coût, la taille et la consommation du système communiquant. D'autre part, les laboratoires CITI et LIG sont des laboratoires de recherche dans le domaine des réseaux, et qui se sont récemment intéressés aux réseaux très contraints que l'on appelle les réseaux de capteurs. Ce nouveau type de réseaux reposent aujourd'hui quasiment uniquement sur des technologies RF. Or, nous verrons dans cette thèse que de nombreux rapprochements peuvent être fait entre les caractéristiques des technologies RF utilisées dans les réseaux de capteurs et la technologie WPC développée par Watteco, notamment du point de vue des contraintes de consommation d'énergie, de débit, de fiabilité, d'architecture matérielle et logicielle. Cette thèse CIFRE permet donc de rapprocher un industriel développant une solution de communication CPL et des laboratoires de recherche disposant d'une expertise dans les réseaux de capteurs.

Cette thèse a pour but d'évaluer le potentiel de l'intégration de la technologie CPL, et en particulier de la technologie WPC dans les réseaux de capteurs. Par extension, elle s'intéressera de manière générale à l'intérêt de l'hétérogénéité des médias dans les réseaux de capteurs, notamment par le mélange de la technologie CPL avec les technologies RF.

Nous commencerons dans l'introduction par décrire les caractéristiques des réseaux de capteurs en général, en insistant sur la très forte variété des applications, des contraintes, et des environnements dans lesquels ils seront déployés. Cet angle de vision mettra en évidence la nécessité de recourir à plusieurs technologies, partant du principe qu'une solution unique n'est pas envisageable dans ce futur "internet des objets" pour couvrir tous les besoins. Nous décrirons plus particulièrement les applications de type instrumentation des bâtiments et réseaux électriques intelligents (ou "smart grid") qui seront les types d'applications considérées lors des expérimentations. Nous feront ensuite dans le chapitre 2 un état de l'art des recherches académiques dans les réseaux de capteurs, des standards existants et des efforts industriels engagés dans ce domaine. Cet état de l'art nous permettra de détailler la diversité des technologies et des contraintes des réseaux de capteurs, et d'évoquer les solutions logicielles développées par les organismes de standardisation. Nous feront ensuite le point sur l'ensemble des technologie CPL au chapitre 3. Nous classerons les différentes solutions CPL existantes selon leur type, et nous confronterons les modèles théoriques à nos expérimentations réelles. Nous détaillerons ensuite la technologie WPC développée par Watteco qui sera la base de travail de nos travaux menés ici. Cette description nous permettra de mettre en évidence les similitudes entre cette technologie et les technologies RF des réseaux de capteurs afin de justifier l'utilisation des mêmes protocoles sur ce média. Pour évaluer ces protocoles dans un environnement maîtrisé, nous avons réalisé l'implémentation de cette technologie dans le simulateur COOJA. Le chapitre 4 décrit cette implémentation du média CPL ainsi que de la technologie WPC et de la plateforme communicante utilisant cette technologie. Nous étudions ensuite dans le chapitre 5 comment interfacer les protocoles 6LoWPAN, IPv6 et RPL avec la technologie WPC. Nous présentons une adaptation du standard IEEE 802.15.4 sur cette technologie, et discutons ce choix, en validant l'adaptation par des expérimentations. Cette adaptation permet de rendre compatible

la technologie WPC avec les standards IETF ouverts de l'internet des objets, et de permettre l'intéropérabilité avec d'autres technologies, par l'utilisation de standards communs. Les premières expérimentations montrent les limites de la communication directe CPL, nécessitant la mise en oeuvre d'un protocole de routage afin d'étendre la portée du CPL via des topologies multi-sauts. Nous étudions pour cela au chapitre 6 la portabilité du protocole de routage RPL sur CPL, et détaillons l'implémentation et les paramètres adéquats. Nous montrons dans le chapitre 7 que ce protocole s'adapte aux contraintes du CPL, et vérifions par des simulations et des déploiements réels que ce protocole répond aux contraintes de l'application et de la technologie. Disposant désormais d'une solution de réseau standardisée au dessus de la technologie WPC, nous aborderons ensuite dans le chapitre 8 l'utilité des réseaux hétérogènes utilisant plusieurs média. Dans le but d'intégrer des architectures RF à des topologies CPL pour créer des architectures hybrides RF/CPL à longue durée de vie, nous décrirons une architecture RF très basse consommation. L'architecture RF que nous décrivons repose sur des mécanismes issus de état de l'art de la recherche et utilise des plateformes matérielles récentes dont les consommations d'énergie sont limitées. Les performances énergétiques de la plateforme créée permet d'envisager son alimentation par un système de récupération d'énergie afin de garantir son autonomie énergétique. La pile protocolaire animant cette architecture et permettant d'optimiser sa consommation d'énergie repose sur les protocoles étudiés dans les parties précédentes sur le CPL. Nous concluons par l'étude des architectures hybrides RF/CPL. Nous validons les avantages et identifions les inconvénients de ce type de topologie à travers des simulations puis des expérimentations réelles.

Présentation du laboratoire LIG

Le Laboratoire d'Informatique de Grenoble (LIG) est un laboratoire créé en 2007 autour d'un projet scientifique fédérateur et de trois principes de gouvernance :

Excellence scientifique : favoriser l'excellence scientifique en constituant un pôle attractif et visible, et en apportant un soutien aux personnels du laboratoire pour permettre une réussite individuelle et collective.

Transparence : le LIG s'engage dans une gouvernance où les processus de décisions sont validés par les chefs d'équipe et le conseil de laboratoire.

Subsidiarité : accompagner la dynamique scientifique, la gestion et l'évolution des équipes tout en respectant une certaine subsidiarité vis-à-vis des équipes (propositions de projets, gestions de contrats de recherche, politique de publications).

Le LIG fait partie du pôle académique grenoblois dans le domaine STI (Sciences et Technologies de l'Information) qui regroupe près de 1500 chercheurs et enseignants-chercheurs. La communauté universitaire se structure en 7 entités, dont 4 sont centrées sur les disciplines fondamentales du secteur STI (Science et technologies de l'Information) que sont l'Informatique (le LIG), Informatique et Systèmes Embarqués (VERIMAG), les Mathématiques Appliquées et l'Image (le LJK) et l'Automatique et le Signal (le GIPSA), et 3 sont pluri-disciplinaires — Informatique et Santé (TIMC-IMAG), Informatique et Systèmes de Production (le G-SCOP), Informatique et MicroElectronique (TIMA). Dans ce contexte, le LIG rassemble une majorité des forces académiques sur le thème de l'informatique de manière à répondre à des défis d'envergure et à être un pôle attracteur et de référence en Europe.

Je suis rattaché à l'équipe Drakkar. Cette équipe du LIG s'intéresse aux réseaux informatiques et mobiles. Depuis plusieurs années, l'équipe s'est focalisée sur les réseaux ambiants : Comment fournir une connectivité partout et de manière transparente aux utilisateurs mobiles,

sur différentes technologies RF. De plus, l'équipe a travaillé sur l'intégration de l'information du monde physique dans les réseaux actuels et a étudié de nouvelles manières de supporter les communications collaboratives. Les objectifs de recherche viennent de l'observation que les communications sans fils présentent un certain nombre de contraintes : les liens sans fils sont très différents des liens câblés, le schéma d'adressage et la hiérarchie rigide de routage ne lui permettent pas d'adresser efficacement les terminaux mobiles, et le coeur de l'infrastructure de réseau ne correspond pas aux exigences de dynamique et de spontanéité des opérations. La plupart des efforts se sont concentrés dans l'apport de solutions à tous ces problèmes et le développement des bases pour le futur internet sans fil ubiquitaire. Plus spécifiquement, l'équipe considère plusieurs aspects dans les thèmes suivants :

- Réseaux locaux sans fils (WLAN - 802.11, Bluetooth, protocoles MAC avancés)
- Réseaux mesh (protocoles MAC avancés, protocoles de routage, interactions inter-couches)
- Mobilité transparente (séparation localité-identité, service de localisation)
- Réseaux de capteurs et d'actionneurs (protocoles de conservation d'énergie, 802.15.4-ZigBee, Internet des Objets

Cette thèse s'inscrit principalement dans le dernier thème cité.

Présentation du laboratoire LIG

Le Laboratoire de Conception et d'Intégration des Systèmes (LCIS - EA 3747) a depuis son origine en 1996 engagé ses premiers travaux sur les systèmes embarqués et communicants. L'équipe Conception et Tests des Systèmes (CTSYS) du laboratoire LCIS est une jeune équipe dont les thématiques s'orientent autour de la conception et le test des systèmes en réseaux a contribué aux ouvrage de référence : Réseaux de terrain Description et critères de choix (Hermès 1998) et Réseaux de terrain : Critères de sureté de fonctionnement (Hermès 2009). Le LCIS possède une expertise technique reconnue dans la conception et la mise en œuvre de solutions intégrées (réseaux de capteurs/actionneurs et passerelles) car elle a eu responsabilité du développement et de l'intégration du démonstrateur français de bâtiment économe en énergie dans le projet ITEA2-OSAmI (TSI-020400-2009-92). Les prochains efforts de l'équipe se porteront sur le projet Artemis-Arrowhead 2013-2017 qui a pour objectif d'accroître l'efficacité énergétique dans une utilisation plus flexible de l'énergie grâce à la coopération dans les bâtiments, les infrastructures publiques, les procédés industriels et le secteur de l'énergie, en utilisant des technologies embarqués.

Présentation de l'entreprise Watteco

Watteco (`www.watteco.com`) est un expert mondial de solutions réseau multiPHY (RF et CPL) utilisant le standard 6LoWPAN. L'entreprise développe des solutions pour l'instrumentation des bâtiments et les réseaux électriques intelligents. Conscient de la diversité qu'impliqueront ces applications, Watteco a concentré ses efforts de recherche et développement sur l'interopérabilité des objets intelligents en utilisant l'architecture IPv6. En utilisant une pile de communication 6LoWPAN, reposant sur le standard et les services IPv6 dédiés aux réseaux basse énergie et supportant les pertes de communication, Watteco veut valoriser les bénéfices de l'intéropérabilité entre la RF et le CPL.

Watteco dispose de nombreuses compétences dans les protocoles créés autour de 6LoWPAN et participe activement dans plusieurs alliances industrielles telles qu'IPSO ou collabore avec des universités telles le SICS qui développe le micro OS Contiki. Cette expertise est aujourd'hui

largement reconnue à travers le monde et Watteco la fournit à travers ses solutions d'ingénierie pour faciliter la mise en réseau des systèmes embarqués et permettre leur interopérabilité.

Watteco fournit les solutions suivantes :

- **Une pile de communication 6LoWPAN** adaptée à des réseaux très basse consommation RF ou PLC.
- **Des références design 6LoWPAN** pour des application de contrôle commande.
- **Des services d'ingénierie 6LoWPAN** : Support matériel et logiciel pour l'implémentation d'architectures 6LoWPAN dans d'actuelles ou de futures plateformes d'objets intelligents.

Watteco propose à la vente un certain nombre d'objets intelligents depuis 2012 :

- **SmartPlugs** : Mesure de consommation électrique, fonction ON/OFF, variation de la puissance.
- **Capteurs sans fil** : Mesure de température, CO2, présence, lumière, humidité, ouverture/fermeture de porte
- **Plateforme de développement** supportant de multiples interfaces physiques (plusieurs bandes RF et CPL)

Chapter 1

Introduction

1.1 La 3ème vague de l'internet : L'internet des objets

Les réseaux au sens large ont été créés pour connecter des machines entre elles. Cela est d'autant plus vrai que le réseau de machine est immanquablement associé à un réseau informatique. Cette vision tend toutefois à se diversifier depuis l'émergence des réseaux sociaux qui montrent que les réseaux ne sont en fait qu'un ensemble d'outils nécessaires à des communications. Dans ce dernier cas, les entités du réseau ne sont plus uniquement des machines mais des personnes. Ce n'est plus l'ordinateur de Bob qui envoie des messages à l'ordinateur d'Alice, mais bien Bob qui parle à Alice par l'intermédiaire d'un compte "en ligne" qui n'est pas lié à une machine en particulier. Bob et Alice disposent désormais chacun de leur écosystème virtuel qui les accompagne partout, par l'intermédiaire de leur compagnon numérique tel que les smartphones.

Néanmoins, le monde dans lequel vivent Alice et Bob ne se limite pas seulement à un smartphone ou un compte Facebook. Il comprend également une maison, une voiture, un bureau et bien d'autres choses qui ne font pas encore partie de leur profil numérique. Ces objets ne sont pas encore dans le prolongement de leur écosystème numérique. Ainsi, même si Bob peut en un clic partager une photo de vacance avec toute sa famille, il doit attendre la fin du mois pour constater sur sa facture qu'il a une fuite d'eau. De même, il sera instantanément averti par SMS quand son équipe de football préférée a marqué un but mais ne découvrira qu'à son retour de vacances que sa maison a été cambriolée ...

Il semble évident que la communication transmise vers les personnes aujourd'hui puisse avoir une grande utilité pour tous les objets qui nous entourent, et c'est exactement sur ce constat que le concept d'internet des objets est né. L'émergence de cette nouvelle frange de l'internet fera passer le nombre d'appareils connectés à un ordre de grandeur supérieur, comme représenté sur la figure 1.1, issue du livre "6LoWPAN, the Wireless Embedded Internet" [1].

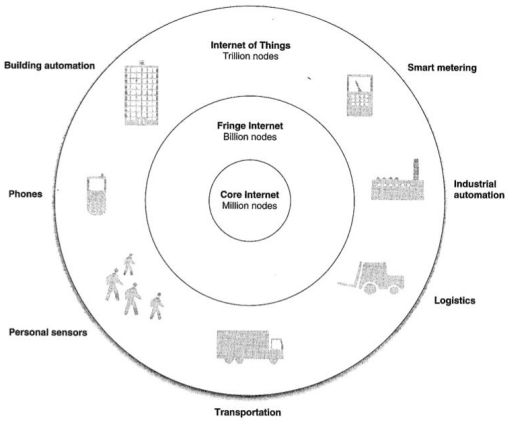


Figure 1.1: La vision de l'internet des objets (d'après [1])

Cette figure donne également un aperçu du très large spectre d'applications de l'internet des objets.

L'idée fondamentale de ce concept consiste à ajouter de la communication à la plupart des objets qui nous entourent, afin de les faire collaborer pour les rendre plus efficaces. Cette communication peut se faire entre objets, afin qu'ils puissent prendre des décisions de manière autonome. Par exemple, un capteur tel qu'un détecteur de présence agira sur un actionneur pilotant l'éclairage. Mais l'intérêt principale est de rendre accessible les ressources de ces objets depuis tout point du réseau vers un utilisateur ou une intelligence déportée qui déclenchera des

actions à distance ou à partir d'un ensemble de règles.

Comme décrit précédemment, notre profil "en ligne" n'est plus lié à une machine en particulier et passe par des services et des données déportées, dans ce qui s'appelle le "cloud". De ce fait, l'utilisation de l'infrastructure du réseau internet est inévitable pour permettre des échanges entre le ou les utilisateurs, et ces nouveaux objets communicants. Ces objets devront donc être capables de créer et de maintenir leur connexion à un réseau. Ces objets connectés sont aussi appelés objets "intelligents", car ils devront être capables de participer à des prises de décisions par une application. De par leur nature, ils impliquent de très nombreuses contraintes qui n'ont pas été considérées pour les réseaux classiques, historiquement composés de machines et d'équipements dédiés à la communication. Voici une liste non exhaustive des principales contraintes que présentent ces objets, complétée d'une brève description :

Energie : Les objets qui nous entourent ne disposent pas tous d'une source d'énergie. Ajouter de la communication à un système nécessite forcément de l'énergie pour envoyer et recevoir des messages. Cette nouvelle fonctionnalité ajoutera donc systématiquement un surcoût énergétique. Dans le meilleur des cas, l'objets communicant pourra produire sa propre énergie grâce à un système de récupération d'énergie, et si ce n'est pas possible, il devra veiller à économiser sa source d'énergie afin d'atteindre une durée de vie acceptable vis à vis de l'application. Au global, si l'énergie dépensée pour tous ces d'objets connectés n'est pas maîtrisée, le surcoût énergétique pourrait être considérable.

Coût : Critère majeur dans les considérations industrielles, sa prise en considération semble évidente pour atteindre un jour un marché de taille mondiale. Si la loi de Moore permet d'avoir un coût qui reste relativement stable au fur et à mesure des évolutions du matériel, il est intéressant de constater que la majorité du coût d'un objet communiquant, tel qu'un capteur sans fil, repose essentiellement sur le prix du matériel qui le compose. Le logiciel embarqué n'est pas forcément valorisé, en particulier parce qu'il existe des solutions open-source ([2, 3]). De plus les modèles économiques sur ces réseaux peuvent inclure la souscription à des services qui rentabilisent le matériel à terme. Cela reste moins vrai avec des solutions propriétaires, industrielles, ou vendues sous licences commerciales.

Taille : La plupart des objets qui nous entourent ne doivent pas changer radicalement de forme pour inclure une fonction de communication. Cette intégration doit être transparente pour l'utilisateur. Les progrès technologiques, suivant la loi de Moore, aident à miniaturiser les systèmes pour faciliter leur intégration.

Durée de vie : Le système communicant doit avoir une durée de vie au moins égale à celle de l'objet sur lequel il est intégré. Ainsi selon l'application et ses contraintes, le système devra être opérationnel de quelques mois à plusieurs années. Dans le cas d'instrumentations de bâtiments, les capteurs doivent pouvoir durer autant de temps que l'utilisation du bâtiment soit jusqu'à plusieurs dizaines d'années. Une telle durée de vie est difficile à atteindre aujourd'hui pour des objets intelligents, notamment pour des raisons énergétiques et de vieillissement des composants électroniques. Une maintenance à très bas coût ou un remplacement complet du système pourra être acceptable suivant l'application.

Mobilité : Le coût du câblage d'un réseau est prohibitif pour permettre un déploiement à large échelle d'objets communicants, ce qui fait des transmissions sans fil une solution idéale. Nous verrons également dans cette thèse que l'utilisation de câbles électriques existants par la technologie CPL permet de s'affranchir du coût de nouveaux câbles tout en permettant d'alimenter le noeud en énergie. La mobilité des objets communicants dépend fortement

de l'application, et nous ne considèrerons pas ici des réseaux mobiles, mais des objets qui peuvent être déplacés durant leur durée de vie.

Maintenance : Les objets qui ne seront pas connectés à une source d'énergie ni pourvu d'un système de récupération d'énergie seront alimentés par des batteries qui devront êtres changées d'autant plus régulièrement que la consommation du système sera importante. Etant donné le nombre très important d'objets qui seront connectés, changer régulièrement les piles de tous ces objets n'est pas envisageable. Cela aurait un coût de maintenance très élevé, et produirait des montagnes de piles usagées à recycler. De plus, certains capteurs seront installés de manière définitive et n'ont pas vocation à bénéficier de maintenance. Par exemple des capteurs enfouis dans une structure pour surveiller les caractéristiques mécaniques d'un ouvrage ou d'un bâtiment ne seront tout simplement pas accessible physiquement. De plus, les durées de vie envisagées pour ces nouveaux objets communicants impliqueront nécessairement des mises à jour logicielles, qui devront pouvoir être effectuées simplement, sans démontage et sans sonde de reprogrammation, rendant nécessaire leur mise à jour à distance.

Robustesse : Ces objets doivent pouvoir communiquer avec un certaine qualité de service dans l'environnement dans lequel il seront déployés. Cet environnement pourra être fortement dynamique et impliquer parfois de grandes distances, de multiples obstacles à la communication ou de la coexistence avec d'autres technologies. L'environnement peut également être agressif vis à vis de systèmes électroniques. La communication devra donc tenir compte de cette dynamique et ajustant la fréquence et la modulation utilisée, ou encore la fréquence et la taille des messages. Les objets déployés devront permettre une communication sur des liens dont la qualité sera fortement variable, et donc gérer une topologie de routage dynamique et capable de s'auto-configurer pour garantir un bon niveau de sûreté de fonctionnement.

Puissance de calcul : Ces objets sont amenés à être utilisés pour de multiples applications, parfois complexes qui peuvent demander d'importantes puissances de calcul. Par exemple, un capteur devra être capable de s'intégrer et de gérer automatiquement son association à un réseau, gérer sa communication, les évènements qu'il détecte, son énergie etc. Pour répondre aux contraintes précédentes, ces objets ne pourront pas embarquer de processeurs puissants et devront donc pouvoir réaliser toutes ces tâches avec des ressources matérielles limitées. Certains protocoles existant sont capables de réaliser ces tâches mais ont été créés pour des machines non contraintes, impliquant parfois une adaptation ou de nouveaux protocoles adaptés à ces nouveaux objets.

Simplicité d'utilisation et de configuration : Ces objets sont amenés à faire partie de notre quotidien, et donc à être utilisés de manière intuitive. Une trop grande complexité d'utilisation ou de configuration serait un frein majeur à leur déploiements et à leur acceptation. Le niveau de complexité acceptable dépendra également de l'utilisateur, et de son niveau de connaissance.

Sécurité : La multiplication de ces objets et leur possible intrusion dans notre vie quotidienne et nos usages implique un très fort besoin de sécurité des données transmises. Il n'est pas acceptable que nos données personnelles puissent êtres récupérées à des fins malicieuses, ou qu'une faille de sécurité permette de prendre le contrôle de nos objets à distance. Les données échangées entre capteurs pouvant utiliser des liens RF, ces informations pourraient être récupérées depuis l'extérieur. Pour éviter cela, un mécanisme de cryptage des données sera nécessaire. De même pour éviter les "replay attack", un séquencement des échanges

sera nécessaire afin de détecter les doublons malicieux. Enfin, le mécanisme d'association d'un capteur au réseau devra s'assurer que ce nouveau noeud n'est pas malicieux via une authentification. Le manque de sécurisation des données collectées peut être un frein important au développement et à l'acceptation de l'internet des objets.

Ces nombreuses contraintes sont autant de challenges à relever pour que l'internet des objets arrive au stade de la maturité industrielle. Nous verrons dans le chapitre suivant que la plupart de ces contraintes ont été identifiées dès l'émergence de ce secteur et que l'état de la recherche actuelle permet de répondre à la plupart d'entre eux. Nous verrons en particulier quelles réponses techniques ont été apportées, et quel niveau de satisfaction est atteint pour ces critères.

1.2 Exemples d'applications de l'internet des objets

Nous détaillons dans ce mémoire 2 applications typiques de l'internet des objets, qui seront développées par la suite dans le cadre des expérimentations que nous avons menées. D'autres types d'applications sont évoquées à la fin de ce paragraphe, présentant une vision complète des domaines d'applications de l'internet des objets.

1.2.1 Instrumentation des bâtiments

Cette application sera le principal cas d'usage considéré dans cette thèse. Une illustration est donnée par la figure 1.2. Cette instrumentation comprend deux principaux types d'objets connectés : Les capteurs et les actionneurs. Chaque pièce du bâtiment instrumenté comprend en général plusieurs capteurs qui mesurent des grandeurs physiques telles que la température, l'humidité, la luminosité, la présence de personnes, la concentration de certains gaz (CO2, et autres Composés Organiques Volatiles (COV) ...), ou encore l'état des ouvrants (fenêtres, portes). Les consommations énergétiques telles que l'eau, le gaz et l'électricité sont également souvent mesurées, car elles représentent une source de données précieuses pour l'occupant et le gestionnaire. Ces mesures peuvent être réparties dans plusieurs zones du bâtiment, afin d'avoir une granularité plus fine de la mesure. Par exemple, on pourra mesurer la consommation électrique de certaines machines ou groupes de machines particulièrement consommateurs tels que les serveurs, ou mesurer un groupe d'équipements électriques à partir d'un point particulier dans le tableau électrique. Des exemples de ces capteurs sont donnés dans la suite de la thèse.

Les plupart des actionneurs sont déjà présents dans les bâtiments et leur instrumentation se limite souvent au contrôle de de multiples systèmes pour la plupart peu interopérable. Les principaux actionneurs sont le chauffage, la ventilation et la climatisation (HVAC), l'éclairage, les portes automatiques, les systèmes de sécurité tels que les buses anti-incendies ou les alarmes, les volets électriques, ou encore les ascenseurs. Certains actionneurs peuvent être rajoutés, pour permettre de piloter à distance des équipements électriques via un simple relais, un gradateur ou encore un fil pilote s'il est présent. On ajoutera ainsi une fonction de contrôle à des équipements non-pilotables à l'origine, ou on découplera des équipement dont la commande était centralisée.

Ce réseau d'objets intelligents présente plusieurs bénéfices pour les occupants, et les fournisseurs d'énergies. Il peuvent envoyer des alertes lors des surconsommations, des fuites ou d'intrusions, permettre une visibilité sur les dépenses énergétiques afin d'envisager une gestion plus efficace, jouer des scénarios afin de répartir les dépenses énergétiques en tirant partie des différents tarifs énergétiques, éteindre automatiquement des appareils en veille ou inutilisés, ou améliorer le confort de vie des occupants par des automatismes.

Dans ce cas, fournir à l'occupant des informations détaillées en temps réel de sa consommation énergétique peut avoir un effet pédagogique. L'analyse de ces consommations permettront

Figure 1.2: Exemple d'instrumentation d'un bâtiment (© Spintel)

à l'utilisateur d'identifier ses principaux postes de dépenses énergétiques. Cette analyse pourra également l'amener à des recommandations pour faire baisser sa consommation énergétique, en l'invitant à s'équiper d'un système avec un meilleur rendement ou ou l'avertissant de matériels défaillants ou énergivores.

Les réseaux créés dans ce cas d'usage sont de taille modeste (quelques dizaines de capteurs) pour des habitations individuelles, mais peuvent contenir jusqu'à plusieurs centaines de capteurs et d'actionneurs dans des bâtiments de type tertiaires. Comme nous le verrons dans les expériences, la densité de noeuds et l'environnement même de l'habitat peuvent rendre difficile les communications au sein de ces réseaux, à cause des nombreux murs, obstacles et étages à traverser, et de la coexistence avec d'autres technologies de communications utilisant également les bandes RF sans license (ISM) telles que WiFi ou Bluetooth.

Il est évident que des enjeux non-techniques (sociaux par exemple) viendront jouer un rôle important dans ces applications, en particulier concernant la publication et l'accès à ces données, impliquant des besoins impératifs sur la sécurisation et le cryptage de ces communications. Le volume et la pertinence des données qui seront enregistrées est difficile à estimer aujourd'hui mais les réseaux sociaux donnent déjà une première indication sur le volume d'information que peut générer un utilisateur.

1.2.2 Réseaux Electriques Intelligents

Souvent dénommés par leur appellation anglaise "Smart grid" ce nouveau type de réseau de communication repose sur des réseaux de distribution d'énergie représenté sur la figure 1.3. Alors que l'instrumentation des bâtiments permet une gestion locale l'énergie, les smartgrids gèrent la distribution, le comptage et le routage de l'énergie au niveau global, c'est à dire entre les bâtiments. La communication qu'apporte le smartgrid présente un intérêt pour tous les niveaux du réseau énergétique, soit les systèmes de production centralisés, le réseau de transmission, le réseaux de distribution, et les sources d'énergies distribuées telles que les systèmes photovoltaïques ou éoliens. Ces nouvelles sources d'énergie introduisent une complexité dans la gestion du réseau énergétique car il créent des flux d'énergie dans le sens inverse du flux classique qui va des systèmes centralisés vers les clients. La croissance importante de ces système et leur connexion à un réseau existant quasi centenaire crée des problèmes pour absorber l'énergie qu'ils produisent, la comptabiliser, la facturer, la redistribuer dans le réseau ou la stocker. Aujourd'hui l'énergie produite par ces systèmes distribués est directement consommée, ou perdue si le réseau ne peut pas l'absorber et qu'un système se stockage n'est pas disponible.

Les smartgrids permettent d'augmenter la performance et la fiabilité du réseau énergétique, par une adaptation de la production aux conditions climatiques pour une utilisation plus efficace, permettant à terme de réduire le coût du kWh.

Les point terminaux des smart grids sont les compteurs énergétiques (eau, gaz, électricité) des bâtiments instrumentés. Ces compteurs constituent donc la frontière entre le smartgrid, faisant partie du domaine public, et l'infrastructure privée des bâtiments. Ces compteurs sont donc souvent considérés comme des passerelles qui permettront aux bâtiments de publier leurs données énergétiques en entrée du réseau électrique intelligent. Les points terminaux à l'autre extrémité du réseau électrique intelligent sont les producteurs d'énergies qui collectent ces informations et peuvent adapter leur production en conséquence. Cela leur permet également d'extraire de ces données des scénarios et de prédire les consommations afin d'anticiper la demande en énergie. Certains scénarios mixant le réseau électrique intelligent et l'instrumentation de bâtiment imaginent une communication de bout en bout entre les producteurs d'énergie et certains équipements des bâtiments afin de pouvoir délester des appareils non-prioritaires et ainsi effacer les pics de consommations que les producteurs d'énergie veulent à tout prix éviter.

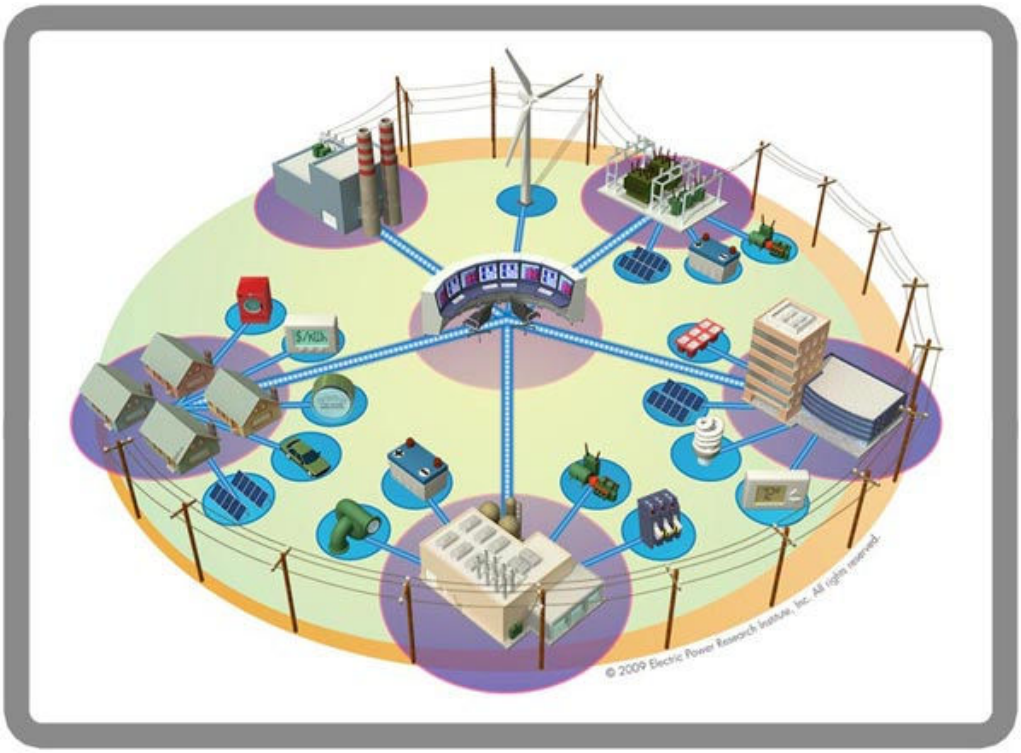


Figure 1.3: Représentation du Smartgrid (© Electric Power Research Institute)

En effet, cela risque de provoquer un écroulement d'une partie du réseau si la demande dépasse l'offre, et oblige les fournisseurs à acheter (parfois très cher) un surplus d'énergie pour couvrir ce pic. Les smartgrids pourraient permettre également d'utiliser les sources d'énergie distribuées durant ces fortes demandes et de gérer leur stockage pendant les périodes ou la demande est faible. L'arrivée des véhicules électriques pourraient également justifier l'intérêt des smartgrids car ces véhicules provoqueront un pic important de la demande en fin de journée et pendant la nuit, mais disposerons d'une batterie qui pourrait être mise à contribution comme source d'énergie ponctuelle. De plus, la facturation de l'énergie utilisée pour la recharge de ces véhicules à de multiples endroits impliquent un besoin de communication à travers le réseau de distribution d'énergie.

La croissance de la population mondiale et des besoins en énergie implique un besoin grandissant de la maîtrise de sa distribution, faisant du smartgrid l'une des applications les plus actives de cette nouvelle frange de l'internet. Aujourd'hui de très nombreux projets de smartgrid sont lancés partout dans le monde. Le principal projet de smartgrid en France est le projet de compteurs intelligents Linky [4], piloté par ERDF, qui vise à terme à connecter 35 millions de ces compteurs en utilisant la technologie CPL [5], que nous détaillerons dans le chapitre 3.

1.2.3 Autres types d'applications

Bien d'autres applications sont imaginables avec les objets communicants, et les limites sont probablement celles de l'imagination. A titre d'exemple, 15 illustrations de scénarios sont présentés dans [6]. Parmis la multitude d'applications imaginables, quelques unes semblent néanmoins récurrentes et promises à un certain avenir :

Villes Intelligentes : La plupart des villes sont déjà équipées en infrastructures de com-

munication et de nombreux objets urbains pourraient bénéficier d'une communication. Quelques exemples concernent la gestion des déchets, des parkings, de l'éclairage public, de la circulation, des transports en communs [7], des évènements publics ou encore de la publicité. Ces villes intelligentes devront pouvoir gérer un nombre extrêmement important d'objets communicants supportant une très forte densité.

e-santé : Le vieillissement de la population, l'apparition de nouvelle pathologies (maladies d'Alzheimer, de Parkinson), et l'éloignement géographique des familles tend à augmenter les risques pour les personnes âgées ou dépendantes qui pourraient profiter de systèmes communicants [8]. D'autre part, les services d'urgences ont parfois du mal à traiter les urgences suivant leur gravité, car un diagnostic rapide par téléphone n'est que partiel. De plus, ils doivent être contactés par une personne physique, ce qui n'est pas toujours possible lors d'un malaise ou un accident. Les objets intelligents ne rapprocheront pas physiquement les personnes et ne remplaceront jamais un médecin, mais ils peuvent apporter un certain nombre d'informations précieuses qui pourront accélérer la prise de décision. Le temps étant parfois critique lors de problèmes de santé, ce gain de temps et de réactivité pourrait aider à réduire le nombre de victimes qui ne peuvent pas être sauvées aujourd'hui [9].

Logistique : Le bon fonctionnement des échanges commerciaux passent par une organisation logistique de qualité. Ces échanges augmentant, le volume de paquets à gérer a suivi la tendance, rendant parfois très complexes l'acheminement d'un colis entre son expéditeur et son destinataire, à cause des multiples plateformes et aiguillages qu'il doit traverser. Identifier chaque paquet par un objet communicant tel qu'une étiquette électronique (tag RFID) et le suivre durant son trajet permettrait d'avoir une vision quasiment en temps réel du flux logistique. Moyennant quelques capteurs, ils pourraient également permettre de connaître l'état du produit à livrer, afin de garantir sa qualité lors de la livraison. Ils pourraient également connaître sa nature, afin de le traiter suivant sa dangerosité ou les précautions à prendre, ou d'optimiser son acheminement suivant sa criticité.

Contrôle Industriel : Ce type d'applications repose essentiellement sur des communications entre machines (M2M), afin qu'elles puissent échanger des informations pour optimiser leur fonctionnement. Elles pourront par exemple communiquer leur état ou se déclarer comme défaillante grâce à un auto diagnostic. L'environnement industriel requiert également de nombreux capteurs tout au long du process qui pourraient être installés à moindre coût et sans fil grâce au volume de l'internet des objets. Enfin, la gestion et la maintenance de l'outil industriel pourrait être facilité par des communications transversales entre les différentes entités, afin d'impacter au minimum la chaîne de fabrication lors de la défaillance d'un de ses éléments.

1.3 L'hétérogénéité dans les réseaux de capteurs

Comme on peut le voir, le spectre des applications couvertes par les réseaux de capteurs est particulièrement large et implique des contraintes extrêmement diverses. Il est donc évident qu'une solution unique de communication ne pourra pas répondre à toutes ces contraintes et qu'une multitude de ces objets vont voir le jour en fonction de l'application qu'ils devront desservir. Les paramètres qui resteront valides sont ceux qui ont été présentés dans l'introduction, et qui seront pondérés suivant le cas d'usage.

Pour répondre à ces besoins, de nombreuses technologies, standards et protocoles ont été développés. Le chapitre suivant présente un état de l'art, et s'attarde sur ceux qui sont analysés dans cette thèse. Au sein de Watteco, nous pensons que l'internet des objets sera hétérogène et

que le challenge sera de faire cohabiter ces objets, voir de les faire coopérer si ils présentent des caractéristiques complémentaires.

La plupart de ces objets fonctionnent sur des technologies RF parce qu'elles sont matures et n'imposent pas de câblage. Cependant, le CPL a du sens car il utilise un câblage existant : le réseau électrique qui relie déjà de très nombreux objets entre eux et particulièrement les plus consommateurs en énergie. De plus, certains environnements industriels sont déjà équipés d'une infrastructure de communication de type WiFi ou câblée en ethernet qu'il serait dommage de ne pas réutiliser. Enfin, certains bus de terrains tels que RS-485, assez populaires dans les environnements industriels ont aussi leur place dans l'internet des objets, qui reposeront donc sur de multiples couches physiques. Beaucoup de débats ont lieux pour savoir quelle est la meilleure technologie pour les réseaux de capteurs. Malheureusement, la réponse ne peut exister que dans un certain cadre, fixé par les contraintes de l'application et à un instant donné. En effet, les évolutions techniques font sans cesse émerger de nouveaux standards de communication qui remettent en cause ce choix. Comme nous le verrons dans la suite, les différentes évolutions du standard IEEE 802.15.4 en sont un parfait exemple, autorisant de multiples bandes de fréquences , modulations, débits ou couches MAC différentes et non interopérables.

De même, une myriade de protocoles applicatifs sont amenés à être utilisés sur ces nouveaux objets communicants. Il seront également complétés ou modifiées au fur et à mesure d'évolution techniques. L'instrumentation des bâtiment est un très bon exemple de cette diversité, car il repose sur de multiples standards établis tels que BACnet, LonWorks, ModBus, KNX, ZigBee, Wireless M-Bus ou DLMS/COSEM pour ne citer que les principaux.

Avec une telle diversité dans les parties basses et hautes de la pile de communication, il semble difficile de trouver une solution flexible qui permette à tous ces objets de communiquer ensemble. Cependant, la réponse pourrait bien se trouver dans le milieu de cette pile, au niveau réseau. En effet, l'explosion du réseau Internet repose sur un standard établit depuis plus de 20 ans : le standard Internet Protocol (IP [10]). Ce standard interconnecte aujourd'hui des millions de machines à travers le monde et bénéficie d'une infrastructure dont l'internet des objets doit profiter. Nous détaillons plus loin l'intérêt d'IP pour les réseaux de capteurs. De très nombreuses technologies de communication sont compatibles avec le standard IP, de même que de nombreux standards applicatifs. Ce protocole est donc un des points de convergence possible pour permettre les communications entre tous ces objets. Cependant, des modifications sont nécessaire pour rendre possible l'utilisation d'IP sur ces nouvelles architectures contraintes. Nous décrirons ces adaptations dans le chapitre 5.

Cette thèse considère l'utilisation de plusieurs média dans un même réseau de capteurs, et en particulier l'utilisation commune du CPL et de la RF. Le chapitre 2 présente un état de l'art des réseaux de capteurs, d'un point de vue de la recherche académique, des organismes de standardisation et des alliances industrielles. Nous feront ensuite dans le chapitre 3 un point sur les technologies CPL qui sont aujourd'hui beaucoup moins déployées et connues que les solutions RF. Nous feront en particulier une description de la technologie Watt Pulse Communication (WPC) développée par l'entreprise Watteco. En effet, nous montrerons que cette technologie permet de répondre aux contraintes particulières de l'internet des objets et qu'elle présente un certain nombre de similitudes avec les technologies RF utilisables par les réseaux de capteurs. Le chapitre 4 décrit l'implémentation de la technologie WPC dans le simulateur de réseau COOJA. Nous établissons ensuite le rapprochement entre les média RF et CPL, pour justifier de leur collaboration et décrirons dans le chapitre 5 comment interfacer cette solution CPL avec le standard IP. Nous décrirons dans le chapitre 6 les intérêts d'un routage de type multi-sauts sur le média CPL, et nous décrirons précisément l'utilisation du protocole de routage RPL sur la technologie WPC. L'utilisation de ce protocole est justifiée, puis évaluée dans le simulateur COOJA, avant

d'être testée dans plusieurs environnements à travers des expérimentations réelles décrites dans le chapitre 7. Le chapitre 8 présente une étude de la réduction de la consommation énergétique dans les réseaux de capteurs, par des modèles théoriques, des simulations et des expériences pratiques. Un certain nombre de mécanismes permettant d'atteindre une durée de vie de plusieurs années sur une pile bouton. Dans le cadre des travaux sur la récupération d'énergie ambiante, nous présenterons également l'alimentation d'un capteur alimenté par un système de récupération d'énergie solaire. Une autre contribution permettant de réduire la consommation d'énergie est apportée via l'utilisation de réseaux hétérogènes RF/CPL. Le chapitre 9 conclut la thèse, résume les principales contributions, et propose des perspectives complémentaires.

Chapter 2

Etat de l'art des réseaux de capteurs

Ce domaine s'articule autour de trois piliers : La recherche, les organismes de normalisation ou SDO (Standard Development Organisation), et les industriels, parfois regroupés en alliances. Ces différentes entités interviennent au fur et à mesure des développements du secteur dans l'ordre où ils sont cités. L'évolution de l'activité en fonction du temps suit la théorie émise par David Clark du MIT au milieu des années 80 connue sous le nom de "*l'apocalypse des deux éléphants*" illustré à la figure 2.1.

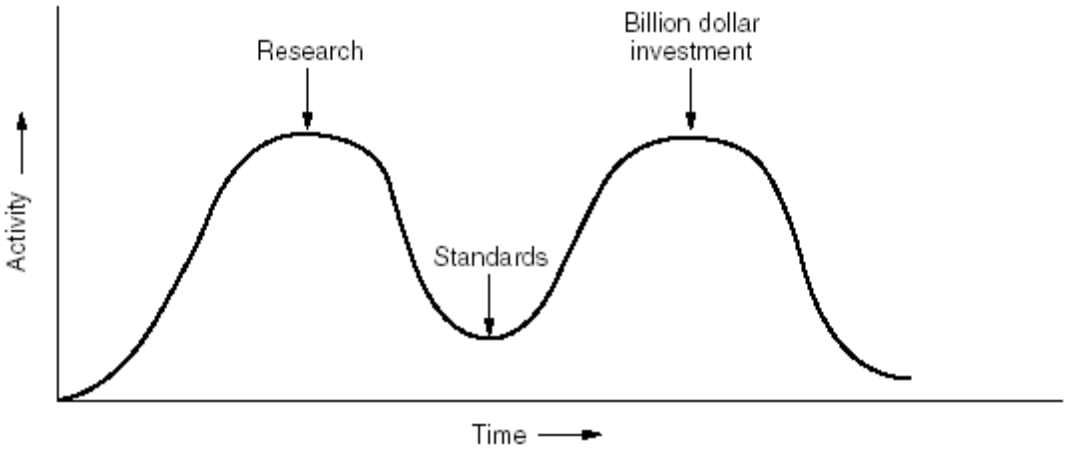


Figure 2.1: Evolution de l'activité en fonction du temps (*Computer Networks Fourth Edition - A.Tanenbaum*)

Cette théorie fait apparaître les trois phases que nous détaillons dans la suite. A la date de rédaction de cette thèse, les réseaux de capteurs sont au début du 2ème regain d'activité, où le pic de recherche a été franchi, les normes arrivent à maturité, et les entreprises commencent à investir massivement. Dans le cadre du développement des réseaux de capteurs, on peut considérer que l'enchaînement des étapes s'est bien réparti dans le temps, permettant de disposer à cette date de solutions industrielles standardisées et performantes. En effet, la théorie de Clarke montre une zone critique, localisée entre les deux pics d'activité, où les standards doivent être développés. Un standard développé trop tôt sera rendu obsolète par les progrès de la recherche et ne sera pas adopté. A contrario, un standard développé trop tard, après d'importants investissements, sera ignoré car les industriels ne reviendront pas sur leurs investissements. Ce dernier peut mener à une fragmentation ou une segmentation du marché qui rend les produits non standards, et non interopérables. Ce type de configuration ne profite en général pas à l'utilisateur final qui doit prendre un risque en s'engageant avec un standard propriétaire, dont la pérennité et l'acceptation sur le marché sont fortement liées à l'entreprise qui les a développé.

Dans le domaine des réseaux de capteurs, la recherche académique a débuté à la fin des années 90, reposant sur les progrès de l'électronique et de l'informatique embarquée, ainsi que des communications sans fil. Les contraintes de ces nouveaux objets communicants ont été rapidement identifiées (cf la liste présentée dans l'introduction) et un certain nombre de réponses ont été apportées, reposant sur des mécanismes qui sont toujours utilisés à ce jour et décrits dans le chapitre suivant. Ces progrès ont permis de dépasser le cadre de la recherche académique, et certaines entreprises ont commencé à industrialiser la production de certains de ces premiers capteurs, afin de répondre à une application industrielle qu'ils avaient identifié. Un certains nombre de start-up ou spin-off sont issues des travaux des laboratoires de recherche pour commercialiser des premières solutions de réseaux de capteurs. La preuve fut rapidement faite au début des années 2000 de la faisabilité de ces capteurs et du fort potentiel économique qu'ils

pourraient générer.

Les organismes de standardisation sont ensuite entrés en jeux, afin de de catalyser ces recherches. L'une des premières concrétisation fut la première version du standard IEEE 802.15.4 [11], sortie en 2003, qui a définit les couches physiques et MAC de la très grande majorité des réseaux de capteurs qui ont suivit. A la suite de la publication de ce standard, des divergences sont apparues. Certaines entreprises ont capitalisé sur ce premier standard afin de réaliser rapidement des solutions implémentant des profils applicatifs propriétaires. Ces produits correspondaient à des cas d'usages industriels bien précis, sortant parfois des efforts engagés en faveur des standards ouverts. Certaines entreprises vont continuer les efforts de recherche selon une approche bottom-up, afin de tendre vers une pile de communication complètement standardisée, reposant sur ces standards ouverts. Par la suite, la diversification des applications sur ces réseaux de capteurs vont démultiplier les efforts de standardisations, amenant aujourd'hui à de multiples standards que nous examinerons par la suite.

Les standards de l'internet des objets ont été développés à un moment opportun, après une certaine maturité de la recherche et avant l'intérêt massif des industriels. Il convient cependant de nuancer la théorie de Clark, car les efforts de recherche, même s'ils ont diminué, sont toujours fortement présents, car ils se sont diversifiés. Les réseaux de capteurs couvrant un très large spectre d'applications, ils touchent non seulement le domaine de l'informatique (protocoles de communication), mais également celui de l'électronique (intégration de systèmes communicants et de capteurs), de la chimie (conception des sondes et des batteries), de la physique (conception des sondes et intégration/packaging pour des environnements particuliers), de l'électromagnétisme (communications sans fil), des mathématiques (optimisation des algorithmes), et bien d'autres encore. La fin du premier pic du modèle de Clark est donc à relativiser. Le creux d'activité doit également être nuancé car certains industriels n'ont pas attendus que les standards soient établis pour investir massivement. Néanmoins, le montant de ces investissements reste sensiblement inférieur aux volumes qui sont maintenant considérés et cantonnés à certains cas d'usage particuliers. La forte progression des investissements devrait intervenir grâce à la mutualisation des infrastructures réseaux et la démocratisation des applications de l'internet des objets.

2.1 Académique

La recherche sur les réseaux de capteurs et les objets communicants a commencé dans les années 90, s'appuyant sur les progrès des télécommunications et de l'électronique embarqué. La loi de Moore continuant à se vérifier année après année, la miniaturisation des systèmes communicants était prévisible. La maturité des technologies de communication, des modulations et des traitements du signal de l'époque permettaient déjà de faire des systèmes embarqués utilisant des technologies sans fil. L'idée d'un appareil mobile permettant de communiquer s'est d'abord développé dans les prémices de la téléphonie mobile avant de trouver une utilité dans les objets communicant et les systèmes miniatures.

L'architecture des capteurs communicants a rapidement convergé vers l'assemblage de quatre parties principales suivantes :

- Un micro-contrôleur
- Un émetteur/récepteur
- Une source d'alimentation
- Une ou plusieurs sondes

Une architecture de référence assemblant ces partie est illustrée par la figure 2.2 :

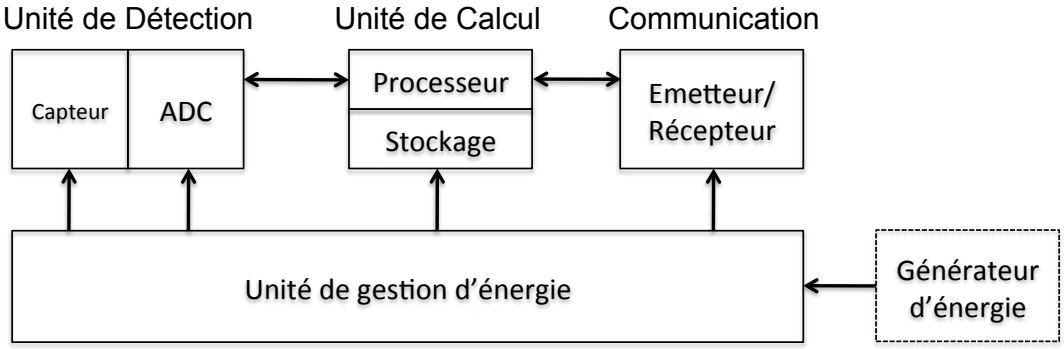


Figure 2.2: Architecture de référence d'un capteur

2.1.1 Micro Systèmes d'Exploitation

Les recherches dans le domaine des réseaux de capteurs ont amené à la réalisation de différents micro systèmes d'exploitation (OS), permettant l'implémentation des protocoles et services réseaux dédiés aux environnements contraints. La plupart d'entre eux permettent de construire une pile protocolaire complète en utilisant seulement quelques Ko de mémoire vive (RAM) et dizaines de Ko de mémoire morte (EEPROM, Flash).

2.1.1.1 TinyOS

Ce micro OS [3] a été l'un des premiers à voir le jour. Il a été développé par l'équipe de recherche de Berkeley au début des années 2000. Pionnier dans ce domaine, cet OS a rapidement cristallisé un fort intérêt, créant une communauté importante et active qui a permis d'apporter de nombreuses et importantes contributions. Cet OS open-source et largement utilisé par la communauté scientifique et industrielle. L'une des particularités de cet OS est le langage NesC qu'il impose [12]. L'équipe est parti du constat que les ressources matérielles devaient être optimisées sur les architectures contraintes, et que les compilateurs classiques ne permettaient pas une optimisation suffisante de ces ressources. Le langage NesC a donc été créé, permettant d'optimiser leur utilisation de manière automatique. En particulier, TinyOS comprend un modèle d'exécution concurrentiel basé sur des "race conditions". Afin de faciliter la collecte de données dans un réseau de capteur, l'OS comprend un système de requêtes appelé TinyDB [13] permettant de récupérer les données à la manière d'une simple interface de type SQL. Cela permet de déployer rapidement un réseau de capteur sans développer une grande quantité de code. Le langage NesC impose cependant une "philosophie" de programmation qui nécessite un temps d'apprentissage qui peut rebuter certains industriels, mais dont le bénéfice est avéré une fois le langage assimilé. Certains utilisateurs pointent aussi le fait que ce langage abstrait une partie des interactions de bas niveau, rendant difficile la maîtrise complète des opérations. Ce langage offre toutefois un canevas complet et clair pour la programmation sur des architectures contraintes, rendant la compréhension et l'assimilation du code plus facile et plus "adapté" qu'avec des langages traditionnels de type C. Cet OS offre une implémentation des principaux protocoles de l'internet des objets telles que IEEE 802.15.4, 6LoWPAN, RPL, CoAP, une pile complète IPv6, un environnement de simulation, et de nombreuses implémentations de protocoles MAC permettant de réduire la consommation énergétique des noeuds. Ces briques

de base permettent de porter librement une pile protocolaire IPv6 complète vers de nombreuses plateformes matérielles existantes.

2.1.1.2 Contiki

Ce micro OS présente de nombreuses similitudes avec TinyOS vis à vis des fonctionnalités et des protocoles, mais repose sur le langage C classique. Initié en 2003 par Adam Dunkels [2] et maintenu depuis par son équipe du SICS, ce micro OS a su s'imposer largement dans le monde industriel et académique, profitant probablement de son apparente accessibilité via le langage C standard utilisé. Cet OS, open-source également, offre une implémentation des principaux protocoles de l'internet des objets précédemment cité dans la description de TinyOS. Contiki contient également un environnement de simulation, qui est plus complet et plus facile d'utilisation que celui de TinyOS. Des tests d'interopérabilité ont été menés entre les implémentations Contiki et TinyOS de ces nouveaux protocoles [14], afin de démontrer la viabilité des implémentations et des spécifications. Contiki a été porté sur de nombreuses plates-formes matérielles, et est régulièrement mis à jour par sa communauté. Au fur et à mesure des évolutions, l'architecture de Contiki s'est considérablement développée, rendant parfois difficile son appréhension. Adam Dunkels et deux associés se sont récemment groupés au sein d'une start-up (Thingsquare, [15]) dans le but de fournir des services d'ingénierie reposant sur Contiki. Thingsquare répond aux demandes de clients souhaitant porter Contiki sur leur matériel, ajouter des services réseaux à des objets originellement dénués de communication, ou encore migrer des solutions propriétaires vers les standards ouverts. Contiki est le micro OS que nous avons retenu et utilisé pour cette thèse, car de nombreuses briques logicielles étaient déjà disponibles (notamment un driver IEEE 802.15.4, et une implémentation des protocoles 6LoWPAN et RPL que nous étudions ici). De plus, le langage C ne nécessite pas de temps d'apprentissage, et Watteco avait déjà réalisé des projets utilisant cet OS en particulier. Enfin, cet OS comprend un simulateur de réseau (COOJA, [16]), que nous avons utilisé dans le cadre de nos travaux.

2.1.1.3 FreeRTOS

FreeRTOS [17] est un micro OS temps réel développé par Real Time Engineers Ltd. qui supporte actuellement 33 architectures matérielles différentes. Cet OS a été développé par des ingénieurs, et est l'OS le plus utilisé pour des applications industrielles à cette date. Son succès repose principalement sur sa qualité d'implémentation, sa robustesse et la qualité du support offert. Il peut être téléchargé librement et intégré dans des produits commerciaux sans besoin de diffuser le code qui a été développé dans le noyau. FreeRTOS est devenu le standard de facto pour la plupart des applications embarquées sur micro contrôleur, et a permis de casser le dogme voulant que le code open source ne permette pas d'atteindre un niveau de qualité suffisant pour des applications industrielles.

2.1.1.4 Autres Micro OS

Il existe de nombreux autres micro systèmes d'exploitations. Nous pouvons entre autre citer :

- FIP, [18]
- Mantis [19] [20]
- OpenWSN [21]
- LIMOS [22]

2.1.2 Simulateurs

Cette partie présente un panel des principaux simulateurs de réseau existants à ce jour. Nous évoluons ici leur pertinence pour l'étude des réseaux de capteurs.

NS-2: Ns (The Network Simulator) [23] est un simulateur a évènements discrets ciblé pour la recherche dans le domaine des réseaux. Ce simulateur offre un support pour la simulation de TCP, des protocoles de routage, et des protocoles multicast sur les réseaux câblés ou sans fils (local et satellite). Ns dérive du simulateur de réseau REAL créé en 1989 et a évolué de manière significative durant les dernières années. En 1995, les développements de Ns ont été supportés par l'agence DARPA à travers les projets VINT, Xerox PARC, USB, et USC/ISI. Ns comprend de nombreuses contributions incluant notamment l'implémentation sans fil des projets UCB daedelus et CMU Monarch, ainsi que de Sun Microsystem. Ce simulateur est assez générique et n'est pas spécifiquement dédié aux réseaux de capteurs.

Castalia - OMNeT++: OMNeT++ [24] est un environnement et une librairie de simulation orientée objet C++ extensible et modulaire, dédié à la construction de simulations de réseaux. "Réseaux" est utilisé ici dans un sens large qui inclut les réseaux de communication câblés et sans fils, les réseaux sur puces, ou tout type de réseaux d'une manière générale. Quelques fonctionnalités spécifiques tel que le support des réseaux de capteurs, les réseaux sans fils ad-hoc, le protocole IP, la modélisation de performances, les réseaux photoniques etc. sont offertes par des modèles, développés dans des projets indépendants. OMNET++ offre un environnement de développement pour Eclipse ainsi qu'une interface graphique. Il existe des extensions pour les simulation temps réel, l'émulation de réseaux, des langages de programmation alternatifs (Java, C), l'intégration de bases de données, l'intégration de SystemC ou bien d'autres fonctions.

TOSSIM: TOSSIM [25] est un simulateur à évènement discret pour réseaux de capteurs fonctionnant avec TinyOS. Au lieu de compiler une application TinyOS pour un noeud, l'utilisateur peut la compiler dans l'environnement TOSSIM, qui est exécuté sur un PC. Cela permet à l'utilisateur de débuguer, tester et analyser les algorithmes dans un environnement contrôlé et répétable. Etant donnée que TOSSIM est exécuté sur un PC, l'utilisateur peut examiner ses codes TinyOS en utilisant les outils de deboguage et de développements classiques. Le principal objectif de TOSSIM est de fournir une simulation de haute fidélité pour les applications TinyOS. Pour cette raison, il se concentre principalement sur la simulation de TinyOS et de son exécution, plutôt que la simulation du monde réel. Bien que TOSSIM puisse être utilisé pour comprendre la cause de comportements observés dans le monde réel, il ne les capture pas tous, et ne peut pas être utilisé comme une preuve formelle du fonctionnement d'un réseau.

COOJA: COOJA [16] est un simulateur codé en Java principalement construit pour simuler des réseaux de capteurs utilisant le micro OS Contiki. COOJA simule des réseaux de capteurs ou chaque noeud peut être de type différent, non seulement par le code embarqué, mais également pas le matériel simulé. COOJA est flexible dans le sens ou de nombreuses parties du simulateur peuvent être remplacées ou étendue facilement avec de nouvelles fonctionnalités. Un noeud simulé dans COOJA possède trois propriétés basiques : Sa mémoire de donnée, son type de noeud et ses périphériques matériels. Le type de noeud peut être partagé entre plusieurs noeuds et détermine leurs propriétés communes. Par exemple, si des noeuds du même type exécutent un même code avec les mêmes périphériques matériels, et qu'ils sont initialisés avec la même mémoire de donnée, excepté leur identifiant, pendant l'exécution, les mémoires de donnée des noeuds vont tout de même différer

suite en réaction à des stimuli extérieurs. COOJA peut exécuter des programmes Contiki de deux manières différentes. Soit en exécutant directement le code compilé en code natif pour la machine hôte, soit en exécutant du code compilé pour Contiki dans MSP-Sim [26]. COOJA est aussi capable de simuler des comportements au niveau applicatif par l'utilisation de noeuds émulés en Java. Les noeuds simulés en Java permettent des simulations plus rapides mais n'utilisent pas de code déployable. Cela est utile pour les développements d'algorithmes distribués par exemple. Les noeuds émulés permettent de contrôler et de générer des exécutions plus détaillées, qu'avec les noeuds Java ou utilisant du code natif. Enfin, les simulations en code natif sont plus efficaces et rapides que les émulations de noeuds et simulent tout de même du code déployable. Combiner tous ces différents niveaux dans une même simulation permet d'obtenir à la fois une simulation efficace, et un niveau de détail d'exécution sur les noeuds.

WSIM/WSNET: Ce couple [27] forme un simulateur à évènement discrets pour les réseaux de capteurs. ll comprend la simulation des noeuds dans WSIM, ainsi que l'environnement et le médium RF dans WSNET. Dans WSNet, les noeuds simulés sont construits comme un assemblage arbitraire de blocs qui représentent un composant matériel, un composant logiciel, un comportement ou encore une ressource du noeud. Dans une simulation, les dates de début de fonctionnement des noeuds peuvent être spécifiés et ne correspondent pas forcément au début de la simulation. Les noeuds peuvent aussi être détruits durant la simulation, à cause de facteurs physiques externes ou du manque d'énergie. Enfin, les noeuds peuvent lire des mesures physiques dans leur environnement et agir sur ces grandeurs. WSNet offre l'opportunité de simuler des phénomènes physiques (tels que le feu), et des mesures physiques (tels que la température, l'humidité). Ces valeurs peuvent être lues par les noeuds, évoluer dans le temps, et les phénomènes physiques peuvent impacter les noeuds, voire les détruire. WSNet permet également d'ajouter une entité de monitoring dans la simulation, qui peut tracer les évènements et l'état du réseau. WSNet a été conçu pour offrir une large palette de modèles RF, d'une couche physique idéale sans aucune interférence et avec une portée fixe, jusqu'à un modèle complexe et précis avec une propagation régie selon le canal de Friis, un fading de Rayleigh, des fréquences multiples et des propriétés de corrélation complexes entre fréquences, des modulations PSK, des diagrammes complexes de rayonnements d'antennes, etc...

Table 2.1: Comparaison des différents simulateurs de réseaux

Simulateur	ns-2	Castalia (basé sur OMNeT++)	TOSSIM	COOJA/MSPSim	WSim/WSNet
Niveau de détails	générique	générique	niveau codage	Tous les niveaux	Tous les niveaux
Base de temps	Evènements discret	Evènements discret	Evènements discret	Evènements discret	Evènements discret
Plateformes de simulation	FreeBSD, Linux, SunOS, Solaris, Windows (Cygwin)	Linux, Unix, Windows (Cygwin)	Linux, Windows (Cygwin)	Linux	Linux, Windows (Cygwin)
Types de Noeuds	non applicable	non applicable	MicaZ	Tmote Sky, ESB, MicaZ	MicaZ, Mica2, TelosB, CSEM Wisenodes, ICL BSN nodes, eZ430
Interface Graphique	Gestion du temps de simulation	Gestion du temps de simulation, développement C++ , définition de la topologie, analyse des résultats et visualisation	Aucun	Gestion du temps de simulation, définition de la topologie, analyse des résultats et visualisation	Aucun
Canal Radio	Champ libre, réflexion à 2 rayons, shadowing	shadowing lognormal , mesures expérimentales matrice des pertes sur les chemins, matrice des taux de réception de paquet, variation temporelle, disque unitaire	shadowing lognormal	propagation multi-chemins avec support de l'atténuation, obstacles, disque unitaire, graphe orienté	fichier statique, modèle en disque, champ libre, réflexion à 2 rayons, shadowing lognormal, fading de rayleight, modèle indoor de l'ITU, fading de nakagami
Couche Physique	Lucent WaveLan DSSS	CC1100, CC2420	CC2420	CC2420, TR1001	CC1100, CC1101, CC2500, CC2420
Couche MAC	IEEE 802.11 (plusieurs implementations), TDMA à préambule (début de développement)	Tmac, Smac, MAC paramétrable (peut approximer BMAC, LPL, etc)	Standard TinyOS 2.0, pile CC2420	CSMA/CA, TDMA, X-MAC, LPP, NullMAC, ContikiMAC, SicslowMAC	DCF, BMAC, MAC idéal
Couche Réseau	DSDV, DSR, TORA, AODV	Arbre simple, Anneaux multi chemins	Pas de données	RPL, AODV	Géographique, Fichier statique
Couche Transport	UDP, TCP	Aucun	Pas de données	UDP, TCP	Aucun
Détection	Variation de la position avec l'extension Mannasim	Processus physique en fonction du temps	Pas de données	Noeuds mobiles	Variation de la position en fonction du temps
Modèle de consommation d'énergie	Oui	Oui	Avec l'extension PowerTOSSIM	Oui	Oui

Les simulateurs présentés ici représentent un aperçu des simulateurs les plus familièrement utilisés pour la simulation de réseaux de capteurs.

Nous analyserons ces simulateurs dans le chapitre 4 pour sélectionner le plus adapté à la simulation de la technologie WPC.

2.1.3 Plateformes matérielles

De nombreuses plateformes ont été conçues depuis l'avènement des réseaux de capteurs. L'une des toutes premières était le noeud WeC [28], conçu en 1998. Cette plateforme offrait à l'époque 8 kB de ROM et 0,5 kB de RAM, utilisait un module microcontrôleur RF TR1000 avec une modulation OOK, offrant un débit de 10 kbps. Ensuite, plusieurs plateformes similaires on été créées, avec un microcontrôleur plus puissant et le même module RF jusqu'en 2001. En 2002 une nouvelle génération de noeud a émergé, basée sur la plateforme Mica [29], conçue dans les laboratoires de Berkeley. Ce noeud a été conçu afin de servir de plateforme de référence pour la recherche sur les réseaux de capteurs. Comparé aux plateformes précédentes, le Mica offrait plus de mémoire (4kB de RAM et 128kB de flash) grâce à son micro-contrôleur ATmega 103 fonctionnant à 4 MHz, des interfaces d'extension pour des sondes, et une interface RF flexible. Le noeud Mica utilisait également le TR1000 avec une simple modulation d'amplitude (ASK), car ce module RF était toujours le moins consommateur d'énergie au moment de sa conception. La version originale du noeud MICA avait des performances énergétiques similaires au noeud WeC, mais avec des performances bien meilleures. Cette plateforme a été un accomplissement majeur pour la recherche sur les réseaux de capteurs, car elle a permis de valider un certain nombre de principes fondamentaux tels que les mécanismes de réveils périodiques pour limiter la consommation d'énergie du noeud. A partir de cette date et de cette plate-forme, la totalité des futurs architectures vont réutiliser ce principe afin d'allonger leur durée de vie.

En se basant sur les retours d'expériences, une nouvelle version Mica2 vit le jour, corrigeant un certain nombres de problèmes de l'architecture originale : Le convertisseur de tension d'entrée a été supprimé, l'émetteur RF a été remplacé par un chipcon CC1000, offrant des fréquences configurables entre 300 et 900 MHz, une meilleur sensibilité de réception, donc de meilleurs portées de transmission. La combinaison du module CC1000 avec ce type de modulation a fait disparaître le besoin du régulateur de tension nécessaire au noeud Mica pour assurer des transmissions RF fiables. Le micro contrôleur a également été remplacé par un ATmega 128L fonctionnant à 8 MHz.

L'évolution s'est poursuivie avec le MicaZ, qui remplaça le module CC1000 par un CC2420, un module RF compatible avec le standard IEEE 802.15.4 offrant un débit maximal de 250 kbps et une modulation O-QPSK évoluée. Ce module RF embarquait également une partie de la pile IEEE 802.15.4, limitant ainsi les ressources logicielles nécessaires aux transmissions RF, et conduisant de fait à une réduction de la consommation énergétique.

Une nouvelle avancée majeure a été atteinte avec le design de la plateforme Telos [30] en 2004. Cette plate-forme permettait les expérimentations avec une consommation énergétique minimale, une grande facilité d'usage et une forte robustesse logicielle et matérielle. Le Telos est basé sur un microcontrôleur MSP430 et un module RF CC2420. Le MSP430 offrait une consommation énergétique 20 fois inférieure à celle du MicaZ en mode veille, et 4 fois inférieure en mode actif.

Bien que cette plateforme ait été créée en 2004, elle est toujours largement utilisée à cette date dans des expérimentations pour valider des protocoles réseaux et fait souvent office de plate-forme de référence dans de nombreux déploiements.

Le matériel a toutefois grandement évolué depuis cette date, de même que les besoins en ressources matérielles pour faire fonctionner une pile IPv6 complète avec les nombreux proto-

coles dédiés qui sont apparu ces dernières années. Cet enrichissement logiciel et la diversité des applications au dessus des réseaux de capteurs peuvent souvent nécessiter des ressources supérieures à ce qu'offre un noeud Telos.

Nous présenteront dans le dernier chapitre une plateforme reprenant la plupart des mécanismes issus de ces anciennes plateformes, avec du matériel récent et certaines optimisations matérielles et logicielles permettant de réduire la consommation énergétique des composants de manière importante.

2.1.4 Recherches appliquées au CPL

Les nombreux travaux réalisés par le groupe de travail 6LoWPAN [31] [32] étaient principalement centrés sur l'adaptation d'IPv6 sur le standard RF IEEE 802.15.4. Malgré le fait que ces travaux ne considéraient pas d'autres standards ou d'autres média initialement, la plupart des travaux réalisés peuvent être étendus aux réseaux basse puissance à perte de transmission (Low power and Lossy Network - LLNs) au sens général. Ces média n'impliquent pas de restrictions sur leur nature, qu'il soit avec ou sans fil, et définissent simplement un cadre dans lequel le média est particulièrement contraint, notamment du point de vue de la bande passante, du débit, des ressources matérielles ou de l'énergie disponible. Nous le verrons dans le chapitre 3 que certains type de technologies CPL correspondent à cette catégorie, et sont par ailleurs explicitement nommés dans l'applicabilité du protocole de routage RPL que nous décrirons au chapitre 6. Pour ces raisons, plusieurs développeurs de solutions CPL dont nous faisons partie ont jugé utile de rapprocher ces technologies CPL des efforts engagés autour du standard IEEE 802.15.4 afin de réutiliser les mêmes protocoles. La technologie G3-PLC par exemple, que nous présenterons dans la section suivante, est une technologie CPL bas débit à bande étroite qui correspond à cette catégorie. Cette technologie a directement repris le format de la couche MAC du standard IEEE 802.15.4 sur sa couche physique CPL, afin de profiter de l'adaptation 6LoWPAN, étendant ce média à IPv6 et à toute la suite protocolaire qui en découle. Il est intéressant de constater que cette approche, mentionnée dans la spécification de la technologie G3 [33] développée entre 2010 et 2012 est très semblable à celle que nous avons développé dès 2009 [34], et que nous décrivons dans le chapitre 5 de cette thèse. A notre connaissance, aucune autre adaptation de ce type n'a été réalisée préalablement à nos travaux.

Outre le fait que les contraintes d'énergie du CPL soient sensiblement différentes des capteurs RF sur pile, elles ne sont tout de même pas inexistantes, comme nous le verrons dans la description de la technologie WPC développée par Watteco. Par extension, les mécanismes de compression ou de réduction du volume des messages transmis développés pour les réseaux 6LoWPAN ont également un intérêt sur le CPL, car il permettent de limiter l'utilisation de la bande passante qui est parfois très limitée et souvent partagée par de nombreux noeuds. L'utilisation de trames de tailles réduite et envoyées avec parcimonie sont donc des solutions à privilégier pour les CPL bas débits (quelques kbps), et présentant des taux de pertes pouvant être importants. Nous décrirons plus en détails les contraintes du CPL et mènerons une comparaison avec les contraintes des médias RF dans la suite. Cette approche d'unification des médias via un ensemble de protocoles communs, et particulièrement autour d'IP est devenue une orientation dominante dans les travaux autour du CPL. Cela permet d'assurer un niveau d'interfaçage commun entre les nombreuses solutions CPL disponibles à ce jour.

L'unification des média autour d'un coeur de pile protocolaire commun dépasse d'ailleurs largement le cadre des réseaux CPL, et permet d'envisager des réseaux dit "hybrides" mélangeant des médias de différente nature, comme nous le proposons dans le chapitre 8. Les réseaux mélangeant le CPL avec les médias RF en sont un exemple, et nous avons montré l'avantage de ce type de topologie dans plusieurs publications : Nous proposons tout d'abord une architecture

commune pour ces deux média, afin de permettre l'échange de données de manière transparente [35] au niveau de la couche réseau. Notre solution repose sur l'adaptation du format IEEE 802.15.4 sur CPL [34] et propose d'unifier ces média grâce à l'utilisation du standard IPv6. Nous comparons ensuite les performances de la technologie CPL WPC disposant de cette adaptation avec la technologie RF IEEE 802.15.4 [36]. Nous montrons ici que les performances en terme de débit et de latence sont comparables entre les 2 technologies, quand une couche MAC permettant l'économie d'énergie par des réveils périodique du module RF est utilisée sur ces plateformes. Nous donnons un premier exemple de réalisation d'une telle architecture hybride [37]. Nous démontrons de manière pratique la création d'un lien IPv6 de bout en bout au dessus de noeuds RF, CPL et hybrides RF/CPL et mettons en évidence le besoin d'un protocole de routage adapté aux réseaux contraints pour créer cette topologie. Dans nos travaux, l'utilisation du protocole de routage RPL [38] a permis de créer cette topologie. Nous étudions les possibilités de routage sur ce type de réseau hybride [39] et nous présentons les avantages et les limites de ce type de topologie. Nous montrons que ces topologies permettent d'améliorer la couverture du réseau, la fiabilité, de réduire la longueur moyenne des chemins et d'allonger la durée de vie du réseau par le délestage des noeuds RF fonctionnant sur batterie. Nous montrons également que ces avantages peuvent se faire au détriment des performances réseau, étant donné le faible débit de la solution CPL que nous considérons. Nous faisons ensuite un point sur l'intérêt de ces topologies hybrides dans le cadre de l'instrumentation des bâtiments [40] en montrant que ce type d'architecture s'applique particulièrement bien à ce cas d'usage. En effet, l'utilisation combinée des solutions RF et du réseau électrique via la technologie CPL peut permettre d'atteindre un optimum énergétique garantissant une durée de vie maximale des capteurs RF sur pile. Dans ce cas idéal, la densité des points CPL permise par l'environnement que constitue les bâtiments permet de créer un réseau de collecte CPL accessible directement par les noeuds RF via des routeur hybrides RF/CPL. Nous montrons également ici le besoin d'une solution de routage pour le média CPL lui même, car nos expériences ont montré que la portée des noeuds CPL ne permettait pas la couverture complète d'un bâtiment. Nous étudions ensuite les performances du protocole de routage RPL [41] dans des simulations, afin de quantifier les gains énergétiques pouvant être obtenus grâce à ces topologies hybrides. Nous montrons également que la durée de vie globale d'un réseau de capteurs RF (temps au bout duquel au moins un noeud voit son énergie complètement épuisée) peut être multipliée par 7 avec l'injection de noeuds hybrides RF/CPL dans une topologie en grille de 5x5 noeuds. Enfin, nous synthétisons l'avantage de ce type de topologie [42] du point de vue de l'énergie et nous justifions les choix de notre pile protocolaire basée sur des standards ouverts de l'internet des objets développés par l'IETF[38, 31, 43].

D'autres travaux considèrent l'intéropérabilité entre le CPL et la RF. Un exemple de ce type de réseau [44], permet au réseau CPL de relayer des données envoyées par une interface RF utilisant le protocole ZigBee. Les travaux de Ha et al. [45] montrent l'avantage d'un réseau hétérogène mélangeant RF et CPL par l'utilisation d'une couche de convergence propriétaire appelée "Cs-Layer". Yamada [46] a également démontré qu'un taux de succès de 70% sur le média CPL, et de 82% sur la RF pouvait atteindre un taux de succès de 90% quand les deux média étaient utilisés conjointement. Cela prouve que ces deux média peuvent se complémenter de manière efficace, l'un pouvant parfois compenser les faiblesses de l'autre. Les travaux de Yang [47] comparent trois méthodes de communication pour démontrer que la combinaison de la RF avec le CPL augmente de manière significative la qualité globale de la communication.

Ces travaux mettent en évidence l'intérêt de cette interopérabilité entre média, mais reposent sur des modifications des technologies considérées (ZigBee, Homeplug), et ne fournissent pas la convergence vers standard IPv6 que nous présenterons dans la suite. En particulier, les approches développées ne reposent pas sur des solutions standards et limitent les interactions à du relayage au niveau MAC, sans véritable routage au niveau réseau.

Nous verrons dans cette thèse comment permettre la transmission de paquets entre la RF et le CPL sans utiliser de passerelles (machine permettant de relier des technologies disjointes) entre les médias, qui contraignent fortement la topologie, impliquent des translations de protocoles, et ne garantissent pas forcément une sécurité de bout en bout dans la communication entre deux points d'un réseau.

2.2 Standardisation

On s'intéresse dans cette thèse aux standards ouverts, c'est à dire les protocoles dont l'utilisation est libre et non soumis à une quelconque licence. D'autres standards propriétaires sont développés dans des alliances industrielles (ZigBee, EnOcean...), comme nous le décrirons dans le paragraphe suivant. La présentation de ces standards reprend des éléments de l'ouvrage [48] sur lequel j'ai collaboré, et où une description plus complète est disponible.

2.2.1 IEEE

L' IEEE "Institute of Electrical and Electronics Engineers" est la plus grande association professionnelle mondiale dédiée aux innovations technologiques avancées. L'IEEE et ses membres stimulent une communauté mondiale à travers des publications, des conférences, des standards, et des activités professionnelles et d'enseignement.

La standards IEEE 802 sont des protocoles réseaux définissant la couche physique et liaison du modèle OSI. Ces standards sont très largement déployés aujourd'hui et quelques uns sont plus connus pas leur dénomination commerciale telle que WiFi pour 802.11, Ethernet pour 802.3 ou encore Bluetooth pour 802.15.1. Le sous groupe 802.15 se concentre sur les "Wireless Personal Area Networks" (WPAN) soit les réseaux sans fil courte portée. Comme évoqué plus haut, le standard sur lequel la majorités des solutions de réseaux de capteurs s'est développé est IEEE 802.15.4 qui est un standard dédié aux WPAN bas débit. Bien que cela ne soit pas explicite dans le titre, cela concerne des réseaux dont la fiabilité n'est pas garantie et dont les caractéristiques varient grandement en fonction de l'environnement. Le comité 802 définit les couches physiques et de liaison de données. L'IEEE décompose la couche OSI de liaison en deux sous couches :

- La couche d'accès au médium (MAC) prend place immédiatement au dessus de la couche physique (PHY), et implémente la méthode d'accès au réseau, typiquement le mécanisme CSMA/CD utilisé par Ethernet et CSMA/CA utilisé par les protocoles RF tels que IEEE 802.15.4.
- La couche de contrôle de lien logique (LLC), qui formate les trames de données envoyées sur le canal de communication à travers les couches MAC et PHY. Par exemple, le standard IEEE 802.2 définit le format des trames qui est indépendant des couches PHY et MAC sous-jacentes, et présente une interface uniforme aux couches supérieures. Depuis 1980, l'IEEE a défini de nombreux standard MAC et PHY très largement déployés tels que WiFi ou Ethernet, qui utilisent tous 802.2 comme couche LLC

2.2.1.1 IEEE 802.15.4

Ce groupe a été défini par le groupe IEEE 802.15.4/4b (`http://ieee802.org/15/pub/TG4b.html`). La première version du standard a été publiée en 2003, puis révisée en 2006. La version de 2006 introduit l'amélioration des débits pour les couches physiques 868 et 900 MHz (250 kbps, et jusqu'à 40 kbps respectivement), et peut être téléchargée librement à l'adresse

`http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2006.pdf`. Le standard IEEE 802.15.4 définit les spécifications suivantes :

- Bande ISM mondiale 2.4 GHz, offrant un débit de 250 kbps et 15 canaux.
- Bande ISM 902-928 MHz aux Etats Unis, avec un débit de 40 kbps ou 250 kbps et 10 canaux.
- Bande 868-868,6 MHz en Europe, avec un débit de 20 kbps, 100 ou 250 kbps et un seul canal.

La plupart des implémentation à cette date utilisent la bande de fréquence 2.4GHz. Cela pourrait évoluer à l'avenir car la nouvelle version 802.15.4g du standard ajoute plus d'options au niveau physique pour les fréquences inférieures au GHz, et notamment plus de canaux. Plus récemment, une nouvelle couche physique a été définie pour l'Ultra Wide Band (UWB) de 3,1 à 10,6 GHz.

A cette date, la majorité des déploiements IEEE 802.15.4 utilisent les protocoles ZigBee et 6LoWPAN dans la bande 2.4 GHz. La puissance de transmission est ajustable de 0,5 mW à une puissance maximale utilisable de 100 mW pour les bandes ISM en Europe. Pour limiter les dépenses énergétique des noeuds sur batterie, la puissance de transmission doit être maîtrisée afin de contenir les consommations. Une puissance de transmission de 1 mW à 2.4 GHz fournit une portée théorique d'environ 300m en extérieur, qui est réduite à moins de 100m en intérieur.

Le standard IEEE 802.15.4 n'utilise pas de mécanisme de sauts de fréquences rendant très important le choix du canal de communication. Les interférences avec les technologies FHSS sont uniquement intermittentes car les émetteurs FHSS ne restent jamais plus de 400 ms sur une fréquence donnée. De manière à minimiser les interférences avec les systèmes DSSS tels que WiFi (802.11 b/g) réglé pour opérer sur les 3 canaux qui ne chevauchent pas du standard IEEE 802.15.4, il est habituellement recommandé d'utiliser les applications IEEE 802.15.4 sur les canaux 15, 20 et 26 qui résident entre les canaux 1, 6 et 11 du WiFi.

IEEE 802.15.4 fournit tous les mécanismes de niveau MAC et PHY requis par les protocoles de plus haut niveau pour échanger des paquets de manière sécurisée et former un réseau. Il reste cependant un protocole très contraint:

- Aucun mécanisme de fragmentation et de réassemblage n'est proposé dans le standard. Comme la taille maximale des paquets est de 127 octets et que l'entête de niveau MAC et le Frame Check Sequence (FCS) prennent entre 6 et 19 octets, les applications doivent s'assurer de limiter la taille des paquets non sécurisés à 108 octets maximum. La plupart des applications requiert une sécurisation des communications. L'entête de sécurité ajoute entre 7 et 15 octets, et le code d'authentification du message prend entre 0 et 16 octets. Dans le pire des cas, il ne reste plus que de 77 octets pour les couches réseaux et supérieures.
- La bande passante est très limitée, et les débits réels observés sur ces réseaux sont bien loin des 250 kbps annoncés par le standard. En effet, les paquets ne peuvent pas être envoyés de manière continue. La couche physique doit attendre les acquittements au niveau MAC, et le mécanismes CSMA/CA d'accès au canal nécessite de nombreux temporisations. Après avoir pris en compte le surcoût de la couche physique et de la couche MAC, les applications ne peuvent prétendre qu'à un accès avec un débit maximum d'environ 50 kbps théorique, quand aucun autre appareil ne vient concurrencer l'accès au canal.

Avec ces limitations à l'esprit, IEEE 802.15.4 est clairement orienté pour des applications de réseaux de capteurs et de monitoring. ZigBee et 6LoWPAN introduisent des mécanismes de fragmentation qui permettent de s'affranchir du problème des trames de grande taille au niveau MAC. Une solution telle que la pile ZigBee prend le parti d'optimiser la pile protocolaire complète, jusqu'à la couche applicative. 6LoWPAN n'optimise que la couche réseau IPv6 et le protocole de routage, en partant du principe que les développeurs fassent un usage raisonnable de la bande passante.

Durant ces dernières années, il y a eu un regain d'intérêt sur l'utilisation du standard IEEE 802.15.4 pour des applications critiques telles que les réseaux électriques intelligents, faisant apparaître de nouveaux besoins :

- Le besoin de modulations supplémentaires, notamment dans les bandes inférieures au GHz. Ces bandes sont idéales pour les fournisseurs d'énergie qui ont besoin de solution RF à longues portées et d'une bonne pénétration du signal dans les bâtiments.
- Le besoin d'options supplémentaires au niveau de la couche MAC, pour permettre le saut de fréquence, l'écoute périodique et en général l'intégration de technologies récentes permettant une amélioration de la consommation énergétique, la résistance aux interférences et l'amélioration de la fiabilité.

2.2.1.2 802.15.4e

Ce groupe de travail a été formé en 2008 pour définir un amendement à la couche MAC du standard 802.15.4-2006, qui ne supportait qu'un seul mode, sur une fréquence unique. L'objectif du groupe 802.15.4e était initialement d'introduire du saut de canal synchronisé (TSCH), mais au fur et à mesure de l'avancement du groupe, le cadre a été étendu pour incorporer quelques nouvelles technologies de niveau MAC. 802.15.4e améliore également l'acquittement du standard 802.15.4-2006 (qui ne comprend ni information d'adresse, ni sécurité, ni données) et défini une nouvelle trame d'acquittement similaire à une trame classique de donnée. Le champ de donnée actuellement défini inclut une information de correction temporelle pour des raisons de synchronisation. Quelques une des nouvelles fonctionnalités majeures de 802.15.4e sont décrites ci dessous :

Coordinated Sampled Listening (CSL) : L'écoute périodique crée l'illusion du "toujours actif" pour des noeuds sur batterie, tout en gardant une consommation moyenne très basse. Ce principe est communément utilisée par d'autres technologies telles que KNX-RF. L'idée est que le récepteur est commuté périodiquement chaque macCSLperiod, (soit environ toutes les 5 ms), mais avec un rapport cyclique très bas. Du côté de la transmission, cela requiert que les émetteurs utilisent des préambules plus long que la période de réveil des destinataires, de manière à garantir que le noeud reçoive le préambule et garde son module RF active pour le reste de la transmission du paquet. Pour un rapport cyclique de 0,05%, et en assumant une période de réception de 5 ms, la périodicité du réveil (macCSLperiod) sera de 1 seconde, impliquant une latence de réception de 1 seconde maximum par saut. CSL est le mode idéal si la latence acceptable est de l'ordre de la seconde ou moins. 802.15.4e CSL utilise une série de micro trames comme préambule (paquets "chirp", un nouveau type de trames introduit dans 15.4e). Les micro trames sont composées de paquets IEEE 802.15.4 qui sont échangés l'un après l'autre et incluent un temps de rendez vous (RZtime) et un canal optionnel pour la transmission réelle de données. Les récepteurs se contentent de décoder un seul paquet "chirp" pour vérifier si la

donnée entrante leur est destinée. Si tel est le cas, il décide de retourner dans un état de sommeil jusqu'au prochain RZtime et de se réveiller à nouveau pour recevoir la trame de données seulement. CSL supporte le trafic en continu: un bit de trame en attente dans l'entête 802.15.4e informe le récepteur qu'il doit rester en écoute pour des paquets supplémentaires.

Receiver Initiated Transmission (RIT) : La stratégie de RIT est une simple stratégie d'économie d'énergie qui utilise de nombreuses technologies RF existantes; la couche applicative du noeud récepteur interroge périodiquement un serveur dans le réseau pour des données en attente. En utilisant le mode RIT, chaque macRitPeriod, le récepteur diffuse une trame "datarequest" et écoute pendant une courte période de temps (macRitDataWaitPeriod). Le récepteur peut également être mis en marche pendant une courte période après une réception de données. Le désavantage de cette approche est que la latence perçue par le récepteur est plus importante qu'avec la stratégie CSL, et que le multicast n'est pas supporté (il doit être émulé par de multiples unicast). La période d'interrogation est typiquement de 10 ms environ, ce qui veut dire que pour atteindre un rapport cyclique de 0,05% d'activité, la macRITPeriod doit être de 20s. RIT est adaptée à des applications de réseaux de capteurs, qui peuvent tolérer de longues latences de réception.

Time Synchronized Channel Hopping (TSCH) : Le saut de canal est une fonctionnalité très attendue dans IEEE 802.15.4:

- Cela ajoute de la diversité de fréquence aux autres méthodes de diversité (codage, modulation, retransmission, routage maillé), et améliore la robustesse des réseaux IEEE 802.15.4 aux perturbations transitoires du canal.
- Dans un réseau multi mode, il existe des situations dans laquelle trouver un canal commun utilisable par tous les noeuds est plus difficile. Avec le mécanisme de saut de canal, chaque lien entre noeud peut utiliser une fréquence dédiée.

Le saut de fréquence est supporté dans la nouvelle trame d'acquittement, qui contient des informations de synchronisation. Dans un réseau point à point non coordonné, la pénalité du saut de canal n'existe que pour la transmission initiale, car l'émetteur n'a pas besoin de continuer à envoyer des paquets "chirp" sur une fréquence donnée jusqu'à ce qu'il soit synchronisé avec la fréquence du récepteur. Après que le premier acquittement ait été reçu, l'émetteur et le récepteur sont synchronisés et l'émetteur sélectionnera la fréquence d'émission en fonction du canal prévu par le récepteur. Si tous les noeuds joins sont synchronisés, alors la synchronisation à un noeud particulier est suffisante pour assurer la synchronisation avec le réseau entier. Le mode TSCH définit par 802.15.4e défini le modèle opératoire d'un réseau où tous les noeuds sont synchronisés. La couche MAC des noeuds 802.15.4e peut être configurée avec certains "slotframes", un ensemble d'intervalle de temps qui se répètent, et caractérisés par le nombre d'intervalles dans le caractère cyclique, le canal de la couche physique supportée, ainsi que la liste des canaux sur 27 bits indiquant ceux qui doivent être utilisés pour les sauts de canaux. Chaque "slotframe" peut être utilisé pour configurer de multiples "liens". Chacun d'entre eux est caractérisé par la liste d'adresses des appareils voisins connectés au lien (ou 0xff indiquant que le lien diffuse à tout le monde), un paramètre "slotframeId", l'intervalle de temps dans la partie de la trame qui sera utilisée par ce lien, l'offset du canal du lien, la direction (récepteur, transmetteur ou partagé), et si ce lien doit être reporté dans les trames annoncées. Chaque noeud du réseau peut participer dans un ou plusieurs "slotframes" simultanément, et les intervalles de temps individuels sont toujours alignés parmi tous les slotframes.

2.2.1.3 802.15.4g

Le groupe de travail 802.15.4g concentre ses efforts sur des évolutions du standard IEEE 802.15.4 au niveau de la couche physique, en particulier pour répondre au besoin des réseaux électriques intelligents. Ce groupe de travail définit trois options de modulations :

- Multiregional Frequency Shift Keying (MR-FSK) : Offrant une transmission d'un débit typique de 50 kbps. "Mutliregional" signifie ici que le standard lie une liste de canaux donné à une modulation FSK spécifique (2GFSK, 4GFSK ...), ainsi qu'une fréquence et un débit donné. Le draft actuel contient de multiples variables pour chaque région, impliquant que les modules RF génériques 802.15.4g devront être très flexibles.
- Multiregional Orthogonal Quadrature Phase Shift Keying (O-QPSK) : Offrant une transmission d'un débit jusqu'à 200 kbps.
- Multiregional Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM): Offrant une transmission d'un débit jusqu'à 500 kbps.

Le nombre de bandes de fréquences est également augmenté pour couvrir les plupart des marchés mondiaux :

- 2400-2483.5 MHz (Mondial) : Toutes les modulations
- 1427-1518 MHz (US, Canada) : MR-FSK
- 950-956 MHz (Japon) : Toutes les modulations
- 922 MHz (Corée) : MR-OFDM
- 902-928 MHz (US) : Toutes les modulations
- 863-870 MHz (Europe) : Toutes les modulations
- 779-787 MHz (Chine) : O-QPSK et OFDM
- 470-510 MHz (Chine) : Toutes les modulations
- 450-470 MHz, 896-901 MHz, 901-902 MHz, 928-960 MHz (US) : MR-FSK
- 400-430 MHz (Japon) : Toutes les modulations

Le standard 802.15.4g est particulièrement intéressant en Europe, où le standard originel n'autorise q'un seul canal (868,3 MHz). Cette nouvelle révision du standard permet d'accéder aux bandes suivantes :

- 863.225 à 869.625MHz pas pas de 400kHz (MR-FSK 400kHz ou OFDM)
- 863.125 à 869.725MHz par pas de 200kHz (MR-FSK 200kHz)
- 868.3 à 869.225MHz par pas de 400kHz(O-QPSK)

Comme le nombre potentiel de standards RF IEEE et d'options de modulations augmente, le temps nécessaire au balayage des fréquences deviendrait prohibitivement long si un coordonateur devait balayer tous les canaux possibles en utilisant toutes les modulations possibles. Pour résoudre ce problème et améliorer la coexistence à travers les standards IEEE, 802.15.4g définit un nouveau format "coex-beacon", utilisant une méthode de modulation standard qui doit être supportée par tous les coordinateurs (le mode de signalement commun ou CSM définit dans 802.15.4g).

2.2.1.4 P1901

Le groupe 1901 de l'IEEE développe un standard pour les communications CPL hauts débits. Le sous groupe 1901.2 s'occupe en particulier des communications CPL dans le cadre des applications de type réseau électrique intelligent (débits plus faibles, grandes distances, réseaux de grande taille).

Le groupe 1901 travaille sur l'élaboration d'une norme pour les réseaux CPL hauts débits (> 100 Mbps au niveau de la couche physique) fonctionnant sur les lignes électriques à tension alternative. La norme utilise des fréquences de transmission en dessous de 100 MHz. Cette norme vise à être utilisable par toutes les classes d'équipements CPL, des dispositifs dédiés aux déploiements extérieurs aux technologies utilisées dans les bâtiments pour les réseaux domestiques (<100m entre les périphériques). Cette norme se concentrera sur la répartition de l'utilisation du canal de communications par toutes les classes de dispositifs CPL, la définition des mécanismes permettant la coexistence et l'interopérabilité, et veiller à ce que la bande passante désirée soit en phase avec la qualité de service visée. La norme se penchera sur les mécanismes de sécurité permettant d'assurer la confidentialité des communications entre les utilisateurs et l'utilisation du CPL pour des services de sécurité. Comme la plupart des standards IEEE, cette norme se limite à la couche physique et MAC du modèle ISO.

De nouvelles techniques de modulation offrent la possibilité d'utiliser les lignes électriques pour les communications à haute vitesse. Sans un organisme indépendant définissant un standard ouvert, les dispositifs CPL utilisés pour des applications différentes viendront créer des conflits entre eux et induire une qualité de service qui n'est pas acceptable pour les utilisateurs. La norme doit fournir un sous-ensemble minimal permettant la coexistence équitable des dispositifs CPL. La pleine mise en œuvre permettra l'interopérabilité entre les dispositifs CPL, ainsi que l'interopérabilité avec d'autres protocoles réseau, tels que les relais pour l'interconnexion transparente via 802.1. La norme devra également être conforme aux réglementations CEM fixées par les régulateurs nationaux, de manière à assurer le succès de leur coexistence avec le technologies sans fil et les systèmes de télécommunications. [49] fournit un aperçu plus complet des derniers travaux de standardisation menés dans le domaine du CPL.

2.2.2 IETF

La mission de l'IETF est de "rendre l'internet plus efficace". L'IETF ou "Internet Engineering Task Force", a pour mission de rendre l'Internet plus efficace d'un point de vue technique. Cette organisation produit des Request For Comments (RFC) qui définissent les protocoles de l'internet. IPv6, par exemple est la RFC 2460 [50]. Par rapport à l'IEEE, les protocoles définis par l'IETF définissent les couches supérieures aux standard IEEE, selon la vision du modèle OSI.

2.2.2.1 6LoWPAN

Le groupe de travail 6LoWPAN de l'IETF a été créé en 2004 pour concevoir une couche d'adaptation du standard IPv6 sur IEEE 802.15.4. Ce travail comprend un examen détaillé des besoins, qui ont été publiés en 2007 dans la RFC 4919 [51]. Une étude comparative des implémentations 6LoWPAN est donnée dans [52].

Dans la pratique cependant, 6LoWPAN ne se limite pas à des liaisons RF, et l'adaptation peut être étendue à d'autres supports tels que le CPL. IPv6 est également adapté à d'autres couches physiques, indépendamment de 6LoWPAN, par exemple pour le CPL. De nombreux fournisseurs de bus de terrain envisagent désormais une couche d'adaptation à IPv6 pour leurs produits. Les documents de référence pour 6LoWPAN sont :

- RFC 4944 [53]: "Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks"
- RFC 6282 [31]: "Compression Format for IPv6 Datagrams over IEEE 802.15.4-Based Networks" qui remplace le mécanisme de compression d'entête initialement définit dans la RFC 4944.
- RFC 6775 [32]: "Neighbor Discovery Optimization for IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs)" qui met à jour le mécanisme de découverte du voisinage pour s'adapter spécifiquement aux réseaux contraints de type LoWPANs.

6LoWPAN est conçu pour fonctionner sur les réseaux IEEE 802.15.4 et résout 4 principaux problèmes :

- Compression d'entête : Pour des réseaux alimentés par des batteries, les paquets d'entête volumineux sont synonymes de gaspillage d'énergie. L'IPv6 originel, avec des 40 octets d'entête est probablement l'un des pire candidats possibles pour de tels réseaux : sans compression, les données d'un simple paquet UDP n'aurait pas pu dépasser 53 Octets [54]. Avec ce nouveau standard, dans le cas le plus favorable, les entêtes 6LoWPAN et UDP ne requièrent que 6 Octets.
- Fragmentation et reconstitution des trames : Les réseaux basse puissance fonctionnent généralement avec des paquets de petite taille, afin de limiter les temps de transmissions et donc le coût énergétique. Aussi, les paquets courts sont moins sujets aux perturbations. Sur des réseaux IEEE 802.15.4 où la taille des trames est limitée à 127 Octets, le surcoût du niveau MAC (champs d'adresse, FCS, entêtes de sécurité) peut ne laisser que 81 Octets pour les niveaux IP et supérieurs. Le standard IPv6 requiert normalement le support d'une taille de paquet minimale de 1280 Octets.
- Adaptation du mécanisme de découverte de voisinage d'IPV6 définit originellement dans la RFC 4861 [55].
- Le support du "mesh under", permettant de faire du relayage de paquet au niveau MAC

2.2.2.2 ROLL

Le groupe de travail Routing Over Low-power and Lossy networks (ROLL) a été formé en 2008 pour créer un protocole de routage de niveau réseau adapté aux contraintes des réseaux maillés pour l'internet des objets : La première version de RPL a été finalisée en avril 2011. RPL est désormais publié dans la RFC 6550 [38]. Les principaux documents de références de ROLL sont :

- RFC 6550 [38], qui définit le protocole RPL lui même.
- RFC 6552 [56], qui définit une fonction objective générique (Objective Function 0) pour RPL
- RFC 6206 [57], qui définit l'algorithme trickle, une temporisation dynamique qui réduit les envois de messages de contrôle en fonction de la stabilité de la topologie
- RFC 6551[58], qui définit les métriques utilisables dans RPL.
- RFC 6719 [59], qui définit un mécanisme d'hystérésis sur les valeurs des métriques déclenchant des changements de parent, et ainsi limite les oscillations de la topologie
- draft-ietf-roll-p2p-rpl [60], qui définit un mécanisme d'optimisation pour les communications point à point (par exemple dans des scénarios d'automatisation présentant des flots de messages entre capteurs et actionneurs)

RPL spécifie un protocole de routage spécialement adapté aux besoins des communications IPv6 sur des réseaux LLNs, supportant le trafic point à point (P2P), les communications d'un serveur central vers une multitude de noeuds (point à multipoint, P2MP), et vice versa (multipoint à point, MP2P). La spécification RPL de base est optimisée principalement pour le trafic MP2P (trafic montant ou convergecast utilisé dans les applications de metering par exemple) ou P2MP, et le trafic P2P n'est optimisé que par l'intermédiaire d'un mécanisme additionnel tel que RPL-P2P. Ces réseaux LLNs sont un environnement contraint, qui présentent des besoins et des contraintes spécifiques qui ont été détaillées par le groupe ROLL dans les RFC5867 [61], RFC5826 [62], RFC5673 [63] et RFC5548 [64]. RPL a été conçu pour répondre de manière spécifique à ces besoins (typiquement sur des réseaux utilisant le standard 6LoWPAN), mais n'est pas limité aux opérations sur les LLNs. Plusieurs instances concurrentes de RPL peuvent fonctionner dans un réseau donné, chaque instance RPL étant caractérisée par un numéro d'instance (RPLinstanceID) unique. Les sections suivantes décrivent le comportement d'une instance individuelle de RPL.

Le protocole de routage RPL construit un ou plusieurs graphes acycliques orientés vers une destination (DODAG). Chaque DODAG est un graphe orienté sans boucles et ne possédant qu'une seule racine. Le graphe est construit selon un certain objectif d'optimisation spécifié par une fonction objective (OF, définie par un champ "Objective Code Point" (OCP) dans les options de configuration des messages "DODAG Information Objects", DIO). La fonction objective n'est pas spécifiée par RPL lui même, mais dans d'autres documents d'accompagnement et selon les besoins d'un domaine spécifique : Pour les métriques de réseau disponibles, l'OF calcule le rang du noeud, qui correspond à la distance entre ce noeud et la racine du réseau, et définit également les règles de sélection du parent. Par exemple, une fonction objective peut chercher à minimiser les délais des paquets, alors qu'une autre pourrait vouloir éviter de router des paquets par des noeuds alimentés sur batterie (voir RFC 6551[38]). RPL requiert des liens bidirectionnels. Cette propriété doit être vérifiée avant d'accepter un routeur comme

parent, en utilisant des mécanismes tels que Neighbor Unreachability Detection (NUD, [55] [32]), Bidirectional Forwarding Detection (RFC5881 [65]) ou encore des informations des couches basses tel que proposé dans la RFC5184 [66].

RPL utilise des messages de contrôles de type ICMPv6. Il en existe quatre sortes : DIO, DIS, DAO et DAO_ACK. Une version de chacun de ces messages est également définie pour le mode sécurisé de RPL. Les messages DODAG Information Objects (DIO) sont utilisés pour construire le DODAG: Ils contiennent des paramètres de configuration généraux et des informations permettant aux routeurs RPL de sélectionner un ensemble de parents. Les noeuds RPL envoient des DIO de manière périodique via des multicast locaux, et les noeuds peuvent requêter des DIOs de leurs voisins en diffusant un message DODAG Information sollicitation (DIS). Les Destination Advertisement Object (DAO) sont utilisés pour établir des routes descendantes et pour indiquer l'appartenance à un groupe multicast. Compte tenu de l'importance de ces messages dans la construction des routes, ces messages peuvent être acquittés au niveau RPL par des DAO_ACK. Les messages DAO ne sont pas rendu obligatoires par la spécification de RPL. Ils sont seulement requis si l'instance de RPL doit gérer du trafic P2MP (descendant) ou P2P.

Les messages DAO peuvent également transporter une liste de préfixes, considérés comme des destinations accessibles ou des groupes multicast, et des informations de transit qui sont utilisées pour indiquer les attributs d'un chemin vers une ou plusieurs destinations, telles que la durée de vie de la route. Chaque DODAG est identifié pour un numéro d'instance (RPLInstanceID) et un identifiant (DODAGID) unique, qui est construit de la racine vers les noeuds feuilles selon le mécanisme suivant :

- Les noeuds RPL, en commençant par la racine du DODAG, signalent leur présence, leur appartenance à un DODAG, leur rang et leur métrique en émettant des messages DIO (multicast lien local) à destination de tous les noeuds RPL. La racine du DODAG averti un rang ROOT_RANK (= MinHopRankIncrease), et spécifie également si le DODAG est "grounded", c'est à dire si il peut satisfaire la fonction objective utilisée.

- Les noeuds utilisent les informations reçues dans les DIO pour joindre un nouveau DODAG et sélectionner leur parent, ou maintenir leur affiliation avec un DODAG existant. Les noeuds sélectionnent leur parent en fonction des règles spécifiées par la fonction objective et le rang de leurs voisins qu'ils ont appris par les DIO qu'ils ont émis. Un premier ensemble de noeuds vont s'attacher à la racine du DODAG et commencer à émettre des DIO contenant l'instance de RPL et le DODAG ID, étendant la portée du DODAG. Comme les nouveaux noeuds vont commencer à entendre les DIO de l'instance RPL en cours de construction et s'y attacher, la portée du DODAG s'étend jusqu'à ce que tous les noeuds souhaitant s'attacher à cette instance de RPL aient été atteints.

RPL supporte deux modes pour gérer les routes descendantes. Chaque instance RPL supportant les trafics descendants sélectionne l'un de ces deux modes:

- Storing mode : Dans ce mode, les tables de routages sont distribuées dans le DODAG et les routeurs RPL conservent les routes localement. Les messages DAO, y compris les préfixes et les adresses accessibles par le noeud émetteur sont envoyés au parent préféré. Les parents enregistrent les routes descendantes dans leur table de routage locale et propagent les DAO vers la racine.

- Non Storing mode : Dans ce mode, tout le trafic descendant doit rajouter un entête de routage par la source contenant chacun des sauts le long du chemin, et les routeurs intermédiaires ne sauvegardent aucune information de routage. La table de routage complète est centralisé dans la racine. Les noeuds envoient des DAO unicastés à la racine du DODAG, incluant les préfixes et les adresses directement accessible par le noeud et ses parents (dans l'option "Transit Information"). L'ensemble des messages DAO permettent à la racine du DODAG de calculer un chemin optimal routé par la source pour chacune des destination connues. Ce mode présente d'importantes implications : Les messages sont plus long (ils incluent les informations de routage par la source), et le trafic P2P est toujours routé vers la racine du réseau. De plus, pour des réseaux de taille importante, la racine doit avoir assez de mémoire pour stocker toutes les routes descendantes du réseau.

2.2.2.3 CORE

Le groupe de travail CoRE travaille sur des applications orientées système, destinées à être utilisées sur des réseaux IP contraints tels que les LoWPANs.

Le but de ce groupe de travail est de définir un cadre pour une classe limitée d'applications : Celles qui concernent la manipulation de ressources simples sur des réseaux contraints. Cela inclut les applications de monitoring de capteurs (capteurs de températures, de présence, mesure de consommation électrique), les actionneurs (interrupteurs de lumière, contrôles du chauffage, gestion des ouvrants) et le management de ces appareils.

L'architecture générale consiste en des noeuds contraints responsables d'une ou plusieurs ressources qui peuvent représenter des capteurs, des actionneurs, une combinaison de valeurs ou d'autres types d'informations. Les noeuds envoient des messages pour changer ou interroger les ressources d'autres noeuds. Ils peuvent envoyer des notifications lors des changement de valeurs des ressources à des noeuds qui ont souscrit aux notifications de ces changements. Un noeud peut également publier ou être interrogé sur ses ressources. Typiquement, un simple hôte physique sur le réseau ne peut représenter q'un seul noeud, mais un hôte peut également représenter de multiples noeuds logiques. En tant que partie d'un ensemble permettant de construire ces applications, le groupe de travail CoRE a défini un protocole applicatif pour architectures contraintes (Constrained Application Protocol, CoAP [43]) pour la manipulation des ressources d'un noeud.

CoAP est conçu pour être utilisé entre des noeuds sur un même réseau contraint, entre des noeuds contraints et des machines génériques de l'internet, et entre des noeuds présents sur différents réseaux contraints reliés par l'internet. CoAP vise typiquement les environnements définis dans ROLL et 6LoWPAN, mais le protocole CoAP peut également être utilisé sur ces réseaux IP traditionnels.

Il peut également y avoir des proxys qui créent des interconnexions avec d'autres protocoles internet et les noeuds utilisant le protocole CoAP. CoRE a défini une adaptation entre CoAP et une API HTTP REST. Les proxys n'ont pas forcément besoin d'être à la frontière entre le réseau contraint et le réseau "traditionnel", ils peuvent également être déployés dans les réseaux non contraints.

CoAP supporte différentes formes de mise en cache. Par exemple, si un capteur de température est normalement endormi, se réveille toutes les 5 minutes et remonte une valeur de la température à un proxy vers lequel il est enregistré, quand le proxy reçoit la requête HTTP pour la ressource de température, ce dernier peut renvoyer la dernière valeur reçue du capteur plutôt que d'essayer d'interroger le noeud qui est actuellement endormi.

Le travail initial du groupe de travail a été de définir la spécification du protocole CoAP qui

inclut :

1. La possibilité de créer, lire, mettre à jour et effacer une ressource sur un noeud via l'utilisation de primitives REST.
2. La possibilité d'autoriser un noeud à publier une valeur ou un évènement à un autre noeud qui a souscrit aux notifications, de même qu'une manière pour un noeud de s'enregistrer aux publications d'un autre noeud.
3. La possibilité de supporter l'envoi de messages multicast non fiables à un groupe de noeuds pour manipuler une ressource sur tous les noeuds appartenants à un groupe.
4. La possibilité de fonctionner sur UDP, qui doit être implémenté sur des noeuds CoAP. Il peut y avoir des fonctions optionnelles (par exemple, l'envoi de paquets de données de grande taille) qui, si elles sont implémentées, le seront sur TCP. Les applications nécessitant les fonctions optionnelles de TCP se limitent principalement à un sous ensemble des cas de déploiement.
5. La définition de comment utiliser CoAP pour générer une requête permettant de retourner la description d'un noeud. Cette description peut inclure le nom du noeud et une liste de ressource, chacune avec un URL, une description URI des interfaces (pointant par exemple vers la description d'un langage d'une application web) et un nom ou un identifiant optionnel. La taxonomie des noms utilisés pour cette description est cohérent avec d'autres travaux de l'IETF tels que la RFC 6763 (DNS-Based Service Discovey [67]).
6. La capacité de l'API HTTP basée sur REST à communiquer avec des noeuds. La translation utilise les informations de description des noeuds, et ne nécessite pas de mise à jour logicielle pour s'adapter à de nouveaux noeuds.
7. La considération des aspects opérationnels et de management du protocole, et au minimum un moyen d'indiquer si un noeud présente des contraintes d'énergie.

Le groupe de travail CoRE a produit 4 principaux drafts, amenés à passer RFC prochainement:

- RFC 6690, CoRE link format [68]
- draft-ietf-core-observe [69]
- draft-ietf-core-coap [43]
- draft-ietf-core-block [70]

Le draft principal est core-coap [43] qui définit exactement le format des paquets permettant l'utilisation des primitives de type REST sur des réseaux contraints.

Le draft link-format, devenu la RFC 6690 [68] définit le format des liens web à utiliser par des serveurs web contraints pour décrire les ressources hébergées, leurs attributs, et les relations entre les liens.

Le draft observe [69] spécifie une extension du protocole CoAP qui permet à un serveur de répliquer l'état d'une ressource aux clients concernés. Le protocole suit une approche best-effort en transmettant les états d'une nouvelle ressource à un client, et peut fournir de la cohérence entre les états observés par le client et l'état réel de la ressource.

Le draft block [70] étend les fonctions originelles de CoAP avec l'option "block", permettant de transférer de multiples blocs d'informations depuis la représentation d'une ressource en de multiples échanges de type requête-réponse. Dans de nombreux cas, l'option block permet à un serveur de fonctionner sans état. Le serveur peut gérer chaque bloc transféré séparément, sans besoin de paramétrage d'une connexion ou d'un rappel des précédents blocs transférés du côté du serveur. En résumé, l'option block permet de transférer de gros blocs de données de manière simple, en les fragmentant en blocs élémentaires.

2.2.2.4 LWIG

Ce groupe de travail dont le nom signifie Light-Weight Implementation Guidance (LWIG), se concentre sur l'aide aux implémenteurs de systèmes contraints. L'objectif est de permettre la conception d'appareils embarquant une pile IP minimale mais néanmoins interopérable pour des environnements contraints.

Ce groupe de travail permet de collecter des expériences d'implémenteurs de piles IP pour ces types de réseaux. Le groupe se concentre uniquement sur des techniques qui ont été utilisées dans des implémentations réelles, sans impacter l'intéropérabilité avec d'autres appareils. Ces techniques ne doivent également pas affecter la conformité avec les spécifications existantes. Le groupe doit produire un document décrivant les techniques d'implémentation permettant de réduire la complexité, l'empreinte mémoire, ou la consommation d'énergie du noeud. Les sujets traités par ce groupe sont choisit parmi les protocoles suivants : IPv4, IPv6, UDP, TCP, ICMPv4/v6, MLD/IGMP, ND, DNS, DHCPv4/v6, IPsec, 6LoWPAN, COAP, RPL, SNMP et les protocoles du groupe de travail NETCONF. Ce document sera utile pour les implémenteurs de nouveaux appareils ou pour les implémenteurs de nouvelles micro pile IP en général. Ce document devrait également augmenter les connaissances sur la manière dont fonctionnent les micro implémentations existantes, et contribuer à leur futures optimisations.

Des conseils d'ordre généraux sur la conception matérielle et les techniques d'implémentation logicielle n'entrent pas dans le cadre du travail de ce groupe, car ce type d'expertise n'est pas du ressort de l'IETF. Les expériences d'implémentation de protocole, cependant, correspondent au cadre de l'IETF. Le groupe ne développe pas de nouveaux protocoles ni ne modifiera leur comportement au delà de ce qui est autorisé par les RFC existantes, car il est important de s'assurer que les différents types d'appareils pourront toujours fonctionner ensemble.

2.2.2.5 COMAN

Ce groupe de l'IETF n'est pas un groupe de travail mais simplement une liste de diffusion créée récemment (`coman@ietf.org`) et dont les archives sont consultables à l'adresse `http://www.ietf.org/mail-archive/web/coman/`. Coman signifie "Management of Constrained Networks and Devices". Cette liste de discussion est donc en rapport avec la gestion des réseaux et des appareils contraints, tels que les objets intelligents et le type de noeuds considérés dans les groupes de travail précédemment cités. En effet, outre les protocoles permettant à ces noeuds contraints de former un réseau et de communiquer entre eux, l'IETF n'a pas encore développé de solution spécifique pour leur management. Cette liste de diffusion vise à combler ce manque et exposant tout d'abord clairement quelles sont les besoins pour gérer ces nouveaux types de réseaux et d'appareils. Le groupe a déjà produit une première version d'un document

synthétisant ces besoins [71]. Ce document devrait servir de base à l'élaboration de solutions de management pour les réseaux contraints.

2.2.2.6 SOLACE

De même que COMAN, SOLACE est également une liste de discussion. SOLACE signifie "Smart Object Lifecycle Architecture for Constrained Environments". Cette liste permet de discuter du besoin d'un standard pour gérer efficacement la mise en place, et l'association sécurisée d'objets intelligents. Une présentation de cette liste a été faire lors de l'IETF 83 à Paris, en mars 2012 (`http://www.ietf.org/proceedings/83/slides/slides-83-saag-3.pdf`). Un premier draft [72] a été publié en septembre 2012, décrivant l'architecture, les canaux de communication et une méthode d'association sécurisée. Cette initiative vise à se reposer sur les travaux existants effectués dans les groupes de travail 6LoWPAN, ROLL ou CoRE afin de proposer une solution spécifiquement dédiée à ce problème, qui a souvent été abordé mais jamais réellement résolu dans ces précédents groupes. Ce groupe devrait donc travailler en étroite collaboration avec ces autres groupes de travail, afin de proposer une solution compatible avec la philosophie et les protocoles qu'ils ont spécifiés.

2.2.3 ETSI

2.2.3.1 ETSI M2M

L'ETSI, d'une manière générale, s'occupe de la standardisation des fonctions et des éléments utilisés généralement dans les réseaux. Le comité technique ETSI M2M a été créé en janvier 2009, à la demande de nombreux opérateurs télécom, pour créer une architecture standard de niveau système pour les déploiements M2M à très large échelle. Ce comité n'adresse pas un domaine en particulier. Au contraire, son ambition est de devenir l'infrastructure commune de toutes les applications M2M large échelle.

Comme la plupart des protocoles récents d'automatisation, l'architecture ETSI M2M est centrée sur les ressources et adopte le style REST. Les 4 commandes basiques de REST (Create, Read,Update, Delete - CRUD) sont complémentées au niveau fonctionnel par les primitives execute, subscribe et notify à un niveau inférieur.

Il est espéré que ETSI M2M devienne l'architecture de niveau système de l'internet des objets, de la même manière que GSM ou UMTS (également spécifiés par l'ETSI) sont devenues les architectures dominantes pour les communications mobiles. ETSI M2M ne prétend pas remplacer les standards existants ou les protocole propriétaires. Il vise à intégrer tous ces protocoles dans une architecture commune, facilitant l'accès à n'importe lequel de ces protocoles et réseaux depuis n'importe quel service hébergé, contrôlé à la manière d'un opérateur.

2.3 Alliances industrielles

Certaines alliances n'ont pas attendu que les standards actuels soient établit pour créer des piles protocolaires complètes (EnOcean, ZigBee, Zwave), mais ces dernières migrent progressivement vers ces standards, capitalisant sur leur expériences et leur avance (Profils et Function Set pour ZigBeeZigBee, Harvesting pour EnOcean, Radio basse consommation pour Zwave). Certaines alliances ont vu un peu plus tard l'opportunité des réseaux de capteurs (Dash7) et reviennent dans la course à grand renfort de marketing. Certaines alliances sont destinées à promouvoir ces standards ouverts (IPSO) par l'organisation de webinaires, évènements d'intéropérabilité ou publication de livres blancs. Des alliances concentrées spécialement sur le CPL (Homeplug,

G3 alliance, PRIME alliance), ont une approche bottom-up et cherchent avant tout à promouvoir leur technologie pour s'adapter aux cas d'usages se rapprochant des réseaux de capteurs (principalement instrumentations des bâtiments et Réseaux Electriques Intelligent).

2.3.1 IPSO

L'alliance IPSO est une organisation à but non lucrative permettant de cristalliser une communauté cherchant à établir le protocole IP comme la solution réseau idéale pour interconnecter tous les objets intelligents, en fournissant un support marketing envers les professionnels et le grand public. La mission de l'alliance est de fournir des fondations solides pour le développements de cette industrie en construisant des relations plus fortes, regroupant les connaissances, éduquant les acteurs, promouvant l'industrie, stimulant la recherche, et créant une meilleure compréhension d'IP et de son rôle pour connecter les objets. Les buts de cette alliance sont les suivants :

- Promouvoir IP comme la solution idéale pour accéder et communiquer avec des objets intelligents.
- Promouvoir l'utilisation d'IP dans les objets intelligents en développant et publiant des livres blancs et des études de cas, en fournissant des mises à jour sur la progression des standards d'associations telles que l'IETF, et par le support marketing d'autres activités.
- Comprendre les industries et les marchés où les objets intelligents peuvent avoir un rôle majeurs quand ils sont connectée via IP.
- Organiser des tests d'interopérabilité permettant aux membres de montrer que les produits et services utilisant IP pour les objets intelligents, peuvent fonctionner ensemble et répondre aux standards de communication industriels.
- Supporter l'IETF et les autres organisation de développement de standards dans leurs développements autour d'IP pour les objets intelligents.

L'objectif de l'alliance n'est pas de définir des technologies, mais de documenter et de supporter l'utilisation de technologies reposant sur IP et spécifiées dans d'autres organisations telles que l'IETF, à travers différents cas d'usage.

2.3.2 Enocean

Cette alliance se définit comme le standard sans fil et sans pile pour des bâtiments durables.

Cette alliance est un consortium d'entreprises travaillant sur le développement et la promotion des systèmes de surveillance et de contrôle sans fil et auto-alimentés pour l'instrumentation de bâtiments, par l'utilisation d'un standard sans fil interopérable. De nombreux réseaux de contrôle de bâtiments utilisant des produit EnOcean sont déjà installés et opérationnels à travers le monde.

La mission de l'alliance est de promouvoir la technologie EnOcean et de permettre la réalisation de bâtiments moins consommateurs en énergie par la création d'une large base de produits sans fils interopérables. La particularité des produits EnOcean est qu'ils sont la plupart du temps auto alimentés par un système de récupération d'énergie. Ce système récupère principalement l'énergie solaire (via des cellules photovoltaïques), mécanique (via un système piézo-électrique), ou crée de l'énergie à partir d'une différence de température (effet Peltier).

Un groupe d'entreprises européenne et nord américaines forment actuellement l'alliance. Leur but est d'établir les technologies sans fil et de récupération d'énergie utilisées par les produits EnOcean comme un standard pour les bâtiments durables. Leur but est également de promouvoir le marché mondial de ces produits en initiant le développement de spécifications pour garantir l'intéropérabilité entre les différents profils de capteurs.

2.3.3 ZigBee

L'alliance ZigBee a été créé en 2002. C'est une association non lucrative de membres qui ont été parmi les premiers à croire au développement du marché des capteurs sans fils.

La mission de l'alliance est de faire travailler ses membres ensemble pour développer des standards commun qui permettront aux capteurs utilisant le même profil applicatif de communiquer entre eux.

Les produits ZigBee sont basse consommation et utilisent des solutions de réseaux sans fil standards centrées sur des applications de surveillance et de contrôle. Le standard ZigBee permet de créer des produits qui s'alimentent par des systèmes de récupération d'énergie, ou des batteries et d'atteindre des durées de vies de plusieurs années grâce à l'utilisation de standards RF très basse consommation tels que IEEE 802.15.4. Les solutions ZigBee offrent une grande variété de fonctionnalités, permettant leur déploiements dans tout type d'environnement et dans la plupart des pays du monde. Elles sont destinées à être simple à mettre en oeuvre, et à réduire au minimum les coûts de maintenance en garantissant leur autonomie vis à vis de la maintenance.

2.3.4 Zwave

L'alliance Z-Wave est un consortium mondiale d'environ 160 entreprises qui utilisent la technologie Z-Wave dans leur produits et leurs services. Les membres de l'alliance collaborent sur l'avancement de cette technologie et sur les solutions pour des marchés tels que les maisons intelligentes, la gestion efficace des énergies, la sécurité, la contrôle à distance des bâtiments etc. L'alliance dispose d'un laboratoire pour les tests d'interopérabilité et de coexistence qui est ouvert aux membres et même aux non membres de l'alliance.

Les produits Z-Wave communiquent en utilisant une technologie sans fil basse consommation conçue spécialement pour des applications de contrôle à distance. Le protocole radio Z-Wave est optimisé pour les échanges de petits paquets de données avec une bonne fiabilité et une faible latence. Z-Wave utilise les fréquences inférieures au GHz (autour de 900 MHz) pour communiquer. Cette technologie est conçue pour être intégrée facilement dans des produits d'électronique grand public, incluant les appareils alimentés par batterie tels que les télécommandes, les détecteurs de fumée ou encore les capteurs de sécurité. Le technologie Z-Wave a été développée par une start-up danoise, Zen-Sys, qui a été rachetée par Sigma Designs en 2008. Cette technologie est actuellement supportée par plus de 160 fabricants mondiaux, et est implantée dans une large gamme de produits grand publics aux US, en Europe et en Asie. Le standard n'est pas ouvert et n'est disponible que pour les clients de Sigma-Designs sous couvert d'une clause de non-divulgation. Tous ces produits utilisent le module Z-Wave fournit par Sigma-Designs et Mitsuki. Z-Wave est un protocole RF propriétaire orienté pour les marchés du contrôle et de l'automatisation résidentielle.

2.3.5 Dash7

L'alliance DASH7, formée en 2009, promeut l'utilisation d'une technologie RF inférieure au GHz, le développement de modules et la mise production d'appareils embarquant cette technologie tout en assurant leur interopérabilité. L'objectif principal de l'alliance est d'assurer

l'intéropérabilité parmi les appareils DASH7, tout en éduquant le marché sur cette technologie. Les buts de l'alliance DASH7 sont :

- De développer des améliorations et des extensions au standard DASH7 (ISO 18000-7).
- De travailler afin d'assurer que les produits utilisant la technologie DASH7 sont conformes aux spécifications
- D'encourager le développement de produits utilisants la technologie DAH7
- D'éduquer les particuliers et les entreprises sur la technologie DAH7

DASH7 est un standard pour les réseaux de capteurs sans fils open source, fonctionnant dans la bande ISM à 433 MHz. Les produits DAH7 sont conçus pour offrir une durée de vie de plusieurs années, une portée jusqu'à 2 km, une localisation dans les bâtiments avec un précision de 1m, une faible latence, une très petite pile protocolaire open source, un cryptage AES 128 et un débit jusqu'à 200 kbps.

2.3.6 Wave2m

Wave2M est une communauté indépendante d'entreprises qui se sont associées pour adopter et promouvoir le standard ouvert WAVE2M. Cette technologie sans fil et bidirectionnelle, créée en 2000, est dédiée aux applications qui nécessitent de petites quantités de données avec un trafic RF faible et une très basse consommation d'énergie.

Un différentiateur important de la technologie Wave2M est que ce n'est pas un protocole orienté application, ce qui signifie que cette technologie définit les couches basses et peut supporter une grande variété de standard ou de protocoles propriétaires de plus haut niveau. Plus de 2 millions de noeuds utilisants cette technologie sont déjà installés dans de petits, moyens et grands déploiements de réseaux mesh. Les produits Wave2M sont répartis dans les catégories suivantes : Gestion automatique des compteurs et des remontée de données; Automatisation des maisons et des bâtiments; Automatisation industrielle, télémétrie, et applications de traçabilité, RFID pour des tags personnels et des systèmes de logistique; sécurité et alarmes.

La technologie Wave2M peut être déployée partout dans le monde dans la majorité des bandes ISM libres, et est compatible avec les standards de régulations suivants :

- 868 MHz (Europe) avec régulation stricte du rapport cyclique
- 915 MHz (US) avec étalement de spectre
- 433 MHz (Asie) comme une extension immédiate (pas de restriction du rapport cyclique)

Les débits de cette technologie sont programmables, de quelques kbps à une centaine de kbps. La plupart des applications WAVE2M utilisent de faibles débits (typiquement 19,2 à 38,4 kbps). Toutefois, ce débit peut être augmenté quand de grandes quantités de données doivent être transmises. Les bas débit permettent l'utilisation d'une bande de fréquence étroite (augmente la sensibilité), avec un budget de lien plus élevée, et donc une couverture RF étendue.

2.3.7 G3 alliance

G3-PLC et PRIME sont deux technologies CPL non-interopérables supportées pas les fournisseurs d'énergie pour les communications entre compteurs. En Europe, les 2 utilisent les bandes CENELEC pour communiquer mais elles ont également l'intention d'utiliser les bandes FCC jusqu'à 500 kHz aux US.

G3-PLC est la spécification de communication CPL promue par Maxim et ERDF pour des applications de réseau électrique intelligent. G3 est utilisé dans les déploiements de ses compteurs communicants "Linky" de seconde génération, les premières générations ayant été déployées avec la version précédente de cette technologie: G1(modulation S-FSK et débit plus faible). Les principales spécifications de G3 sont :

- Plage d'opération entre 10 kHz et 490 kHz, compatible avec les bandes FCC, CENELEC et ARIB
- Coexiste avec les standards IEC 61334, IEEE P1901 et ITU G.hn
- Peut transmettre des informations sur les basses et moyennes tensions (BT-BT, MT-MT et MT-BT).
- Utilise une modulation OFDM
- Utilise une couche MAC basée sur le standard IEEE 802.15.4
- Possède une couche d'adoption 6LoWPAN, permettant de véhiculer de l'IPv6 sur CPL
- Gère la cryptographie AES-128
- Peut estimer la qualité d'un canal et adapter sa modulation en conséquence.

Dans la bande CENELEC A, réservée aux fournisseurs d'énergie, la modulation OFDM est basée sur la division de la bande en 70 harmoniques. Ces harmoniques peuvent être modulées en DBPSK (1 bit par harmonique) ou DQPSK (2 bits par harmonique).

L'alliance G3-PLC, initiée par ERDF, a été formée de manière à supporter, promouvoir et implémenter G3 pour des applications de smart-grid. Ses membres proviennent de la plupart des acteurs majeurs de l'écosystème du smart-grid, comprenant des fournisseurs d'énergie, des fabricants d'équipements et de semi conducteurs, des intégrateurs, des vendeurs de solutions informatiques et des entreprises de l'automobile (pour anticiper l'interconnexion des véhicules électriques au réseau de distribution).

G3-PLC est une technologie CPL basée sur une modulation OFDM développée par Maxim pour répondre aux besoins de ERDF.

Les objectifs de l'alliance sont de :

- Supporter G3 dans des organismes de standardisations internationaux pour permettre l'adoption rapide de sa spécification au niveau mondial.
- Développer une infrastructure pour les équipements de test pour faciliter l'intéropérabilité entre les utilisateurs de G3
- Eduquer le marché et promouvoir la valeur, les bénéfices et les applications compatibles avec G3

- Etablir un forum et encourager les membres du consortium à se rencontrer pour discuter des révisions suggérées et des améliorations de la spécification; Fait des soumissions appropriées aux organismes de standard internationaux afin de ratifier la spécification G3.
- Rencontrer les développeurs et les fournisseurs des produits compatibles G3 pour identifier des besoins pour l'intéropérabilité et l'utilisation générale.

La technologie G3 est capable de fonctionner dans des environnements difficiles, grâce à un mode de communication "robuste" (mode ROBO) qui améliore la sensibilité au prix d'une réduction des performances. La technologie G3 coexiste avec les autres technologies CPL haut débit et S-FSK (utilisée dans G1).

[33] présente des résultats de simulation et de déploiement de la technologie G3. Cette étude se concentre particulièrement sur les capacités de communication de cette technologie, plutôt que sur sa capacité à gérer un réseau de grande taille. Un signal est injecté en un point du réseau électrique et un récepteur vient calculer les performances de la communication. Le premier test est effectué sur une ligne basse tension en zone urbaine dans le centre de la France. Une atténuation de 30 dB est mesurée sur ce lien CPL, en particulier à cause des différences de métaux utilisés entre les câbles (une partie est en cuivre, l'autre partie en aluminium), occasionnant une rupture d'impédance et des réflexions entre ces 2 sections de câbles. Toutefois, les résultats montrent un taux d'erreur de 0%, mais le nombre de trames envoyées et la durée de l'observation ne sont pas mentionnés. Les performances sont symétriques sur ce lien CPL et le débit observé est de 17,28 kbps dans les 2 sens de communication. Une expérience similaire est menée sur le réseau MT (20 kV) avec une distance de 6,4 km entre les 2 points. Les débits et le taux d'erreur observés sont strictement identiques à l'expérience précédente sur basse tension. Enfin une configuration MT/BT est testée, avec une distance de 2 km entre les 2 points. Dans cette dernière configuration, le signal G3 passe donc à travers un transformateur MT/BT. Les résultats montrent une baisse significative du débit moyen et du taux de succès : 8,64 kbps et 1% d'erreurs dans le sens MT-BT et 2,68 kbps et 10% d'erreurs dans le sens BT-MT. Alors que dans les 2 précédentes expériences, la modulation DQPSK permettait d'atteindre des performances correctes, dans ce dernier cas, le mode ROBO a été quasiment systématique, diminuant de fait les performances. Cette expérience illustre bien l'ordre de grandeurs des performances des technologies CPL bas débits que nous considérons dans cette thèse.

2.3.8 PRIME Alliance

L'alliance PRIME (PoweRline Intelligent Metering Evolution) se concentre sur le développement d'une nouvelle solution CPL ouverte, publique et non propriétaire pour des applications de compteurs intelligents et de réseau électrique intelligent. C'est une solution concurrente à G3.

Créée en mai 2009, l'alliance comptait plus de 20 membres à a fin de l'année 2010. Les principaux membres sont ST micro, TI, Itron, Landis & Gyr, Iberdrola, Current, ADD et ZIV.

Tout comme G3, PRIME est basée sur une modulation OFDM dans la bande CENELEC-A, et peut atteindre un débit de 100 kbps. Le signal OFDM peut utiliser différents type de modulations pour adapter les performances aux conditions de propagation du canal. L'alliance fournit un espace de discussion pour la création de la spécification. Sa mission est d'accélérer la demande de produits et de services basé sur des standards internationaux et de promouvoir l'adoption à large échelle et l'utilisation de la spécification PRIME en assurant l'intéropérabilité entre les différents fabricants et la compatibilité avec les standards existants.

PRIME définit les couches basses du modèle OSI (PHY et MAC). L'architecture a été conçue pour permettre de bonnes performances à des coûts maîtrisés. PRIME définit 3 couches :

- Sous-Couche de Convergence : Cette couche permet l'adaptation de n'importe quel type de trafic dans une trame MAC appropriée. De multiple couches de convergences sont définies de manière à supporter une large gamme de type de trafic.
- Couche MAC : Cette couche offre les fonctionnalités MAC principales du système, l'accès au médium, l'allocation de la bande passante, la gestion des connexions et la création de la topologie. Elle a été définie pour des connexions orientées maître-esclave, et optimisée pour les transmissions sur le réseau électrique basse tension.
- Couche Physique : Cette couche permet les échanges de données entre noeuds voisins. Elle définit le multiplexage OFDM dans la bande CENELEC-A et permet d'atteindre un débit supérieur à 100 kbps dans des conditions idéales.

Des résultats de tests d'intéropérabilités et de déploiements de la technologie PRIME sont présentés dans [73]. Cette étude décrit les résultats obtenus lors d'un déploiement de 36 points PRIME sur un réseau urbain triphasé dans la ville de Mägenwil en Suisse. Un module PRIME a été installé sur chacune des 3 phases desservant les bâtiments ou les logements instrumentés. Cette expérience montre que tous les points ont été atteint depuis la station de base située dans le transformateur MT/BT. Les résultats montrent un temps de réponse moyen de 200 à 400 ms, un nombre de retransmissions non négligeables (environ 300 rémissions pour 1600 transmissions), et la nécessité de renvoyer parfois une trame un grand nombre de fois (jusqu'à 10 fois maximum). Ce papier étudie également le passage à l'échelle de la technologie PRIME à travers un déploiement de 613 noeuds à Madrid. Le signal a été injecté sur chacune des 3 phases. Les résultats montrent que 28 noeuds ont du agir comme des routeurs afin de joindre tout les noeuds, pour former une topologie à 2 étages de répétition (c'est à dire des chemins nécessitant 2 relayages). Dans le cas de l'utilisation d'une station de base ZIV (injection du signal sur une seule phase) sur une durée de 7 jours, un taux de succès de 96,47% a été relevé au niveau applicatif, avec un temps de réponse moyen compris entre 200 et 400 ms, et le besoin d'au moins une retransmission pour environ 10% des paquets émis. Une dernière expérimentation fait état d'un déploiement de 191 noeuds dans la ville Bilbao, joignable directement depuis la station de base. Durant une période de 9 jours, 576 échecs de lectures ont eu lieu sur un total de 41204 tentatives, soit un taux de succès de 98,6 % au niveau applicatif.

Par rapport au standard G3, le standard PRIME permet d'atteindre des débits plus importants mais est moins résistants aux perturbations CPL. Cette technologie semble dont plus adaptée à des environnements "propres", où les hauts débits offerts par PRIME pourront être exploités. A l'inverse un environnement difficile (présentant de nombreuses perturbations), ou nécessitant de passer différents niveaux de tensions (BT-MT) est plus adapté au déploiement de G3, qui offrira cependant des débits réduits. Une comparaison des deux technologies est présentées dans le [74]. Cette étude se concentre sur des études théoriques et des simulations des couches physiques définies dans ces 2 standards. Cette étude confirme la meilleure robustesse de la technologie G3 aux perturbations, et les meilleures performances de PRIME dans la cas ou le canal présente peu ou pas de perturbations.

Les technologies PRIME et G3 ont été toutes deux retenues pour être intégrées dans les futurs standards IEEE P1901.2 et ITU G.hnem.

2.3.9 Homeplug Powerline Alliance

Homeplug est une alliance industrielle comprenant les leaders des solutions CPL. Les membres de cette alliance apportent les capacités et le financement nécessaire au développement des technologies Homeplug. Contrairement à G3 et PRIME qui sont utilisés sur des réseaux électriques extérieurs, les technologies développées par l'alliance Homeplug sont des solutions réseaux CPL domestiques. La mission de l'alliance est de permettre et de promouvoir la disponibilité, l'adoption et l'implémentation à des coûts maîtrisés de ces technologies. L'alliance s'occupe également de l'intéropérabilité et de la standardisation des solutions réseaux CPL qu'elle conçoit.

Homeplug et Homegrid sont des alliances industrielles qui visent à publier des spécifications ou des livres blancs sur les technologies CPL. Depuis 2000, Homeplug a créé différents produits standard permettant des communications haut débit sur CPL. Ces alliances participent également activement dans des organisations d'élaboration de standards tels que l'IEEE et l'ITU.

Les standards Homeplug sont tous des technologies CPL haut débit reposant sur une modulation OFDM dans les bandes de fréquence supérieures à 2 MHz.

Les performances typiques de ces technologies sont données ci dessous :

- HP V1.0 : Débit physique jusqu'à 14 Mbps
- HP AV : Débit physique jusqu'à 200 Mbps
- HP AV2 compatible avec le standard IEEE P1901 : Débit physique jusqu'à 400 à 600 Mbps
- HP GreenPhy est un profil basse consommation du standards IEEE P1901 dédié aux applications de smart-grid et offre un débit physique jusqu'à 10 Mbps.

De tels niveaux de performances, sur un médium aussi difficile que le réseau électrique résidentiel ne sont rendues possible que par l'utilisation de DSP complexes, d'un niveau d'émissions et de consommation énergétiques élevé. Le débit réel au niveau utilisateur tombe généralement à un quart du débit maximum atteignable au niveau physique sur des réseaux réels. La plupart des solutions CPL grand publics (modules CPL pour relier 2 équipements informatiques, tels que les modules Freeplug) reposent sur le standard Homeplug AV.

Chapter 3

Le CPL

3.1 Présentation du média

Même si la première impression que peut donner le CPL est que "un média câblé, comme Ethernet, est donc un média à diffusion, fiable et facile", cela n'est malheureusement pas du tout le cas !

Considérant l'avantage principal des communications CPL qui est la réutilisation de câbles existants, il semblerait logique que cette technologie soit déjà largement déployée dans le cadre d'instrumentations de maisons et de bâtiments. Cependant force est de constater que cela n'est pas encore le cas, et que les technologies RF ou utilisant des bus dédiés (type RS485 ou fil pilote) sont bien plus présentes que le CPL.

Nous allons montrer dans ce chapitre que le CPL, et en particulier la technologie WPC présente de nombreuses caractéristiques communes avec le média RF IEEE 802.15.4 et constitue une solution viable pour l'instrumentation des bâtiments et les applications de réseaux de capteurs.

Pendant des décennies, le CPL a rendu possible le fait d'utiliser des câbles d'alimentation électrique pour envoyer et recevoir des données. Cette approche réutilisant des câbles existants a fait du CPL l'un des meilleurs candidats technologiques pour les applications de réseaux électriques intelligents, comparé aux autres technologies câblées. Cependant, comme les technologies CPL utilisent un support physique qui n'a pas été pensé pour la communication, elles se sont confrontées à de très nombreux challenges techniques, limitant leur adoption à certains marchés de niches ou à certaines applications dédiées à très bas débits. Le relatif manque de robustesse de ces communications, et la non prédictibilité de ce média comparé aux solutions RF concurrentes ont également limité l'adoption des technologies CPL.

Plus récemment, le développement des techniques de modulations modernes de type OFDM dans des circuits intégrés ont rendu possible l'amélioration de la fiabilité et l'augmentation des débits sur de nombreux média, y compris sur le CPL. Combiné à la flexibilité de protocoles émergents tels que 6LoWPAN, un marché beaucoup plus large s'est ouvert au CPL, venant concurrencer directement certaines solutions sans-fil.

3.1.1 Principe du CPL

Le principe du CPL repose sur le fait de faire passer de la puissance et des données sur un même câble. Plus exactement, le CPL consiste à ajouter au signal véhiculé sur un câble de puissance d'autres signaux pour transmettre des données. La puissance est transmise par des hautes amplitudes électriques et des basses fréquences (110 ou 220V et 50 ou 60Hz), tandis que les données sont transmises par des faibles amplitudes électriques à des fréquences plus élevées (quelques Volts, dans la limite des normes de compatibilité électromagnétique, et des fréquences de quelques kHz à quelques dizaines de MHz.). Le CPL consiste donc à superposer ces deux signaux sur un même câble, comme représentée sur la figure 3.1. La grande majorité des solutions CPL déployées aujourd'hui utilisent les réseaux électriques de puissance dont la tension est alternative. Quelques solutions CPL existent sur courant continu, dans des cas d'usages particulier tels que l'automobile.

L'intérêt du CPL est de capitaliser sur les infrastructures câblées existantes qui coûtent cher à installer, et de leur rajouter une fonction sans nécessiter d'investissements lourds. Ainsi, le CPL est également connu comme une technologie "sans câble supplémentaire".

Cette idée n'est pas récente, puisque un premier brevet nommé "Carrier Transmission Over Power Circuits" a été déposé par Maurice E. Strieby en 1924 [75]. Le CPL s'est beaucoup développé au début des années 80, avec l'avènement de la technologie X10 [76]. Cette technologie très simple consistait à moduler un signal à 120 kHz autour du passage par 0 Volts du secteur. Des séquences ont été définies afin de réaliser des ordres simples tel que mettre en marche ou

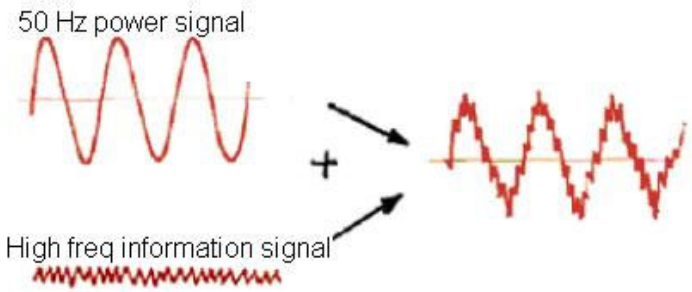


Figure 3.1: Le principe du CPL : superposer un signal de données à un signal de puissance

éteindre un appareil équipé de cette technologie. X10 a permis de franchir un premier pas dans la réalisation d'applications domotiques et à faire naître l'idée que les câbles électriques pouvaient également servir à communiquer. Le CPL a franchi un nouveau pas important en 2001, avec la sortie du standard Homeplug 1.0 [77], permettant d'atteindre des débits de 14 Mbps [78]. Ce standard a ensuite évolué au fur et à mesure de l'acceptation de la technologie CPL, amenant aujourd'hui certains fournisseurs d'accès internet tels que Free à livrer par défaut des modules Homeplug (Version AV [79]) dans leur pack matériel pour relier la box Internet au boîtier multimédia. Cela a probablement aidé à démocratiser la technologie CPL et la placer en alternative crédible face à des solutions RF telles que WiFi pour des applications réseaux haut débit.

On peut se demander pourquoi des bus dédiés au transport de l'information ont été créé, alors que le CPL permettrait de s'en affranchir. En réalité, le CPL reste un média difficile à apprivoiser et les conditions très changeantes de l'état du réseau électrique rendent ce média assez peu prévisible comparé à certains média dédiés, dénués de toute interférence [80] [81]. Cependant, l'utilisation d'un bus dédié au transport de l'information nécessite de réaliser un câblage supplémentaire qui peut coûter extrêmement cher (environ 100 à 150 €par prise dans le cas de la pose par un professionnel [81]). Ces travaux peuvent être importants et sont la plupart du temps réalisés conjointement avec d'autres types de travaux. Cela limite donc cette installation aux périodes bien précises que sont la construction du bâtiment ou sa rénovation. Un compromis doit donc être trouvé entre les coûts d'une telle installation et la qualité de service souhaitée.

Pour les applications extérieures, rappelons que le réseau électrique est le plus grand réseau câblé au monde [81]. Il serait dommage de ne pas en tirer profit, sachant qu'il permet de joindre la quasi totalité des bâtiments et des infrastructures dans le monde, aussi reculées et isolées soient elles. Le CPL repose maintenant sur plus de 20 ans d'expériences et présente aujourd'hui des caractéristiques comparables aux solutions RF largement déployées telle que le WiFi. Cependant, le CPL reste beaucoup moins utilisé, car il n'est pas encore assez accepté, et les solutions alternatives existantes répondent aux besoins des utilisateurs.

Le principe de l'utilisation d'un même support physique pour la puissance et les données a été repris ailleurs que dans le domaine du CPL. Récemment, la technologie POE (Power Over Ethernet) a retourné le principe en faisant circuler de la puissance dans des câbles de données. D'une certaine manière, les câbles USB fournissent également l'alimentation et les échanges de données dans un même câble. Le tableau 3.1 pointe les différences entre ces technologies reposant sur le même principe.

Toutefois, le CPL a la particularité de faire circuler la puissance et les données sur un seul et même support physique, alors que le POE et l'USB utilisent des brins séparés pour la puissance

Table 3.1: Différences entre certaines technologies regroupant alimentation et données dans un même câble

	Puissance	Débit	Périmètre
CPL	"Illimitée"	Quelques Kbps à 1 Gbps	WAN (pays) / MAN (Ville) / LAN (Maison)
PoE	Jusqu'à 25 W (Bientôt 50 W)	10 Mbps à 1 Gbps	LAN (Maison)
USB	Jusqu'à 4,5 W	1,5 Mbps à 5 Gbps	PAN (réseau personnel) / Desk AN (Bureau)

et les informations.

L'injection du signal CPL sur le réseau électrique se fait selon un couplage qui peut être capacitif ou inductif. Une méthode d'injection particulière à base de "pulses" est également décrite plus loin dans le cadre de la description de la technologie WPC développée par Watteco.

Le couplage capacitif et utilisé dans tous les réseaux CPL à l'intérieur des bâtiments [81]. C'est typiquement le type de couplage présent dans les boîtier CPL domestiques utilisant la technologie Homeplug. Cette méthode peut toutefois être utilisée en extérieur mais reste marginale. La figure 3.2 représente le principe du couplage capacitif.

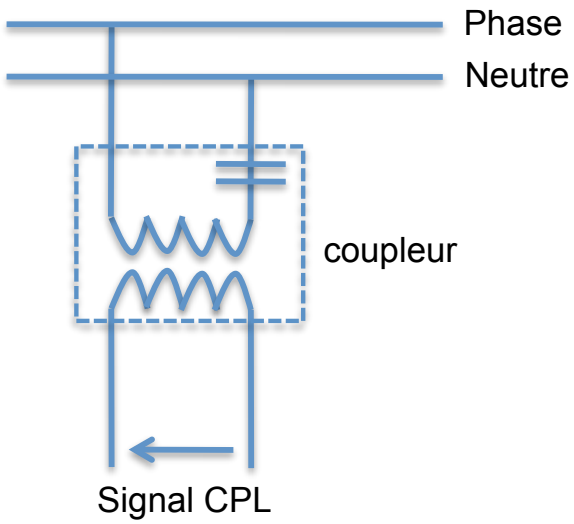


Figure 3.2: Couplage CPL capacitif

Le couplage inductif est réalisé grâce à un tore placé autour du câble électrique qui vient injecter le signal par induction d'un signal électromagnétique. L'avantage de cette méthode est qu'elle peut se faire "à chaud", sans besoin d'intervenir directement sur les conducteurs sous tension comme dans le cas du couplage capacitif. Ce type de couplage est principalement utilisé dans les installations CPL extérieures [81]. La figure 3.3 représente le principe du couplage inductif.

Le CPL repose sur l'infrastructure du réseau électrique existant. et doit donc s'y adapter. La figure 3.4 montre que le CPL est utilisé sur les moyennes et basses tensions.

Ces plages de tension sont distribuées sur des infrastructures publiques et privées dont la frontière est le compteur électrique. La figure 3.5 illustre cette séparation et montre la répartition

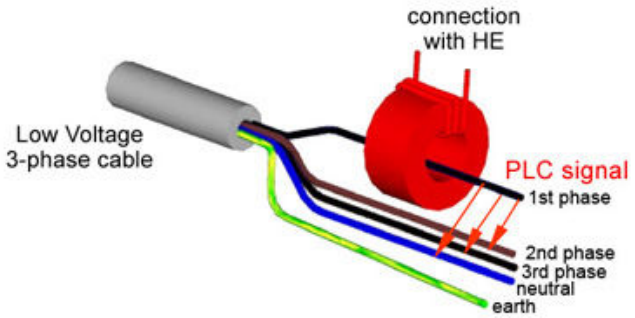


Figure 3.3: Couplage CPL Inductif

	Appellation actuelle	Ancienne appellation (toujours d'usage)	Niveaux de tension usuels en France
	HTB	Très Haute Tension (THT)	400 000 V 225 000 V
		Haute Tension (HT)	90 000 V 65 000 V
Zone du CPL	HTA	Moyenne Tension (MT)	20 000 V
	BT	Basse Tension (BT)	380 V (triphasé) 220 V (monophasé)

Figure 3.4: Plages de tension du CPL

entre les responsables et les propriétaires des parties publiques et privées du réseau électrique, qui peuvent être amenées à utiliser le CPL.

La gestion des réseaux CPL privés est libre, et seulement limitée par les règles de compatibilité électromagnétique (CEM). Les réseaux CPL publics sont quant à eux régulés par l'autorité de régulation des télécoms (ART). Légalement, le CPL appartient aux secteurs de l'électricité, les télécommunications, les normes CEM et la régulation des fréquences. Faire dialoguer ces instances n'est pas toujours simple et l'élaboration d'une technologie répondant aux contraintes de tout ces secteurs est particulièrement long et fastidieux. Cela explique sans doute la lenteur avec laquelle le CPL s'est développé, par rapport à certaines technologies RF. Notons que l'implication du CPL vis à vis de la régulation des fréquences est double, car elle concerne l'allocations des fréquences utilisées sur les câbles électriques, mais également les fréquences RF, étant donné que le CPL émet des rayonnements électromagnétiques [81] [82]. En effet, injecter un signal haute fréquence (quelques MHz dans le cas de la technologie haut débit de type Homeplug) sur un câble revient à créer une antenne. Dans ce cas, l'antenne est le réseau électrique lui même. Il a été observé que des transmissions CPL pouvaient perturber certaines émissions RF [81]. L'inverse a également été observé avec certaines émissions RF basse fréquences pouvant être captées par des câbles électriques [33]. L'harmonisation et la standardisation de l'utilisation des fréquences régulent désormais ce type et problème et les normes CEM limitent de manière significative les puissances d'émissions, diminuant les interférences entre les réseaux CPL et RF. Toutefois, ces limitations ne font pas disparaître le rayonnement électromagnétique engendré par le CPL et cela peut permettre au signal de passer d'un câble à un autre par couplage capacitif, comme nous l'observerons dans nos expérimentations.

Le CPL, comme la plupart des média câblés présente une topologie de type bus (modulo

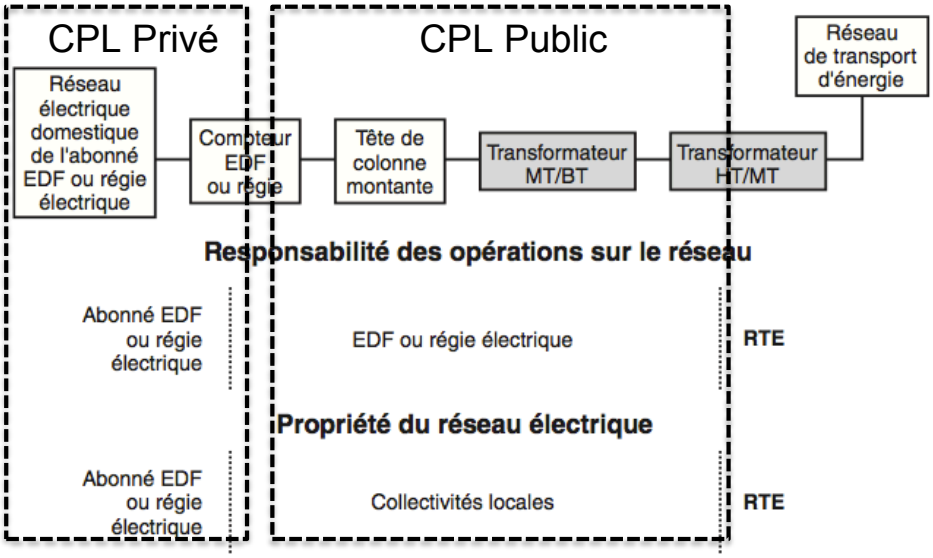


Figure 3.5: Répartition des parties publiques et privées du CPL

l'atténuation). Ainsi, un compteur électrique équipé d'une technologie CPL est théoriquement capable de dialoguer avec toutes les prises du réseau électrique, car le réseau a une topologie physique en étoile dont le centre est le compteur électrique. Malheureusement, nous verront dans nos expérimentation que la présence d'une connexion physique entre ce point distribution et les différentes prises électriques ne permet pas toujours d'établir une communication CPL entre ces points. Nous montrerons donc qu'une solution de routage est nécessaire pour pallier à ces limitations et permettre la couverture complète d'un bâtiment. De même pour l'étage de distribution électrique supérieur, les transformateurs MT/BT peuvent théoriquement joindre tous les compteurs électriques qu'ils desservent. Notons que les réseaux électriques publics sont toujours câblés par des professionnels, ce qui n'est pas toujours le cas des réseaux électriques privés dans la réalité. La qualité des installations peut également avoir une incidence non négligeable sur la qualité des communications CPL de même que les ruptures d'impédances engendrées par les jonctions entre matériaux différents [73].

Le figure 3.6 représente une topologie simplifiée d'un réseau CPL à l'intérieur d'une maison individuelle.

3.1.2 Approche théorique et modèles

De nombreux travaux ont été conduits pour fournir un modèle précis et exact du canal CPL. Plusieurs modèles ont été établis, notamment par Gotz [83], Hensen [84], Phillips [85] et Zimmermann [86].

En particulier, le dernier modèle de Zimmermann offre une bonne estimation du comportement du canal CPL en le modélisant par une fonction de transfert générique sur laquelle on vient additionner différents types de bruits. Ces bruits ont été identifiés à partir d'expérimentations réelles, et peuvent être classés selon cinq catégories différentes:

- Bruit à bande étroite
- Bruit périodique impulsionnel (Synchrone au secteur)

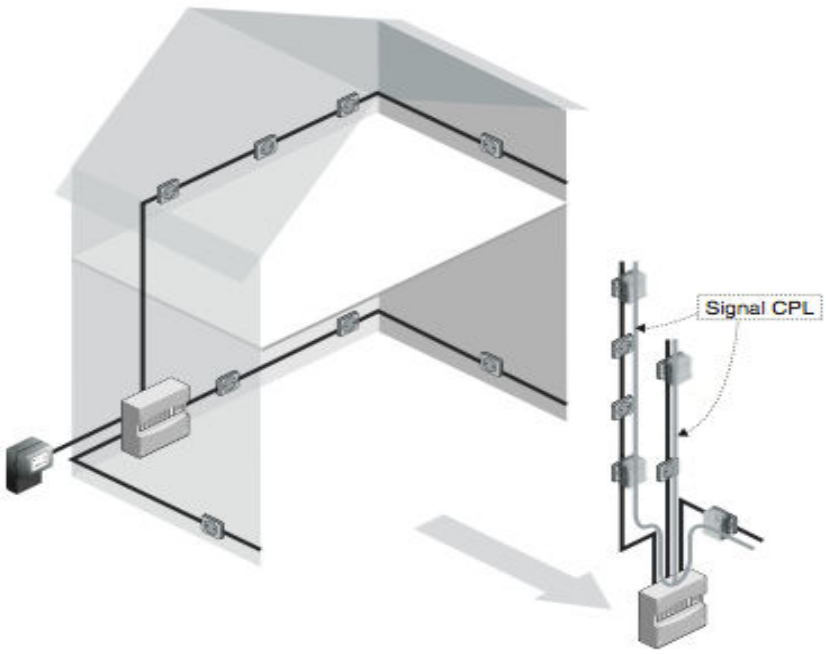


Figure 3.6: Représentation d'une topologie CPL en intérieur

- Bruit périodique impulsionnel (Asynchrone au secteur)
- Bruit coloré
- Bruit impulsionnel asynchrone

Ce modèle est représenté sur la figure 3.7.

Cependant, cette approche de modélisation nécessite une connaissance exhaustive du réseau électrique et des éléments qui y sont connectés pour calculer le modèle de propagation. De ce fait, tout changement dans la configuration du réseau électrique tel que des variations de charges, un changement de mode de fonctionnement d'un équipement électrique ou l'apparition de bruits externes produisent un modèle différent[80][87]. Cette approche déterministe ne correspond donc pas généralement aux expérimentations réelles, où les réseaux sont constamment sujets à ces variations comme le font remarquer [88], [89] et [90].

Ainsi, de nombreuses études ont pris le pari d'essayer de déterminer un modèle à partir d'expérimentations réelles [90] [91]. Le modèle développé dans [90] [91] est pertinent, car il a été confirmé par les expérimentations de [92] menées dans un laboratoire. Le modèle présenté dans [93] se rapproche un peu plus d'un cas réel, car il est basé sur des caractéristiques d'un réseau domestique réel et non un laboratoire ou les paramètres sont maîtrisés. Enfin, [94] présente un modèle de propagation spécialement dédié aux technologies CPL basse fréquence à bande étroite, typiquement G3 ou PRIME. Toutefois, ces modèles nécessitent systématiquement une connaissance exacte des caractéristiques du réseau, et ne sont donc pas généralisables à la diversité des environnement dans lesquels le CPL sera utilisé. Enfin, ces modèles prennent en considération une modulation CPL standard, alors que le module WPC développé par Watteco dispose d'une modulation particulière à base de pulses, et produit une réponse du réseau électrique différente de celle observée avec des modulations de type OFDM [95]. Ces modèles sont donc difficilement applicables à la solution CPL que nous utiliserons dans cette thèse.

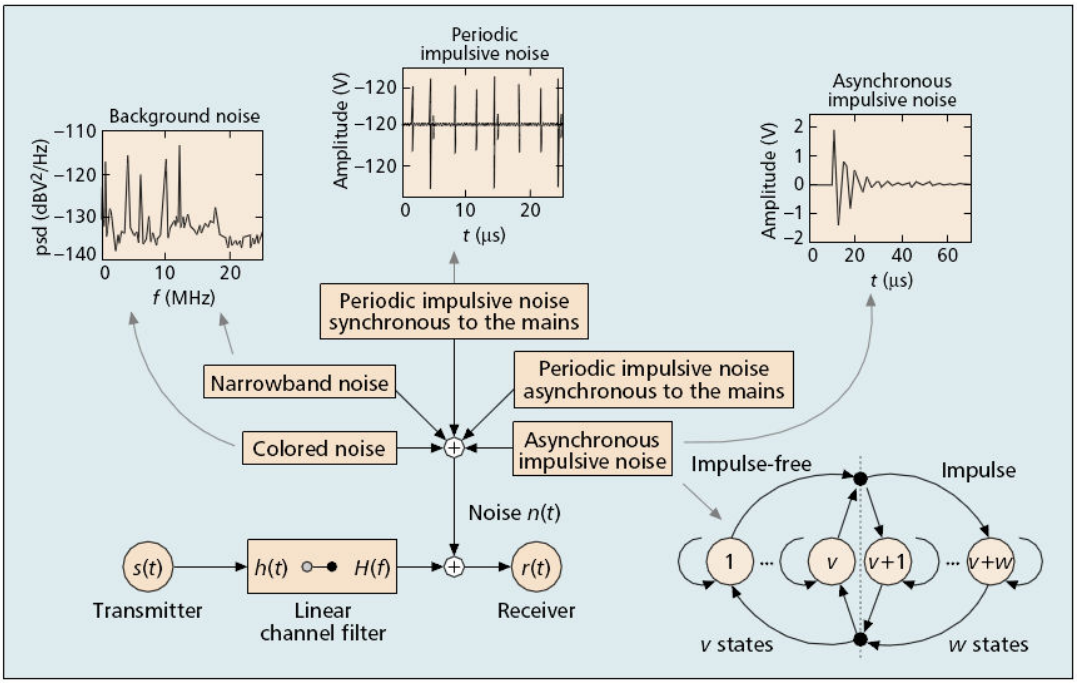


Figure 3.7: Le modèle de propagation CPL proposé par Zimmermann

3.1.3 Les transmissions CPL d'un point de vue pratique

D'un point de vue purement physique, pour que la communication CPL puisse avoir lieu, il faut nécessairement un câble électrique entre la source et la destination. Une première idée, si l'on fait une analogie avec la majorité des réseaux câblés, est que si un câble et donc un lien physique entre deux points existe, alors la communication est possible, à l'atténuation du signal près. Cela se vérifie par exemple sur des média filaires classiques tels que Ethernet, ou tout point sur un même câble a la capacité de recevoir la même information.

Malheureusement, cela n'est pas aussi simple dans le monde du CPL, et nous allons lister les nombreux facteurs venant influer, de manière bénéfique ou néfaste sur la communication [81] [87]. La première des choses à bien prendre en considération, est que le CPL utilise des câbles qui n'ont pas été conçus pour la communication. Alors que les câbles des réseaux filaires visent spécifiquement à véhiculer de l'information, le CPL utilise un réseau dédié au transport de l'électricité. Même si la puissance et l'information sont tous les deux des signaux électriques, les fréquences considérées et l'amplitude des signaux sont sans commune mesures. Ainsi, le signal CPL, modulé jusqu'à quelques dizaines de MHz à une amplitude de quelques volts maximum, doit utiliser des câbles conçus pour transporter un signal à 50 ou 60 Hz sous une amplitude de 110, 220, voire plusieurs dizaines de milliers de volts pour les réseaux haute tensions. La transmission du signal n'est donc pas optimisée.

Le réseau électrique s'est construit au fur et à mesure des déploiements des infrastructure urbaines et rurales, créant de multiples interconnexions qui sont autant d'obstacles à la transmission du signal. Le réseau de distribution d'électricité comprend de nombreux étages entre les lieux de production et les utilisateurs finaux, distribués sur plusieurs niveaux de tensions électriquement séparés les uns des autres par des transformateurs.

Du côté du réseau public de distribution d'électricité, le signal CPL peut être bloqué par des transformateurs moyenne tension - basse tension (MT/BT), des têtes de colonnes d'immeubles

assurant la distribution dans les logements, et les grandes distances misent en jeu qui peuvent aussi déformer et atténuer fortement le signal [81]. Les technologies capables d'adresser ces difficultés sont les technologies CPL basse fréquences [33] [74], situées en Europe dans les bandes CENELEC (entre 10 et 500 kHz). Ces modulations permettent de couvrir de plus longues distances, au prix de performances réduites en terme de débit.

La technologie G3 développée par ERDF [33] a été conçue pour passer les transformateurs MT/BT et en fait l'un de ses principaux arguments car cela réduit de manière drastique le nombre de points communicants nécessaires pour former une large infrastructure de communication. En effet, installer un répéteur sur chaque transformateur MT/BT aurait un coût élevé qui ne serait pas rentabilisé dans les zones très peu denses en points communicants. Les expérimentations menées afin de valider les communications G3 à travers un transformateur MT/BT [33] montrent que cela est possible, mais en utilisant le mode le plus robuste (mode ROBO), ce qui ramène les performances à un niveau minimum (4,5 kbps théorique). Les tests présentés dans ce papier montrent par ailleurs un forte asymétrie dans cette configuration (1% de trames erronées dans un sens et 10% dans l'autre sens) ainsi que des débits réels plus faibles (8,64 kbps dans le sens le plus fiable et une utilisation partielle du mode ROBO, et 2,68 kbps en moyenne dans l'autre sens en utilisant uniquement le mode ROBO). Ces faibles débits et ces taux d'erreurs importants impliquent des contraintes très fortes sur les protocoles utilisables, comme nous le verrons dans la suite. Les réseaux publics d'électricité sont également connectés à de multiples charges, en particuliers dans les secteurs urbains qui sont autant de perturbateurs potentiels du signal CPL.

Du côté des réseaux électriques privés (ceux appartenant au particulier et aux entreprises), les réseaux sont de plus petite taille, mais la qualité des installations est variable, et une grande quantité de charges y sont connectées. De même que pour la partie publique, ces charges sont autant de problèmes potentiels pour les communications CPL [81].

Le tableau 3.2 récapitule des différents éléments d'une installation électrique qui peuvent perturber la transmission des signaux CPL et donne une estimation de l'atténuation que provoquent ces éléments (valeurs issues de [81]).

Table 3.2: Principaux obstacles à la propagation des signaux CPL

	Atténuation	Commentaire
Compteur Electromécanique	15 dB	Atténue le signal mais ne le bloque pas
Compteur Electronique	15 dB	Atténue le signal mais ne le bloque pas
Disjoncteur	5 dB	Peut impacter les communications entre appareils
Prise Electrique	10 dB	Dépend de la qualité de fabrication
Couplage entre phases	5 à 25 dB	Dépends de la distance entre les phases

D'autres facteurs peuvent perturber la transmission du signal CPL tels que la différence du type de cuivre utilisé dans les câbles, ou la qualité des raccords électriques, mais leurs influences sont plus limitées. Au delà de la possibilité de la transmission du signal, le CPL étant un média partagé, le nombre de noeuds connectés sur un même réseau électrique et surtout le volume de donnée circulant sur le média peut être rapidement problématique sur CPL, en particulier pour les technologies utilisant les bandes CENELEC qui n'offrent la plupart du temps que quelques kbps de débit [33]. Une des caractéristiques fondamentales du CPL est que les facteurs jouant sur les transmissions présentent une très forte dynamique [80], rendant les propriétés de ce média particulièrement dures à prédire et à modéliser. Contrairement à des médias sans fils ou la distance physique entre 2 noeuds permet d'estimer grossièrement la possibilité d'une

communication, il est particulièrement déroutant pour un utilisateur de ces technologies de faire abstraction de la distance physique entre des noeuds CPL pour estimer la possibilité d'une communication. En effet, la distance géographique n'a pas de rapport avec le câblage électrique et 2 points physiquement proches peuvent se trouver sur des réseaux électriques disjoints (rendant impossible la communication CPL), ou être séparés par plusieurs kilomètres de câbles.

La figure 3.8 montre un exemple des variations de la qualité de la communication sur CPL. Les taux de succès représentés sur cette figure ont été mesurés dans les locaux de Watteco, en utilisant le technologie WPC. Cette figure montre que la variation de la qualité des liens sur CPL se rapproche des caractéristiques de certaines technologies RF basse consommation telles que IEEE 802.15.4, justifiant l'appartenance du CPL aux réseaux de type LLNs. Dans les 2 cas, les qualités des liens varient dans le temps et peuvent atteindre des taux de succès vraiment faibles (jusqu'à 40% de succès dans nos tests CPL).

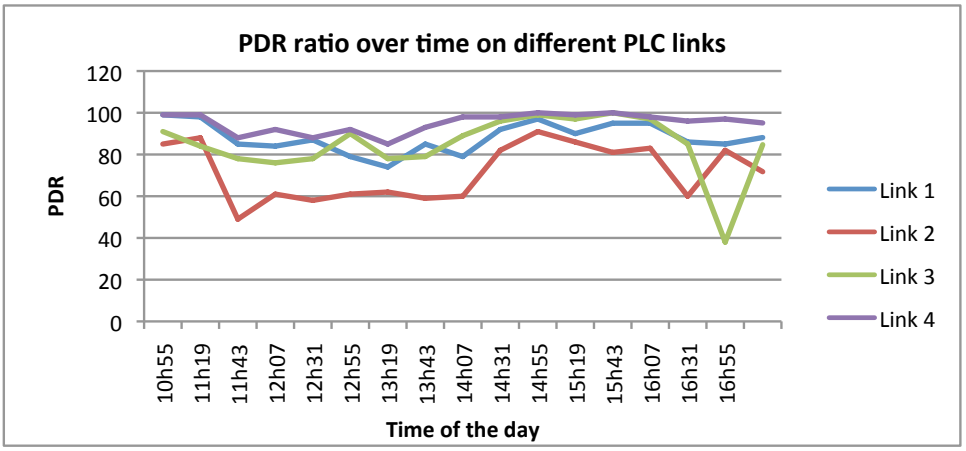


Figure 3.8: Variation du taux de livraison en fonction du temps sur différents liens CPL

Les variations présentées sur la figure 3.8 concernent la technologie WPC, qui utilise une bande de fréquence entre 2 et 4 MHz. Cependant, pour les bandes basses fréquences de type CENELEC, les transmissions restent difficiles. En effet, les bandes de fréquences CENELEC ou FCC sont parmi les plus bruitées.

Les différents types de bruits identifiés sur le CPL listés dans [86] et observés dans [80] ont été énoncés dans la partie 3.1.2. Cependant tous n'ont pas le même impact sur les communications CPL. Les bruits impulsionnels sont les plus dérangeants, car il peuvent atteindre de grandes amplitudes. Ils sont créés par une variation de tension brutale, typiquement la connexion d'un équipement ou d'un charge à un potentiel. Ce genre de phénomène est produit par des variateurs électriques tels que des triacs, qui commutent une charge selon un certain rapport cyclique, afin de faire varier sa puissance. La charge se retrouve donc connectée à la tension du secteur avec un peu de retard par rapport au passage de la tension par 0 Volts, créant une connexion brutale de cette charge à la tension du secteur et générant d'importants pics de tensions parasites. De tels pics sont représentés sur la figure 3.9, et le bruit résultant est illustré sur la figure 3.10. Ces pics sont localisés dans le temps. Ils peuvent survenir selon une certaine périodicité (dans le cas des triacs) et peuvent atteindre des amplitudes de quelques dizaines de volts.

Les bruits harmoniques peuvent être décomposés en 2 familles : directs et indirects.

Les bruits harmoniques indirects sont des bruits générés principalement par les alimentations à découpages embarquées sur certains types d'appareils électriques tels que des PC, ou des ballast d'éclairage. Ces bruits sont présents dans des fréquences comprises entre 15 kHz et quelques

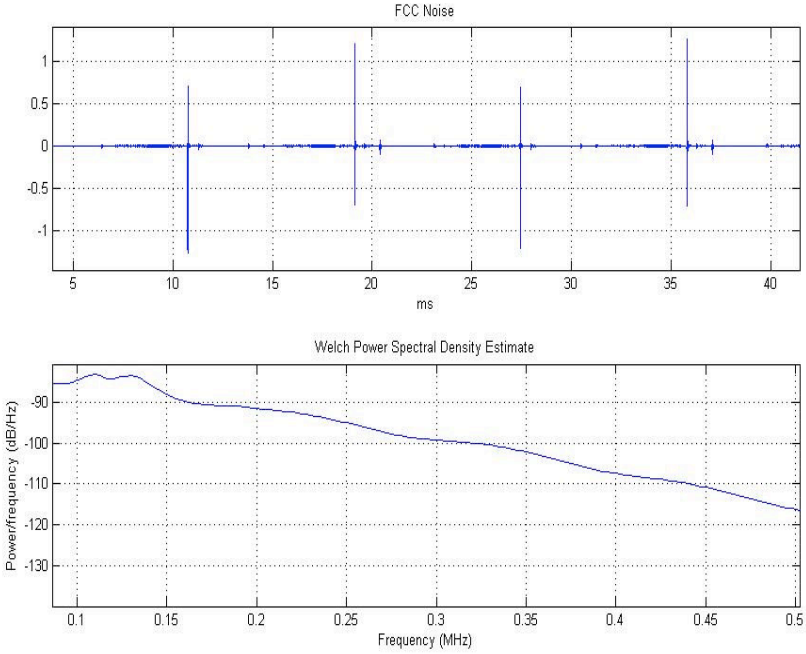


Figure 3.9: Perturbations autour du passage par 0 V

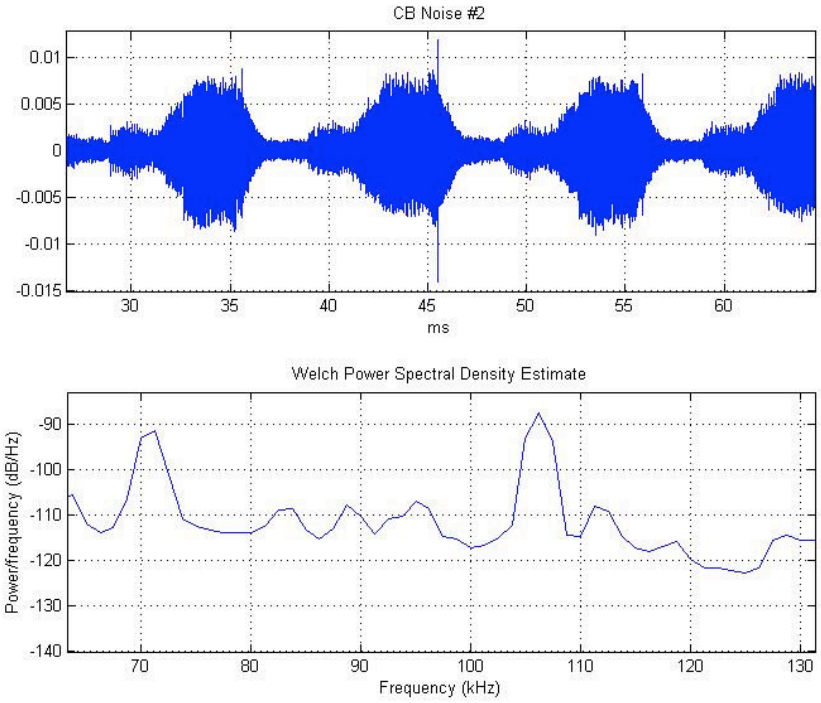


Figure 3.10: Bruit autour du passage par 0 V

MHz et peuvent atteindre des amplitudes de quelques volts maximum. Ces bruits sont les harmoniques de la fréquence de découpage de l'alimentation. Un spectre de ce type de bruit est montré sur la figure 3.11.

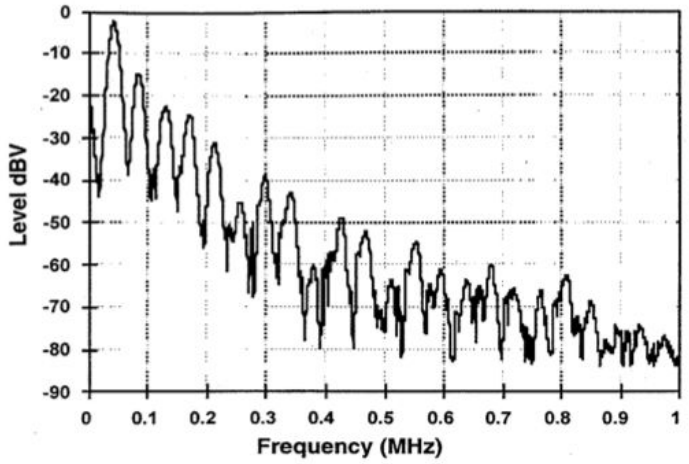


Figure 3.11: Bruits harmoniques indirects

Les bruits harmoniques directs sont dus à des systèmes de communication utilisant directement les bandes CPL pour communiquer. Par exemple certains moniteurs de bébé, ou des interphones CPL utilisent les bandes CENELEC pour communiquer. L'évolution des standards CPL permettra d'éviter ce genre de chevauchement de fréquences, mais dans l'état, les systèmes CPL doivent s'accommoder de ces perturbations. Ces signaux ont une amplitude de l'ordre de 1 volt maximum et sont généralement situés dans une bande entre 150 et 400 kHz, chevauchant donc complètement les bandes CENELEC et FCC. La figure 3.12 représente ce type de perturbations.

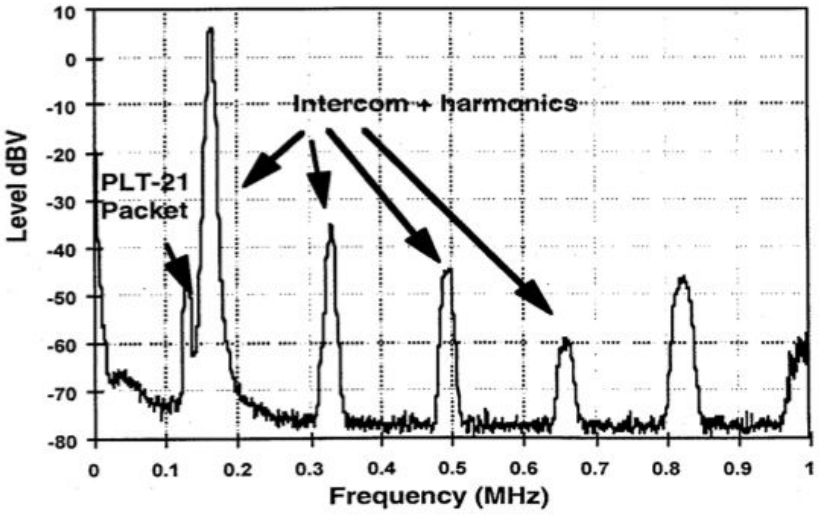


Figure 3.12: Bruits harmoniques directs

Les bruits impulsionnels hautes fréquences sont principalement créés par les moteurs à courant continu. Ce type de moteur est présent dans les appareils de cuisine ou électromé-

nager. Ces bruits sont générés par les commutateurs des moteurs qui créent des petits arcs électriques à des fréquences de quelques KHz. Ce type de bruit ressemble assez fortement à un bruit blanc gaussien. Les figures 3.13 et 3.14 représentent ce type de bruit dans le temps et le spectre correspondant.

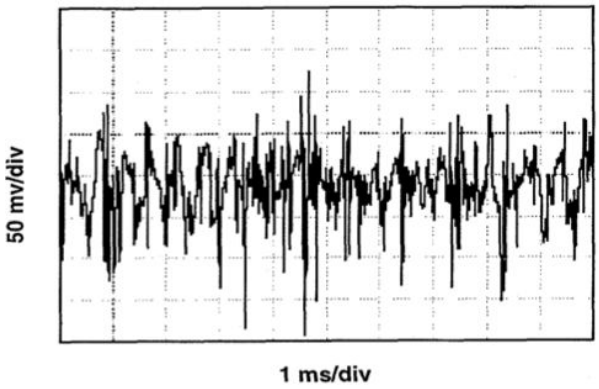


Figure 3.13: Représentation temporelle d'un bruit impulsionnel hautes fréquences

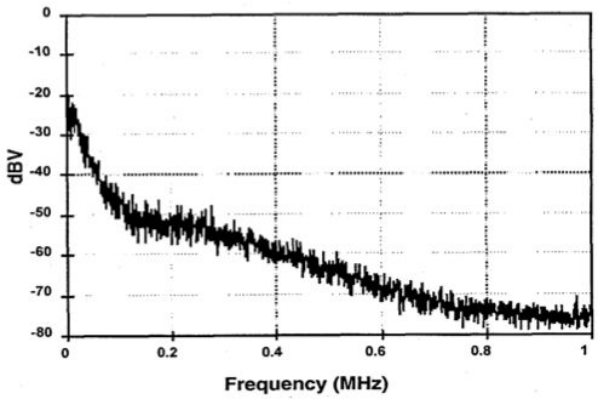


Figure 3.14: Représentation spectrale d'un bruit impulsionnel hautes fréquences

En plus de ces bruits, la bande CENELEC est connue pour présenter une atténuation importante et une distorsion de phase qui varie dans le temps et dans l'espace [80]. La figure 3.15 représente des distorsions de phase et d'amplitudes entre 2 points d'un réseau électrique à un instant donné. On peut voir le comportement globalement passe bas du CPL dans ces bandes de fréquences, et le comportement assez aléatoire de la phase. Il faut également prendre en compte que ce type de caractéristique n'est valable qu'à un endroit et un moment donné et variera en fonction de l'activité sur le réseau électrique.

La figure 3.16 montre une autre illustration d'un profil d'atténuation typique dans les bandes CENELEC A, B, C, et D. Les trous dans le spectre visible sur cette figure ne sont valables qu'au moment de l'observation et peuvent varier de manière aléatoire dans le temps et l'espace ou la mesure est effectuée.

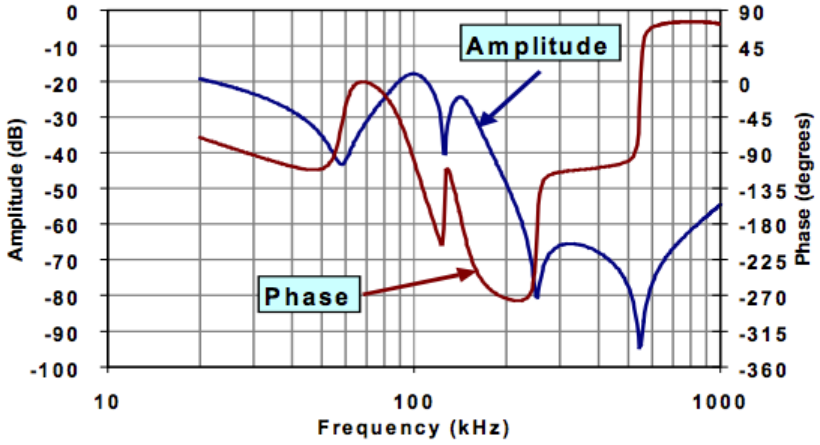


Figure 3.15: Exemple de distorsion en phase et en amplitude pour la transmission d'un signal CPL entre 2 points du réseau

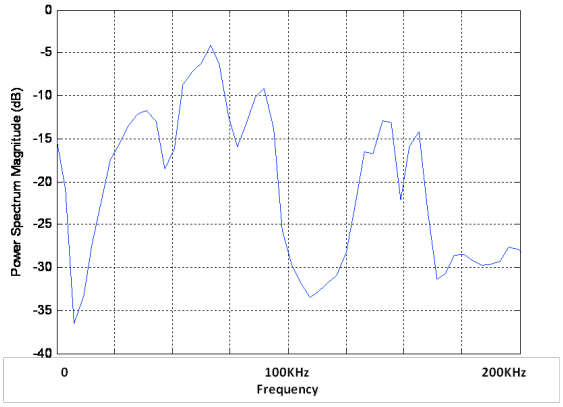


Figure 3.16: Exemple de caractéristiques d'absorption du CPL

3.1.4 Les régulations, les normes et les standards

Par définition, le CPL injecte des hautes fréquences sur un réseau électrique. Cette injection peut produire des émissions RF dans le spectre haute fréquence (HF) and peut éventuellement interférer avec des services RF existants. Pour cette raison, les émissions CPL ont été régulées depuis leur apparition. Il y a une distinction en terme de régulation entre le CPL à bande étroite et le CPL à large bande. Les régulations, et les normes mentionnées ci-dessous sont inspirées du chapitre de l'ouvrage [48] concernant le CPL, rédigé par Paul Bertrand, fondateur de Watteco.

Les services bandes étroites sont soumis aux régulations CENELEC 50065-1 ou FCC Partie 15. La régulation des services large bande est toujours en discussion dans le groupe CENELEC (prEN 50561-1).

Pour les services à bande étroite, comparé à la FCC partie 15 aux USA, la régulation du CPL en Europe est plus restrictive, car seules les bandes de fréquences inférieures à 148,5 kHz sont disponibles, alors que les USA autorisent l'utilisation des bandes jusqu'à 500 kHz.

La EN 50065-1 alloue la bande de fréquence 3-95 kHz aux fournisseurs d'énergies pour des applications de metering (cette bande est également connue sous le nom de la bande CENELEC A) et réserve les bandes 95-125 kHz, 125-140 kHz et 140-148,5 kHz (également dénommées respectivement bandes B, C et D) pour des applications analogiques ou numériques dans les maisons, les bâtiments tertiaires, et le contrôle d'équipements connectés au réseau de distribution basse tension. Des exemples typiques d'applications dans les bandes B, C et D concernent l'éclairage public, les véhicules électriques ou la domotique. Comme la EN 50065-1 ne définit aucun droit à l'utilisateur pour communiquer sur une partie du réseau électrique appartenant à une autre entité, les services utilisant les CPL à bande étroite dans les maisons sont limités à la bande 95-148,5 kHz. Cette limitation à une largeur de bande de 50 kHz limite sévèrement les services à des applications à très bas débits et c'est l'une des raisons de la limitation des déploiements de solutions CPL dans les bandes CENELEC pour des applications de domotique.

3.1.5 La consommation électrique

Jusqu'à récemment, la consommation énergétique des modems CPL n'était pas vu comme une contrainte, à cause de son accès à une source continue d'énergie. Mais la mise en exergue de la consommation énergétique globale des technologies informatiques ont maintenant mise la consommation énergétique comme l'une des contraintes majeures de ces nouvelles technologies CPL:

La maîtrise de la consommation est essentielle pour de nombreuses technologies, y compris pour le CPL, notamment pour des applications de réseaux électriques et de compteurs intelligents.

En Europe, la directive européenne 2005/32/EC du "moins d'un demi Watt" pour les appareils en veille impose un nouveau paradigme pour les technologies CPL.

La consommation moyenne du meilleur modem CPL répondant au standard IEEE 1901 à 200 Mb/s est d'environ 6 watts [48] à ce jour. Pour un modem répondant au standard CENELEC avec une modulation OFDM, le consommation électrique moyenne est d'environ 4W (elle est plus faible compte tenu de la largeur de la bande qui est réduite). Dans un environnement résidentiel, de telles valeurs ne sont pas significatives comparées à des éléments tels qu'une climatisation qui consomme 2 kW. Cependant, dans un contexte M2M où le nombre d'appareils connectés peut être très important, ou comparé à la consommation d'un compteur ou d'un interrupteur, cela devient prohibitif. A titre d'exemple si on considère un bâtiment complètement instrumenté avec 1000 noeuds consommants chacun 2 watts, le surcoût énergétique sera de 48 kWh par jour. De telles consommations ne sont pas en accord avec l'objectif de réduction des dépenses énergétiques visées par les applications de bâtiments intelligents.

De plus, la taille et la chaleur dissipée par ces alimentations sont particulièrement difficiles à prendre en compte, compte tenu du facteur de forme imposé par un compteur ou un interrupteur.

Si nous regardons maintenant les principaux éléments de la consommation énergétique des technologies CPL, il apparaît qu'elle est grossièrement répartie entre les sous ensembles analogiques et numériques. Conformément à la loi de Moore, les éléments numériques ont suivi une évolution régulière et importante en terme de taille et de performance. Cependant, le besoin de supporter des débits plus importants, des liens bruités, des fréquences d'échantillonnage élevées et des traitements du signal complexes limitent les bénéfices de la loi de Moore vis à vis de la consommation énergétique.

D'un autre côté, excepté pour quelques technologies de couplage très basse consommation comme nous le présenterons dans la suite, la consommation électrique des coupleurs CPL et du front end analogique sont limités dans leur progression par les niveaux d'émission requis lors de l'injection de signaux hautes fréquences sur le CPL.

Par conséquent, ces régulations et la lente progression des réductions des consommations électriques, ont amenés quelques entreprises à travailler sur la gestion efficace des modes de veille. Les technologies RF telles que ZigBee ou 6LoWPAN ont travaillé sur la maximisation de l'utilisation de ces modes basse consommation pour des appareils fonctionnant sur pile. A priori, la duplication que cette approche semble être une solution efficace pour des appareils connectés au réseau électrique. Malheureusement, ce n'est pas le cas car les modes de veille ne résolvent pas le problème de la consommation de l'alimentation. Un système basse consommation peut nécessiter une puissance maximale relativement importante lors de ses périodes d'activité et l'alimentation sera dimensionnées conformément à ce besoin de puissance maximale induisant une alimentation "au plus" qui surconsomme de l'énergie la majorité du temps. Comme nous le verrons dans le chapitre 7, la clé est d'offrir une consommation en veille très faible, car elle sera intégrée sur toute la durée d'utilisation de l'appareil. Les solutions CPL classique n'offrent pas ce mode de veille basse consommation à l'heure actuelle.

3.2 Comparaison des solutions CPL existantes

3.2.1 Solutions "historiques"

La première des solutions CPL a avoir vraiment été déployée à grande échelle a été la technologie X10. La première version de la spécification a été diffusée en 1978, ce qui fait probablement de cette solution l'ancêtre de beaucoup de solutions CPL actuelles. Cette technologie est le fruit des travaux effectués par la société écossaise Pico Electronics dans le but de pouvoir contrôler différents appareils électriques au sein d'une habitation.

La communication est très simple et consiste à diffuser sur le réseau électrique une trame avec une adresse et une commande. Les différents commandes réalisables sont :

- des ordres de type marche/ arrêt
- des ordres de type variation croissante ou décroissante d'un variateur de courant
- des remontées de valeurs de capteurs tels que des détecteurs de présence infra-rouge ou des capteurs de température

Du fait de sa simplicité, les trames X10 sont très courtes. Elle sont formées de 8 bits d'adresse et de 4 bits de commandes, formant une trame complète de moins de 2 octets. Contrairement à la plupart des systèmes de communication moderne, les trames X10 ne sont pas acquittées. Elles sont simplement diffusées sur le réseau, et répétées pour pallier à d'éventuels échecs de transmission.

Les modules X10 peuvent être couplés avec des télécommandes RF qui donnent des ordres à des modules pilotés par courant porteur par l'intermédiaire d'un convertisseur RF (433 MHz) en fréquence porteuse. Le concept de réseau hybride mélangeant plusieurs couches physiques telles que la RF et le CPL a donc déjà été imaginées par X10. Cependant, il semblerait que cette solution RF ait été imaginée pour pallier aux limitations de cette technologie qui a maintenant plus de 30 ans !

En effet, bien que simple et efficace pour les applications pour lesquelles il a été conçu, ce protocole montre de nombreuses limites par rapport aux besoins actuels, et notamment ceux des objets intelligents. L'inconvénient d'un protocole aussi simple est qu'il n'est pas assez robuste car les trames ne sont pas acquittées. De plus, la modulation très simple ne permet pas de s'affranchir des perturbations engendrées par les nouveaux appareils électriques. Le protocole ne répond pas non plus à des besoins de sécurité, ne dispose pas de couche MAC, n'est pas compatible avec IP, offre un très faible débit (50 bps) et génère une latence importante d'environ 1s par action.

Finalement, les besoins des futurs objets intelligents sont des besoins de réseau, au même titre qu'un équipement informatique traditionnel, et tous ces services ne peuvent pas être offerts par X10.

3.2.2 Solutions à haut débit

Le monde des solutions CPL haut débit est largement dominé par le standard Homeplug, qui permet dans sa dernière version (AV2) d'offrir des débits allant jusqu'à 500 Mbps. Cependant, contrairement aux solutions bas débit tels que X10, G3, ou basse consommation telles que WPC, ces modules nécessitent un traitement du signal particulièrement lourd qui pèse sur la consommation énergétique, le coût, et la taille de ces modules. Même si des efforts ont été menés au fur et à mesure des révisions du standard, un module Homeplug tel qu'un Freeplug (module Homeplug distribué par free dans son offre internet) a la taille d'une brique et consomme 2W en continu. Si ce facteur de forme et cette consommation est acceptable pour des déploiements à faible échelle pour les quelques éléments multimédia de la maison, ils ne sont pas compatibles avec l'ambition des millions d'objets intelligents.

3.2.3 Solutions à bas débit

Les solutions CPL bas débit, en dehors de X10, ont vu le jour assez récemment, notamment pour répondre aux applications de smart-grid dont les déploiements sont prévus dans les prochaines années. Ces solutions doivent pouvoir être déployées à très large échelle, donc avec des coûts maîtrisés, tout en s'affranchissant des nombreuses contraintes des transmissions CPL. Afin de développer des solutions qui répondent à ces critères, 2 alliances principales se sont formées, PRIME et G3 décrites plus haut. Les technologies homonymes [33] [73] qui ont été spécifiées utilisent toutes deux une modulation OFDM qui s'adapte aux conditions du canal CPL. Toutes deux sélectionnées pour être intégrées dans le futur standard IEEE P1901.2, le débat n'est pas encore tranché entre ces 2 solutions, car le recul n'est pas encore suffisant pour évaluer les performances réelles de ces technologies dans des conditions réelles d'utilisation. Spécifié par ERDF, la technologie G3 a été retenue pour le déploiements des futurs 35 millions de compteurs intelligents "Linky" en France.

3.2.4 Comparatif des solutions CPL existantes

Le tableau 3.17 présente un comparatif synthétique des principales technologies CPL bas débit (en vert) et haut débit (en bleu) disponibles actuellement. On remarquera que la technologie

WPC présente la particularité d'être bas débit, mais utilisant des hautes fréquences. C'est pourquoi elle est représentée à part dans ce tableau. Comme nous l'expliquerons dans la suite, il est également bon de noter qu'elle est la seule technologie CPL à atteindre une consommation énergétique aussi faible que 10 mW.

Technology	Modulation	Band	Data Rate	Scope
ERDF G3	OFDM	42-90 Khz (Cenelec A) 10-490 Khz (FCC)	35 Kbps 128 Kbps	Outdoor MV/LV
Iberdola Prime	OFDM	35-90 Khz (Cenelec A)	128 Kbps	Outdoor LV
IEEE P1901.2	OFDM	10-490 Khz (FCC)	< 500 Kbps	Indoor/Outdoor LV
ITU G.hnem	OFDM	10-490 Khz (FCC)	< 1 Mbps	Indoor/Outdoor LV
IEC 61334 (G1)	S-FSK	60-76 Khz (Cenelec A)	2,4 Kbps	Outdoor MV/LV
WPC	Proprietary	2-4 Mhz	10 Kbps	Indoor/Outdoor LV
DS2	OFDM	2-30 Mhz	45 Mbps	Indoor LV
Intellon	OFDM	11-28 Mhz	14 Mbps	Indoor LV
IEEE P1901	OFDM	2-30 Mhz	> 100 Mbps	Indoor LV
Homeplug AV	OFDM	2-30 Mhz	200 Mbps	Indoor LV

Figure 3.17: Comparaison de différentes technologies CPL

3.2.5 Produits CPL

De nombreux produits utilisant le CPL sont aujourd'hui disponibles sur le marché grand public. La plupart des produits apportent une solution réseau à des équipements multimédias ou informatique, et sont utilisés pour atteindre des zones difficilement accessibles par des technologies RF (à cause d'éléments métalliques, de nombreux étages etc.) ou trop éloignées et plus pratique que de dérouler un câble Ethernet. Après avoir été boudé pendant de nombreuses années, le CPL est enfin considéré comme une solution alternative crédible aux solutions RF de type WiFi. Certains équipements intègrent le CPL comme un média supplémentaire pour un commutateur réseau. Par exemple, certains produits offrent une interface Ethernet, WiFi et CPL afin de distribuer des services réseaux à la plupart des équipements de la maison. Ce type d'approche nous conforte dans la vision multi-média du futur de l'internet, faisant passer des données d'un média à l'autre de manière transparente en fonction des critères applicatifs et de l'environnement dans lequel le réseau opère.

Du fait du manque de maturité et du marché de niche que représentent aujourd'hui les équipements nécessitant des communications CPL bas débit tels que des capteurs, des actionneurs, ou des compteurs énergétiques, il existe peu de produits utilisant les technologies CPL bas débit aujourd'hui.

3.3 Technologie WPC

La communication sur des câbles électriques a été un véritable défi au cours des 20 dernières années. Bien que d'importants progrès aient été faits sur les modulations et les débits, aucune des technologies n'a gardé un niveau de consommation énergétique raisonnable.

3.3.1 L'importance de la consommation énergétique sur le CPL

La consommation électrique des technologies CPL n'a bien souvent pas été prise en considération par le passé, principalement parce que ces systèmes ne sont pas limités dans leur approvisionnement en énergie. Nous pensons que ce temps est désormais révolu. Nous vivons dans l'ère du réseau électrique intelligent et du compteur intelligent où la maîtrise de la consommation est le but qui doit être partagé par chaque équipement, y compris ceux utilisant le CPL.

Comme développé dans la partie précédente, il est important de distinguer la puissance et l'énergie pour appréhender ces problèmes. Un système basse consommation peut nécessiter des systèmes d'alimentation imposants, et suppose donc de très longues périodes de veille et une latence très importante du système.

Un faible niveau d'émission, efficace pour les systèmes RF grâce à du relayage via des mécanismes de routage efficace n'est malheureusement pas possible sur le CPL, à cause de la non fiabilité du média et de l'efficacité du front end analogique. L'amélioration des parties analogiques est un sujet de recherche qui mériterait d'être creusé dans le cadre des développements du CPL.

C'est dans ce contexte que Watteco a développé la technologie WPC. Cette technologie CPL utilise un couplage très basse consommation, autorisant des services bas débit mais large bande avec moins de 20 mW.

3.3.2 Caractéristiques principales de la technologie WPC

La technologie WPC, pour Watt Pulse Communication, intègre des circuits analogiques qui excitent les fréquences résonnantes du réseau électrique, produisant des impulsions sur le réseau qui l'alimente. Ces impulsions se propagent sur les câbles électriques sur une longue distance (des distances supérieures à 1 km ont été mesurées dans un environnement de type éclairage public [95]), et conservent un bon rapport signal sur bruit.

Cette technologie tire parti du phénomène physique naturel de résonance de l'impulsion électromagnétique produite par une charge lorsqu'elle est connectée à un réseau électrique. Cette impulsion est appelée "pulse". C'est une impulsion très brève (quelques nanosecondes) d'énergie produite par le réseau en réponse à la connexion ou la déconnexion d'une charge produisant une variation locale d'impédance. Cette émission de pulses peut être déclenchée selon une certaine séquence de manière à créer un signal de communication entre deux points d'un réseau électrique basse tension.

3.3.3 Principe du WPC : le pulse

La technologie WPC repose sur le comportement transitoire du réseau électrique. Par l'excitation du réseau sur ses fréquences de résonance, il est possible de créer des impulsions très courtes, mais de forte amplitude, tout en restant dans la limite des normes de Compatibilité Electromagnétique (CEM).

De ce fait, l'amplitude de cette impulsion peut être significativement plus importante que le bruit présent sur le réseau, même après propagation, et assure une communication robuste. L'élément de couplage est très simple et le réseau réagit avec sa propre résonance, garantissant une émission optimisée de cette impulsion quelles que soient les conditions.

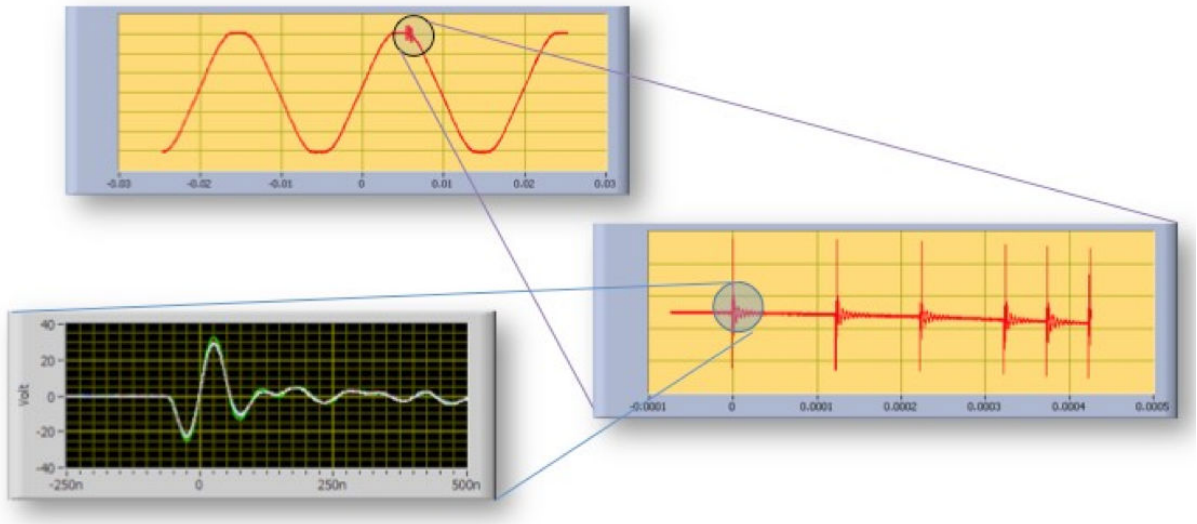


Figure 3.18: Exemple des Pulses émises par le WPC

La figure 3.19 illustre le principe de la technologie WPC : à certains moments précis définis par un signal de commande (2), une charge (3) est connectée au réseau électrique. Une tension transitoire est ainsi créée, résultant de la variation de la charge connectée au réseau. En utilisant ce principe, des trains d'impulsions peuvent être créés selon une certaine modulation. Les niveaux d'émission peuvent atteindre 15 V, avec une durée typique de 40 ns.

Durant la propagation du signal, les impulsions sont transformées, filtrées et l'énergie est absorbée en fonction de la réponse du canal. La figure 3.20 montre de véritables pulses observées dans sur un réseau électrique domestique.

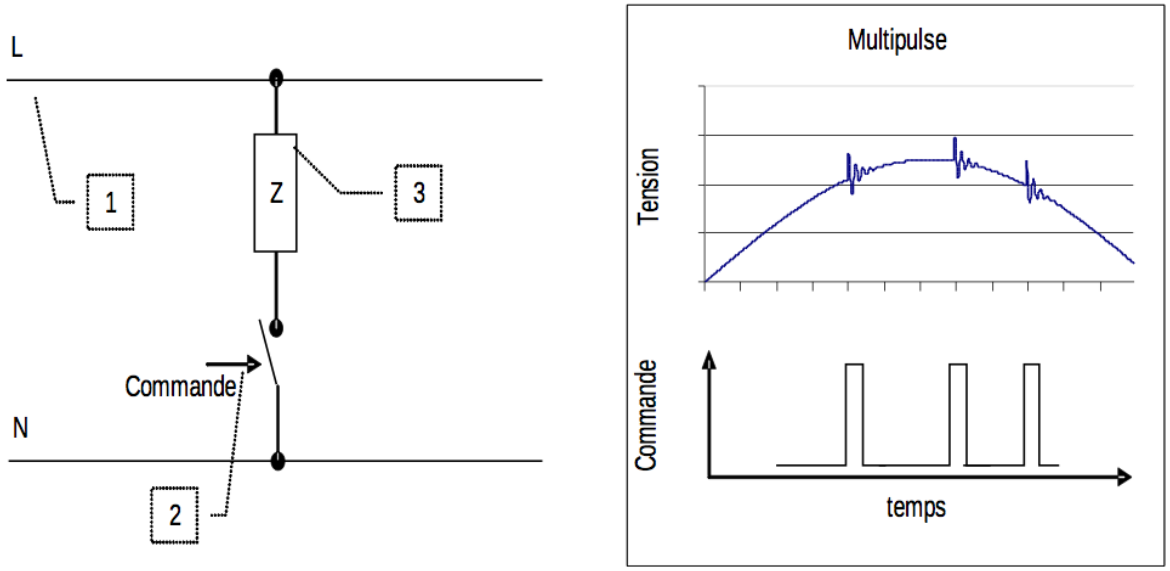


Figure 3.19: Principe de l'émission des pulses

La dernière version du WPC concentre l'énergie dans une bande de fréquence entre 2 et 4

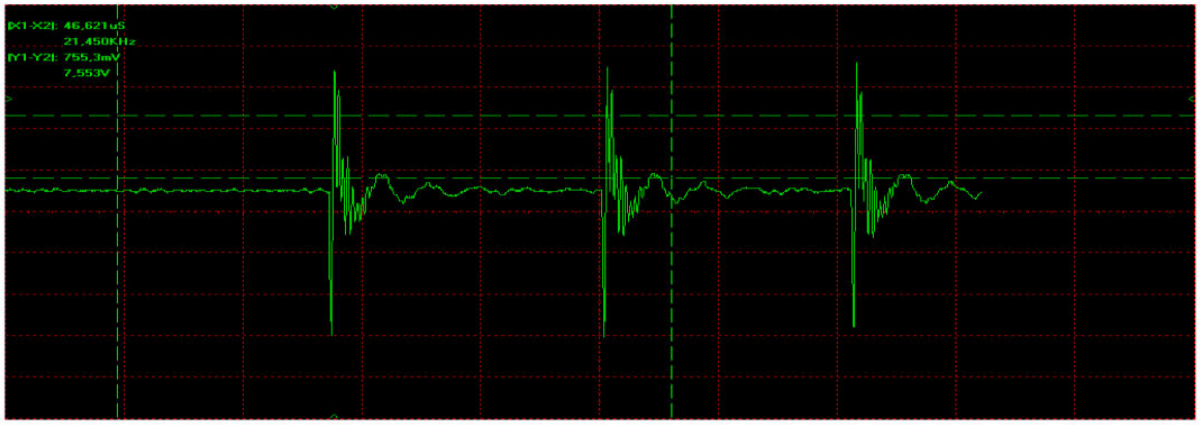


Figure 3.20: Images de pulses réels après quelques mètres de propagation

MHz, aussi connue sous le nom de LRWBS, pour Low Rate Wide Band Services.

La formation de ces fréquences est obtenue en envoyant, au lieu d'un pulse par bit, un train d'impulsions avec un écart moyen de 333 ns (13 MHz) entre chaque pulse. La figure 3.22 présente un exemple de ce train de pulses correspondant à un symbole [95].

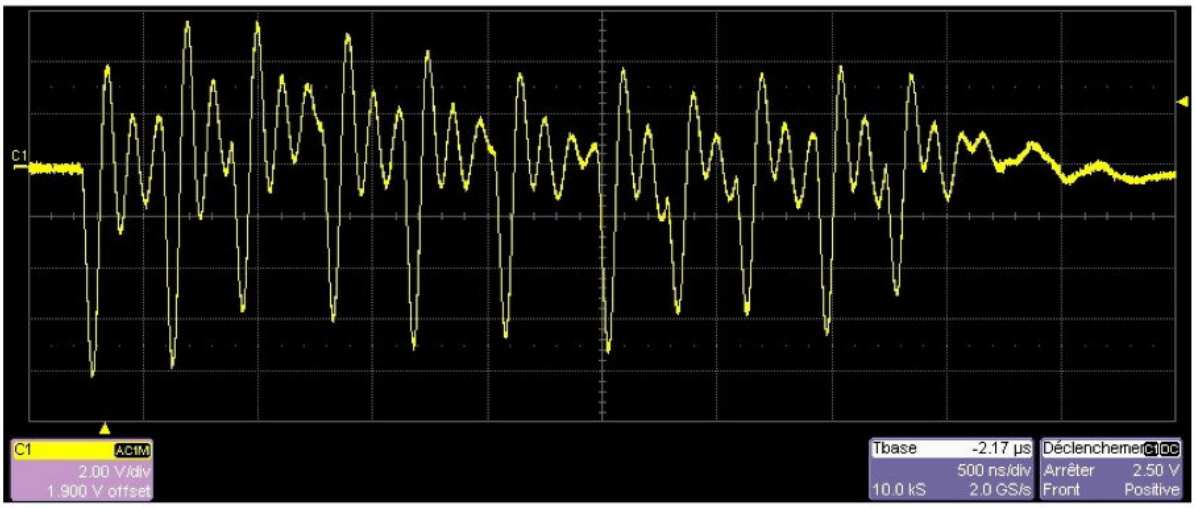


Figure 3.21: Un symbole est représenté ici par un train de 11 pulses élémentaires espacés de manière irrégulière

L'espacement irrégulier permet d'étaler les fréquences dans la bande LRWBS, assurant une diversité des fréquences et donc une meilleure détection grâce à un rapport signal sur bruit plus grand.

Ces trains d'impulsions sont organisés en séquences de 26 octets, représentés sur la figure 3.22. L'absence de bits au milieu de cette séquence correspond au passage par 0V de la tension. En effet, la nature du couplage au réseau électrique rend impossible l'émission de signal autour de ce passage par 0 V.

Les principaux avantages de l'utilisation de pulses pour les communications CPL sont les suivants :

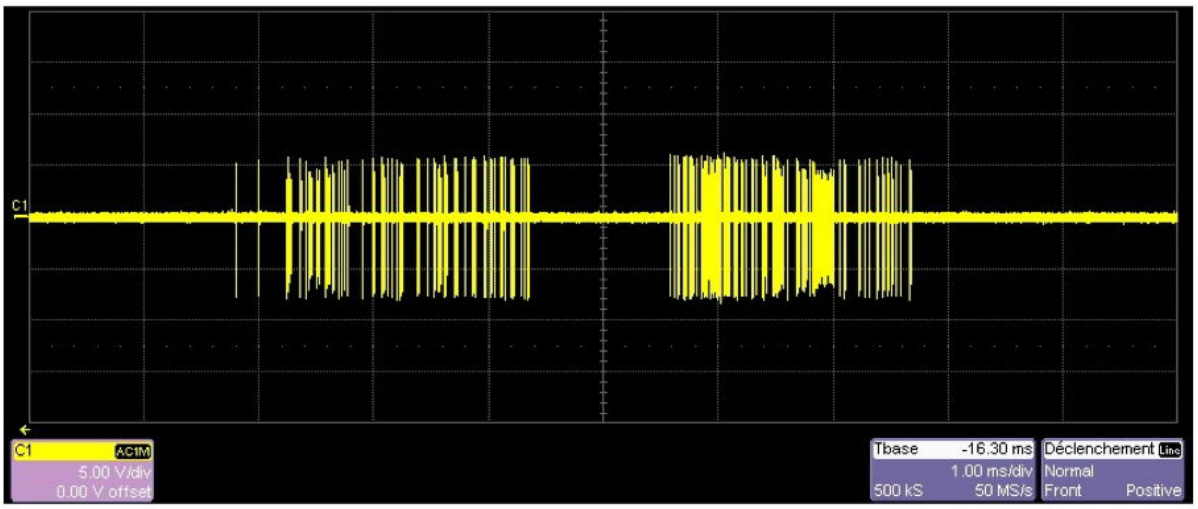


Figure 3.22: Une trame complète de 26 Octets

- La basse consommation énergétique (environ 10 mW en émission) induite par la méthode de couplage et la simplicité de la réception. Ce point est crucial pour des applications d'efficacité énergétique telles que le réseau électrique intelligent.
- La petite taille (environ 5 cm^2) du modem, induite également par la méthode de couplage qui est réduit à un front end analogique très simple. Cet élément est déterminant pour les déploiements à large échelle de points de communication dans des prises électriques, des compteurs ou de petits appareils électriques.
- La modulation par pulse limite le nombre de composants électroniques et le besoin en traitement du signal. La nomenclature réduite pour la construction du modem assure donc un coût très limité.

3.3.4 Applications

La technologie WPC est critique pour des application présentant des contraintes fortes sur la taille et la consommation énergétique. Elle peut être utilisée dans des compteurs intelligents, ainsi que pour des passerelles domestiques pour permettre le déploiement de solutions de contrôle commande pour de la répartition de charge sur tous les équipement de la maison. En complément de certaines solutions à haut débit tels que Homeplug AV ou Green PHY, elle peut être utilisée pour ajouter des services de marche/arrêt de ces systèmes. On viendrait donc mettre deux systèmes CPL en cascade, mais la solution WPC, disposée en amont du système haut débit, permettrait ici de commuter l'alimentation de ce système qui est plus consommateur d'énergie lorsqu'il n'est pas utilisé.

3.3.5 Coexistence

Le CPL est un média naturellement partagé entre tous les points connectés. Jusqu'à ce que le mécanisme de coexistence défini par le standard IEEE P1901 soit défini, il n'y avait aucun standard définissant les règles de partage du média entre les différentes technologies utilisant la bande de 2 à 30 MHz. Ce manque de standardisation induisait des interférences et des baisses importantes de performance quand deux technologies CPL différentes étaient utilisées sur un

même réseau CPL. Le standard IEEE P1901 définit un protocole inter-système, mécanisme obligatoire pour garantir la coexistence, pour quatre technologies différentes au maximum sur un même réseau CPL. Ce mécanisme reconnaît la bande LRWBS utilisée par la technologie WPC, offrant à ces services un maximum de 2/8 des intervalles de temps dans la bande de 2 à 4 MHz. Il est prévu que la future révision du modem WPC soit conforme avec ce mécanisme de coexistence défini par le standard IEEE 1901.

3.4 Conclusion

Comme tous les médias, le CPL présente des avantages et des inconvénients que nous résumons dans la partie ci-dessous. Nous avons fait la distinction entre les différentes technologies CPL existantes, et notamment entre les deux grandes familles: les technologies bande étroite et bas débit, et les technologies à large bande et haut débit. Dans le contexte de cette thèse, nous nous reposerons sur la technologie WPC développée par Watteco qui a la particularité d'utiliser une modulation à base de pulses, résultant en une solution bas débit, mais utilisant la partie basse du spectre des technologies à bande large. Nous avons insisté en particulier sur l'importance de la consommation énergétique, y compris pour des solutions CPL. Nous nous sommes efforcé de démontrer que le CPL n'est pas un média aussi facile que d'autres média câblés spécifiquement dédiés au transport de l'information.

3.4.1 Avantages du CPL

A la suite de cette présentation du CPL, nous pouvons lister les avantages suivants :

1. Le CPL réutilise des câbles existants. Par conséquent, il n'y a pas de coût de câblage pour le déploiement d'une solution CPL, contrairement aux autres technologies de communication filaires qui les rendent prohibitives pour des déploiements à large échelle à des coûts maîtrisés.

2. Le réseau électrique est le plus grand réseau filaire du monde. Cela place donc le CPL comme un candidat idéal pour atteindre des zones difficiles d'accès (d'un point de vue géographique et d'éventuelles perturbations pour les médias sans fil), peu denses en population ou dépourvues d'infrastructures de communication, dont le retour sur investissement pour des déploiements est peu rentable dans la majorité des cas.

3. Le CPL n'est pas soumis aux mêmes perturbations que les médias sans fil, et peut donc joindre des zones que la RF ne peut pas forcément atteindre, tels que des environnements comportant des éléments métalliques. Réciproquement, le CPL a ses propres perturbateurs. Le CPL peut être utilisé pour passer certaines zones hostiles à la RF, passer des obstacles tels que des étages dans des bâtiments ou couvrir de longues distances pour des déploiements en extérieur.

4. Les débits des solutions CPL actuelles sont comparables à ceux des solutions RF. Les technologies CPL haut débit de type Homeplug offrent des débits pouvant aller jusqu'à 200 Mbps, ce qui le place en concurrent potentiel de certaines solutions RF telles que WiFi. De l'autre côté du spectre, les solutions CPL bas débit de type G3 ou WPC offrent des débits de quelques dizaines de kbps, ce qui les rend comparables à des solutions RF bas débit telles que IEEE 802.15.4.

5. Le prix des solutions CPL est également comparable avec le prix des solutions RF, grâce à la réutilisation des câbles existants et la maturité des technologies CPL récentes qui sont désormais intégrées sur des puces fabriquées à large échelle.

6. Le CPL est plus difficile à espionner que les solutions RF. En effet, la récupération d'informations d'un réseau CPL implique le besoin d'un accès physique au réseau, donc au bâtiment. Les technologies CPL utilisant des hautes fréquences, une partie du signal est rayonnée et peu éventuellement être récupéré sans contact direct avec le réseau électrique, mais à une distance très limitée comparée à des solutions RF. Il est également bon de noter que les fils électriques passent la plupart du temps dans les murs et sont donc difficiles à localiser pour arriver à récupérer des informations de cette manière.

7. Enfin, le CPL n'a pas de problèmes d'approvisionnement en énergie, ce qui est un réel avantage par rapport aux solutions de réseaux de capteurs qui doivent adapter des stratégies complexes de gestion de l'énergie afin d'atteindre des durées de vie acceptables. Toutefois, comme nous l'avons vu, la consommation énergétique du CPL doit tout de même être prise en considération pour justifier de son intérêt. A notre connaissance, la technologie WPC que nous considérons par la suite est la seule à posséder un couplage permettant d'atteindre des consommations de l'ordre de 10 mW, sans nécessiter d'alimentation externe.

3.4.2 Inconvénients du CPL

1. Comme tous les médias de type bus, la bande passante est partagée pas tous les appareils connectés au réseau électrique. En conséquence, le nombre d'appareils connectés sur un même réseau a une incidence directe sur les performances globales du système.

2. Il ne faut jamais oublier que le CPL repose sur un réseau de distribution d'électricité basse tension, qui est donc potentiellement dangereux. La fonction de communication ne doit jamais occulter les risques électriques qui sont inhérents à ce média. En particulier, l'accès aux parties de puissance de l'appareil doivent être correctement isolées de la partie gérant la communication, ce qui a un impact direct sur la taille du module, sa conception matérielle et donc son coût. Certaines manipulations permettant d'investiguer un problème sur un équipement CPL doivent être réalisées pas des personnes habilitées aux interventions électriques. A titre d'exemple, le branchement d'une sonde JTAG sur un équipement CPL afin de le reprogrammer ne doit pas se faire lorsque l'équipement est sous tension et non isolé.

3. Le CPL ne bénéficie pas encore d'une standardisation aussi développée que le pour les médias RF. Même si des travaux de ce type sont en cours dans le groupe 1901 de l'IEEE notamment, aucun mécanisme de coexistence n'est actuellement standardisé, limitant les déploiements CPL.

4. Le CPL reste un média sensible et peu prédictible. Alors qu'en RF deux points rapprochés ont une probabilité plus élevée de pouvoir communiquer ensemble, ce n'est malheureusement pas souvent le cas en CPL, notamment dans les bâtiments ou il n'y a pas de corrélation entre les positions géographiques et les distances de câble qui les séparent. De plus, comme précisé auparavant, on ne peut pas dire qu'il y ait une relation évidente entre la distance séparant deux points sur un câble et la qualité de la communication, à cause des multiples perturbations locales qui créent des variations d'impédances locales et donc des absorptions du signal. Le CPL présente également des liens dont les caractéristiques sont dynamiques et cela peut créer des contraintes fortes sur le routage.

5. Contrairement à ce que l'on pourrait penser par analogie avec d'autres médias câblés, comme le CPL utilise des hautes fréquences sur des câbles électriques non blindés, il émet des radiations électromagnétiques qui peuvent perturber certaines communications RF.

Réciproquement, le CPL peut récupérer un signal RF qui peut perturber la communication. Par exemple, les stations radios grandes ondes sont dans les bandes de fréquences CENELEC utilisées pas les technologies CPL à bande étroite en Europe.

3.4.3 Challenges et travaux futurs

La liste de ces avantages et inconvénients peut être mis en regard des technologies RF concurrentes. Cependant, nous pensons que les technologies RF, et les autres technologies applicables aux réseaux contraints en général ne doivent pas être considérées comme des concurrents mais plutôt comme des solutions complémentaires. Les standards réseau tels que IP reposent sur une grande diversité de couches physiques qui ont permis à l'internet d'atteindre le niveau de déploiement qu'il a aujourd'hui. Nous pensons que cette démarche doit être conduite de la même manière dans les futurs réseaux d'objets intelligents, car il n'existe pas de technologie assez flexible pour couvrir la grande diversité des applications qui utiliseront cette nouvelle frange de l'Internet. Accessoirement, cela permet également de s'affranchir d'un débat assez pénible pour élire la meilleure technologie pour les réseaux de capteurs, alors que le choix d'une technologie n'a de sens que si elle répond à une application précise et évolue au fur et à mesure des recherches sur les technologies de communication.

Le futur défi est donc d'offrir une solution flexible, multi-technologie et compatible avec de très nombreuses applications par la création d'un noyau dur de communication formé de quelques protocoles soigneusement choisis.

Dans le cadre de cette thèse, nous allons démontrer comment ajouter aux réseaux de capteurs une nouvelle interface réseau par l'intermédiaire du CPL, et plus particulièrement de la technologie WPC. Après avoir présenté et évalué les caractéristiques de ce média dans ce chapitre, nous allons construire une véritable solution réseau, compatible avec le standard IP, afin de connecter nos noeuds CPL aux infrastructure internet existantes et de permettre l'interconnexion avec d'autres technologies par la création de réseaux hétérogènes.

Chapter 4

Simulation de la technologie WPC

Afin d'appréhender le média CPL dans un environnement maîtrisé, et conduire des scénarios reproductibles, nous avons pris le pari d'implanter ce média dans un simulateur de réseau.

4.1 Avantages et limites de la simulation CPL

Comme mentionné dans la section précédente, obtenir un modèle du média CPL fidèle à la réalité des déploiements est assez difficile, du fait de la grande dynamique de ce média. Un outil de simulation permet de construire une configuration reproductible, indépendamment des perturbations externes et non prédictibles qui peuvent survenir lors d'expérimentations réelles.

Notre approche consiste à utiliser les résultats d'un outil de diagnostique CPL développé par Watteco. Ainsi, notre modèle sera fondé sur le comportement réel du média CPL plutôt que sur la prédiction d'un modèle théorique. Les résultats du diagnostic incluent également les bruits qui surviennent durant la période d'acquisition.

Avoir un environnement observable et répétable avec un contrôle du temps permet une analyse plus fine que ce qu'il est possible d'observer sur de vrais noeuds. Une simulation permet de créer un environnement complètement observable et maîtrisé, aidant aux développements et aux améliorations avec une visibilité sur la plupart des composants du système. L'environnement de simulation crée un média configurable qui permet permet de dissocier les événements relatifs au média physique et ceux relatifs à la pile protocolaire. Il permet également de s'affranchir de la disponibilité ou des coûts du nombre d'appareils utilisables, pour ainsi étudier le passage à l'échelle de la solution simulée.

La simulation présente également des risques, et le premier d'entre eux est probablement la validité du modèle utilisé. Dans notre cas, le modèle sera limité à des caractéristiques fixes, obtenues à partir de mesures réelles. Une divergence plus importante peut survenir au niveau de la simulation du noeud, qui est lié à la performance du simulateur et à la fidélité de l'implantation des noeuds.

Comme la simulation implique la modélisation de l'environnement, elle requiert des capacités de calcul qui augmenteront avec la complexité et la taille de la simulation (nombre de noeuds simulés, durée de la simulation, complexité du code à émuler, etc.). Des simulations importantes peuvent nécessiter plus de temps que le cas réel équivalent.

4.2 Choix du simulateur

Nous recherchons un simulateur qui puisse nous servir à modéliser le comportement et les caractéristiques de la technologie WPC. En nous reposant sur la présentation des simulateurs faite

dans le chapitre 2 et en particulier du tableau 2.1, nous pouvons faire les remarques suivantes :

ns-2 et Castalia sont des simulateurs génériques de réseaux et sont principalement utilisés pour l'évaluation d'algorithmes, de protocoles et d'applications de haut niveau, avant le portage sur une plate-forme spécifique. Etant donnée que nos simulation se concentrent sur les réseaux utilisant la technologie WPC, le simulateur doit être étroitement lié à cette plate-forme. Ces simulateurs sont trop génériques par rapport à notre usage.

TOSSIM est idéal pour simuler des noeuds qui utilisent TinyOS. Cependant, les noeuds WPC utilisent l'OS Contiki et un portage vers TinyOS ne serait pas souhaitable pour des besoins de simulation uniquement. De plus, TinyOS induit l'utilisation d'un langage spécifique (NesC).

WSNet et COOJA sont de bons candidats pour répondre à notre besoin. Cependant, COOJA fait partie de l'OS Contiki, ce qui le place naturellement comme le meilleur choix pour le développement de réseaux de capteurs utilisant cet OS. Il a également l'avantage de bénéficier de la communauté Contiki, qui devient de plus en plus importante et offre un support non négligeable. COOJA fonde l'émulation des noeuds sur 2 autres projets open source : MSPsim [26] pour les noeuds à base de MSP430 et Avrora [96] pour les noeuds à base de ATmega. Ces projets offrent une émulation complète de ces MCU, ce qui permet d'obtenir une bonne fidélité des résultats.

COOJA peut directement exécuter du code Contiki, sans aucune modification. De ce fait, l'implantation des protocoles 6LoWPAN et RPL de Contiki est directement exécutable dans COOJA. Il offre une interface graphique, ce qui rend son utilisation simple, et réduit le temps d'apprentissage. De nombreux plugins offrent une vision détaillée et bas niveau du réseau simulé. Différents médias et plates-formes sont disponibles, constituant un bon point de départ pour l'implantation des composants WPC. Enfin, tout les codes source sont disponibles, ce qui le rend facilement modifiable.

COOJA est le meilleur candidat dans notre cas, et se place comme le choix naturel pour la simulation de nos noeuds utilisant Contiki.

4.3 Comparaison entre RF et CPL dans la simulation

4.3.1 Similitudes

Point de vue du média :

Nous avons observé dans la figure 3.8 que le média CPL pouvait présenter une dynamique similaire aux liens RF considérés dans les réseaux de capteurs sans fil car chaque appareil électrique peut générer du bruit et/ou atténuer le signal. De plus, cela peut créer des liens asymétriques qui ajoutent de la complexité aux communications et au routage. Ces caractéristiques ont été considérées dans le modèle du canal utilisé dans le simulateur.

Point de vue du noeud :

Les composants d'un noeud WPC ont une architecture proche des noeuds classiques utilisés dans les réseaux de capteurs sans fil tels que présentés sur la figure 2.2. Ses contraintes sont principalement :

1. - Un faible débit
2. - Une propagation limitée des signaux
3. - Des faibles consommations énergétiques
4. - Une mémoire RAM/ROM limitée
5. - De faibles capacités de calcul

Tous ces points sont valables à la fois pour les réseaux de capteurs sans fil et pour les composants du WPC. De ce fait, leurs plate-formes matérielles sont assez semblables et reposent principalement sur un microcontrôleur et un émetteur/récepteur piloté à travers une interface SPI. L'un des noeuds RF les plus utilisés est le noeud SKY [30] (implanté dans COOJA) qui est composé d'un microcontrôleur MSP430 et d'un module RF CC2420, agrémenté de quelques sondes physiques. Un composant WPC est constitué d'un MSP430 (ou d'un ATMega) et d'un émetteur/récepteur WPC. Le tableau 4.1 compare l'architecture matérielle de ces deux plate-formes.

Table 4.1: Comparaison des plate-formes WPC et Sky

	Noeud WPC	Noeud Sky
CPU	MSP430 (F5438A) (ou ATmega1281)	MSP430 (F1611)
Emetteur/récepteur	WPC	CC2420
RAM/ROM (kb)	16 k / 256 k (ou 8 k/128 k)	8 k/ 48 k
Débit	10 kbps	250 kbps

4.3.2 Différences

COOJA étant un simulateur dédié aux réseaux de capteurs sans fils, il offre beaucoup de fonctions utiles aux composants WPC. Cependant, les composants du WPC présentent quelques spécificités qui doivent être implantées dans COOJA. La principale différence est bien évidemment l'émetteur/récepteur utilisé pas les noeuds WPC.

Cet émetteur/récepteur offre un débit plus faible que les versions RF implantées dans COOJA. Le débit dépend de la fréquence de la tension (50 ou 60Hz) et la synchronisation de la communication dépend de la polarité et de la phase électrique utilisée. La communication WPC ne dépend pas de l'amplitude de la tension (110 ou 220 V). Il est cadencé avec la tension du secteur qui est distribuée à tous les noeuds du réseau. Une telle synchronisation n'est pas "offerte" sur des appareils sans fil.

Les noeuds WPC utilisent le mécanisme CSMA/CA, mais le comportement de la couche MAC est différent des noeuds RF, en particulier à cause des durées mises en jeu. De plus, les couches PHY et MAC sont implantées dans le WPC lui-même, et n'utilise pas les protocoles MAC et le réveil périodique (couche appelée RDC dans Contiki) disponibles dans l'OS Contiki.

Les caractéristiques du WPC peuvent bénéficier de futures évolutions qui doivent pouvoir être ajoutées facilement dans l'implantation de la simulation.

4.4 Intégration de la technologie WPC dans le simulateur COOJA

4.4.1 Architecture de COOJA

COOJA est intégré de manière native à l'OS Contiki. Il constitue une glu entre la partie qui émule le matériel (MSPsim, Avrora) et l'OS Contiki. MSPsim [26] [97] [14] et Avrora [96] [98] sont tous deux des projets open source qui émulent respectivement des micro contrôleurs de type MSP430 ou AVR. MSPsim comprend l'implantation de deux modules RF : Le CC2420 et le TR1001. Ces projets peuvent être utilisés seuls pour simuler le comportement d'un noeud indépendant. Dans la figure 4.1, on peut voir un exemple de MSPsim émulant un noeud Sky.

Comme illustré par la figure 4.2, COOJA fait le lien entre ces projets et l'OS Contiki, permettant de créer de multiples instances de MSPsim ou Avrora pour simuler des réseaux de

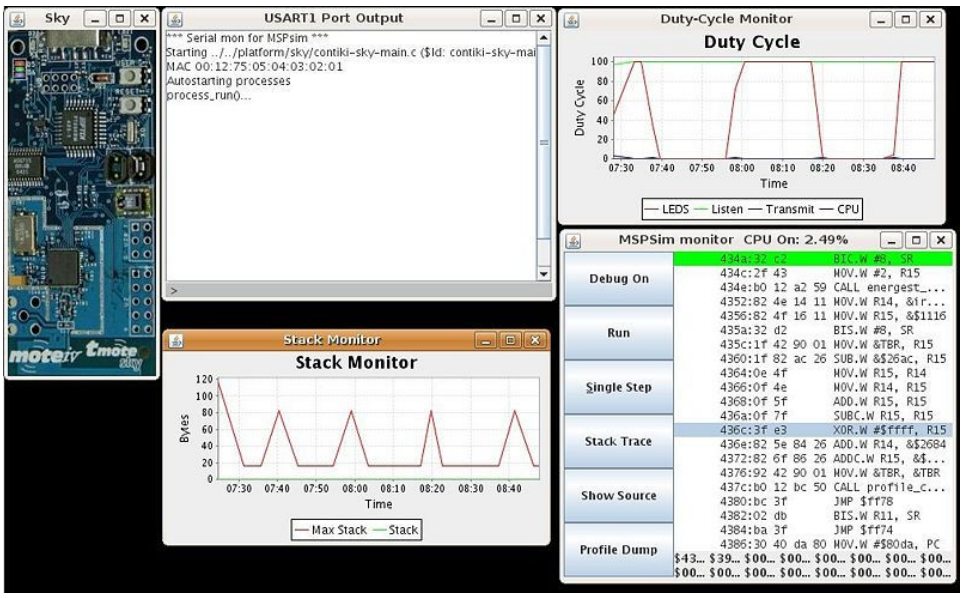


Figure 4.1: MSPSim

capteurs. Les fichiers source de MSPsim et Avrora ne sont pas intégrés dans l'arborescence Contiki. En revanche, une archive de chacun de ces deux projets a été ajoutée. Cela signifie que les modifications des émulations matérielles doivent être réalisées en dehors de l'arborescence de Contiki ou de Cooja.

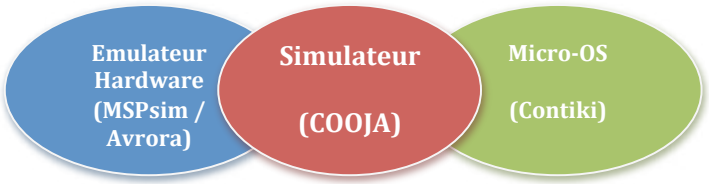


Figure 4.2: Relations entre COOJA et les projets associés

De manière simplifiée, une simulation COOJA consiste en une collection de noeuds simulés de manière individuelle. Chaque noeud est connecté à un type de noeud. Quand la simulation est en cours, tous les noeuds sont activés tour à tour. Quand tous les noeuds ont été activés une fois, le temps simulé est mis à jour et le processus est répété (c'est la boucle de simulation). Chaque noeud a également sa propre mémoire et un certain nombre d'interfaces. La mémoire doit définir toutes les parties nécessaires pour la simulation globale de l'OS Contiki. Les interfaces agissent sur la mémoire et les noeuds simulés tels que l'horloge ou l'émetteur RF. Par exemple, quand le temps simulé est incrémenté, une interface de type horloge doit mettre à jour certaines variables temporelles qui résident dans la mémoire de ces noeuds. Le type de noeud est l'interface entre la description matérielle du noeud et un code Contiki. Tous les noeuds du même type sont liés à une même instance de Contiki. Le type de noeud permet également de nommer les noeuds simulés et de gérer l'attribution des adresses. Quand un noeud se réveille, le type de noeud doit lier le noeud à l'instance de Contiki qu'il exécute. Cela signifie que tous les noeuds du même type partagent le même OS Contiki. La figure 4.3 illustre l'architecture d'un noeud simulé dans COOJA. Une description complète du simulateur COOJA est donnée dans le rapport [16].

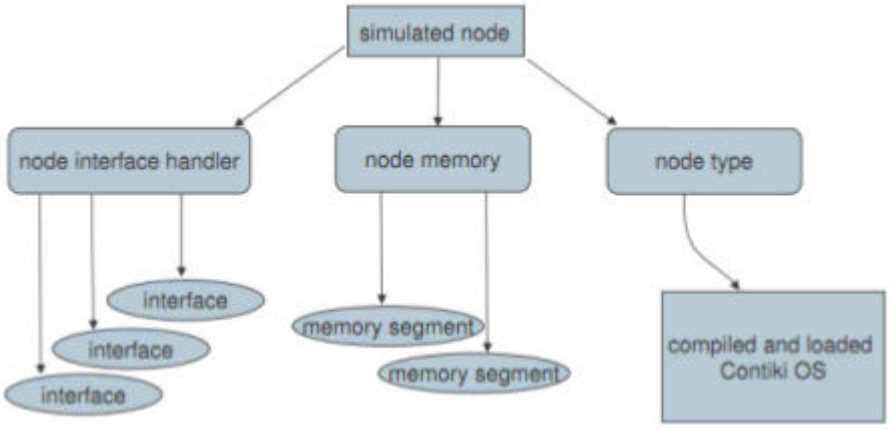


Figure 4.3: Architecture d'un capteur simulé dans COOJA

Deux Micro Contrôleurs sont actuellement implantés dans COOJA:

- MSP430f1611 (grâce à MSPsim) - 48kB ROM / 10kB RAM
- ATmega128L (grâce à Avrora) - 128kB ROM / 8kB RAM

Deux émetteurs/récepteurs sont également disponibles:

- TI CC2420 - module 802.15.4 à 2.4 GHz / 250 kbps
- TR1001 – Module à 868 MHz / 115.2 kbps

Trois plate-formes sont actuellement disponibles dans COOJA:

- MicaZ (Atmega128L + CC2420)
- Sky (MSP430 + CC2420)
- ESB (MSP430 + TR1001)

4.4.2 Approche de la simulation

L'approche globale consiste à modifier une plate-forme existante de COOJA, et d'ajouter les facteurs clés précédemment identifiés. Nous décrivons tout d'abord brièvement l'architecture de COOJA, et mettons en relief les caractéristiques existantes. Ensuite, nous nous concentrons sur les caractéristiques ajoutées pour implanter les composants du WPC dans COOJA.

Les composants du WPC sont toujours composés d'un module WPC, mais utilisent deux types de micro contrôleurs : L'ATmega1281 ou le MSP430f5438. Aucun de ces deux micro contrôleurs n'est actuellement disponible dans COOJA. Pour simuler exactement le comportement d'une plate-forme WPC, nous devrions créer une nouvelle implantation de chacun de ses composants. Cette approche résulte en une simulation très précise, mais nécessite beaucoup de travail, et ne repose pas vraiment sur les fonctions déjà disponibles dans COOJA. En réalité,

il est plus efficace de démarrer à partir d'une plate-forme existante, et de la modifier de telle sorte qu'elle corresponde au comportement des composants du WPC. A la vue des plate-formes disponibles dans COOJA, la plate-forme Sky est la plus proche de notre plate-forme WPC. Elles utilisent toutes deux un micro contrôleur de la famille MSP430, et le CC2420 de la plate-forme Sky peut être modifié pour s'adapter aux caractéristiques du WPC. De plus, la plate-forme Sky est bien connue dans le monde des réseaux de capteurs et bénéficie d'un support important de la part de la communauté. Ainsi, elle est la plate-forme disponible la plus à jour dans COOJA.

Le module WPC est le composant qui a le plus d'impact sur le comportement global du noeud. Ses spécificités doivent donc être implantées avec précaution pour obtenir une simulation fidèle. Les légères différences entre les micro contrôleurs n'ont pas d'impact significatif vis à vis de la fidélité de la simulation.

4.4.3 implantation du média CPL dans COOJA

Comme discuté précédemment, un modèle du canal CPL est très difficile à lier à des expérimentations réelles. La meilleure approche pour obtenir un comportement correct est d'avoir des caractéristiques de liens fixés par des paramètres de manière statique, plutôt que déterminés à partir de modèles de propagation. Les noeuds sans fil peuvent découvrir leur environnement et calculer les liens avec leur voisinage via un modèle simple d'atténuation ou utiliser des disques unitaires dans lequel la communication est considérée comme possible. Cela ne peut pas être appliqué au liens CPL. La contrepartie est que nous devrons paramétrer manuellement tous les liens entre les noeuds.

COOJA dispose de plusieurs types de media (tous sans fil):

- Unit Disk Graph Medium (UDGM): Distance Loss
- Unit Disk Graph Medium (UDGM): Constant Loss
- Directed Graph Radio Medium (DGRM)
- No radio traffic
- Multi-path Ray-tracer Medium (MRM)

Tous ces médias permettent une auto configuration des liens, chacun reposant sur un modèle de propagation donné. Seul le modèle DGRM est entièrement configurable. Il constitue ainsi un choix naturel pour servir de modèle de départ pour créer un média CPL.

Le média DGRM illustré sur la figure 4.4 requiert une configuration manuelle de tous les liens entre les noeuds simulés. Les liens sont orientés, permettant de créer des liens éventuellement asymétriques, un cas courant en CPL comme nous l'avons observé dans le chapitre 3. Chaque lien créé dispose d'une configuration du taux de succès et du délai.

Les délais, qui correspondent ici aux temps de propagation, n'ont pas vraiment d'impact sur les réseaux CPL car la vitesse de propagation du signal électrique dans un câble est très largement supérieure aux performances réseaux (en particulier la latence) sur des technologies CPL bas débit telles que WPC. Les latences observées sur les réseaux CPL sont dûes aux temps de traitement et aux mécanismes de niveau MAC plutôt qu'au temps de propagation du signal. Ce paramètre ne sera pas utilisé dans notre modélisation CPL.

Le taux de succès est très important pour la modélisation du CPL, car il permet d'injecter des valeurs mesurées sur un véritable réseau CPL dans le simulateur. Le taux de succès peut être réglé entre 0 et 100 %, avec une précision de 1%. Régler le taux de succès à 100% crée des

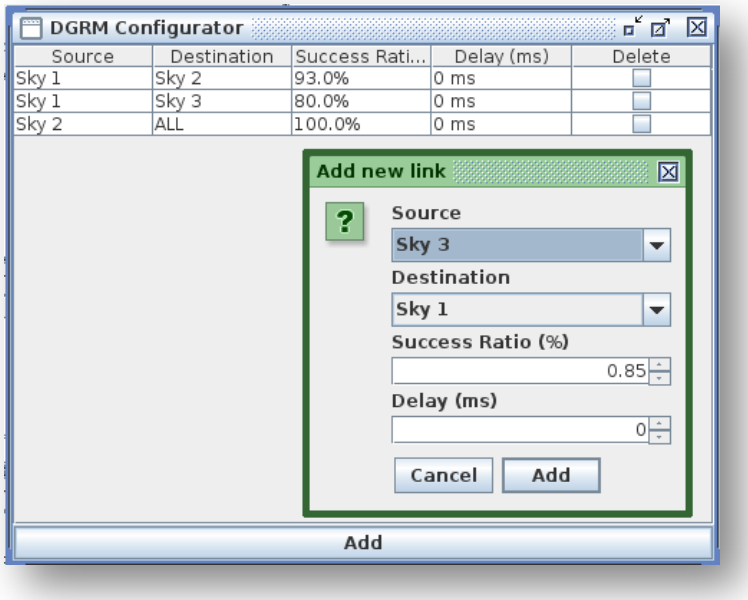


Figure 4.4: Le configurateur DGRM de COOJA

liens parfait qui permettent de se concentrer sur les problèmes de niveau réseaux uniquement, et permettent d'obtenir une borne supérieure des performances réseau. A l'inverse, fixer un taux de succès très faible sur un lien permettent d'étudier les limites des couches PHY et MAC.

Configurer manuellement chaque lien du réseau donne un modèle très précis, avec un comportement proche d'un réseau réel sur lequel on aurait effectué une campagne de mesure, mais cela requiert une configuration importante. Si chaque lien doit être configuré indépendamment, la configuration d'une simulation de N noeuds requiert le paramétrage de N*(N-1) liens.

La simulation d'un réseau CPL dans COOJA est composée d'un média spécifique et d'un plugin à activer sur chaque noeud simulé. Leur interaction est décrite dans la figure 4.5 ci dessous.

4.4.3.1 implantation de la couche physique

Pour utiliser ces fonctionnalités, le média CPL implanté étend l'implantation originelle du média DGRM dans COOJA. Cette extension inclut les fonctionnalités suivantes:

- L'émulation d'une tension de secteur partagée entre tous les noeuds
- Le calcul de la fenêtre temporelle où le WPC peut transmettre ou recevoir des données
- La mise à jour d'une valeur dans le noyau de Contiki en accord avec le calcul de cette fenêtre temporelle

La tension simulée est formée par un sinus, dont l'amplitude, la fréquence et la phase peut être réglée. Les valeurs par défaut sont 220 Volts, 50 Hz et une phase nulle, correspondant à la phase 1 d'un réseau de distribution d'électricité en France. Cette fenêtre temporelle est calculée en accord avec les spécificités de la technologie WPC. Cela crée une fenêtre temporelle autour

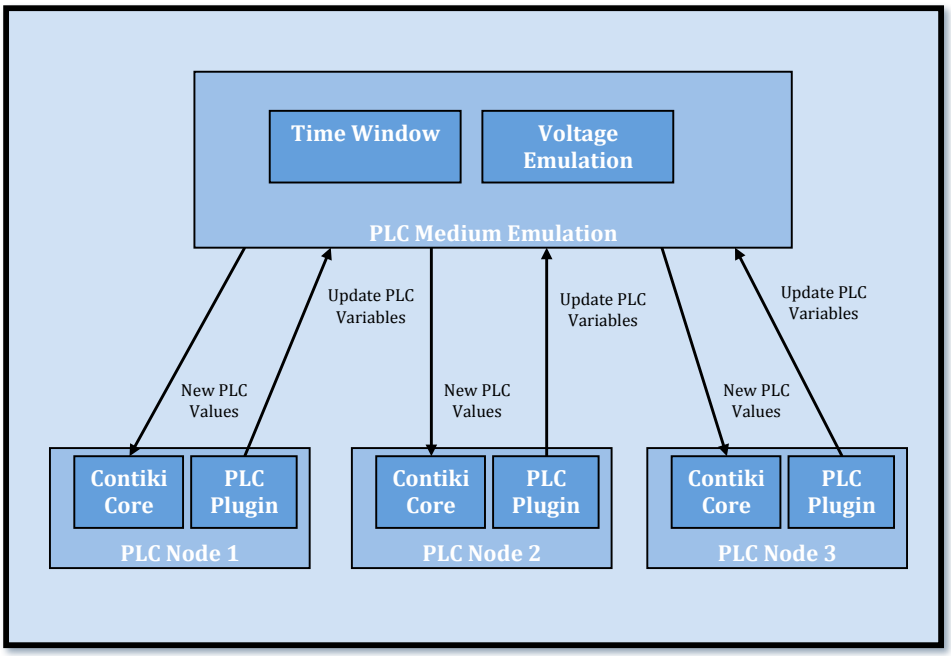


Figure 4.5: L'environnement CPL simulé dans COOJA

du passage par 0 de la tension dans laquelle l'émission et la réception de données est possible. Le calcul de cette fenêtre met à jour une valeur dans la partie principale de Contiki qui va impacter le comportement de l'émetteur/récepteur. Cette fonction est le lien entre l'émulation du média dans COOJA et la partie logicielle de Contiki qui est exécutée au dessus de chaque noeud simulé.

4.4.3.2 Module de synchronisation des noeuds

Un plugin au niveau du noeud a été implanté pour permettre à chaque noeud simulé d'utiliser l'implantation du média CPL et d'offrir les fonctions suivantes:

- Synchronisation de tous les noeuds sur une même phase électrique
- Déclenchement du calcul de la fenêtre temporelle de communication
- Fournir un pas de 100 μs sur le calcul de la tension

Grâce à l'architecture du simulateur COOJA, chaque noeud réalise ses actions les unes après les autres avant que la synchronisation du temps simulé ne soit incrémenté (la boucle "tick"). Le plugin CPL repose sur cette boucle pour faire appel à l'implantation du média CPL et ainsi synchroniser l'implantation du média et avec le comportement des noeuds. L'appel à l'implantation du média CPL déclenche le calcul des valeurs de la tension. En particulier, la fenêtre de temps régissant les communications WPC est calculée pour vérifier si le WPC utilisé par le noeud simulé est capable de transmettre ou recevoir des informations. Le plugin CPL appelle l'implantation du média CPL toutes les 100μs. Cela assure une précision suffisante pour la synchronisation des communications.

4.4.4 implantation d'un noeud WPC dans COOJA

4.4.4.1 Modification du Microcontrôleur

Le projet MSPsim est plus actif que Avrora, et repose sur une large communauté. De plus, la plupart des utilisateurs de COOJA utilisent la plate-forme Sky, faisant profiter les noeuds basés sur des MSP430 à des mises à jour régulières, et compatibles avec les dernières améliorations de Contiki. MSPsim est également open-source, alors que Avrora ne donne accès qu'à un binaire, ce qui en fait un candidat idéal pour de futures modifications.

En partant de l'implantation du MSP430f1611 réalisée dans MSPsim, quelques modifications ont été nécessaires pour se conformer à la version f5438 de ce micro contrôleur. Le tableau 4.2 montre ces modifications.

Table 4.2: Comparaison des MSP430 f1611 et f5438 [99] [100]

	MSP430F1611	**MSP430F5438**
Fréquence (MHz)	**8**	**18**
Flash (KB)	**48**	**256**
RAM (KB)	**10**	**16**
ADC	12-bits SAR	12-bits SAR
Autres périphériques Intégrés	Multiplicateur Matériel, DMA, **2 DAC**, **12 Comparateurs Analogiques**, **SVS**	Multiplicateur Matériel , DMA, **RTC**, **Horloge Système Universelle**, **16ch ADC12**
Interface	1 USART (SPI ou UART **ou I2C**), 1 USART (SPI ou **UART**)	4 USCI_A (SPI ou UART ou **LIN ou IrDA**), 4 USCI_B (SPI ou **I2C**)
Timers	1 Watchdog, 1 16-bit (3CCR), 1 16-bit (7CCR)	1 Watchdog, 1 16-bit (3CCR), **1 16-bit (5CCR),** 1 16-bit (7CCR)

Une des caractéristiques les plus importantes de la version f5438 est sa capacité RAM/ROM. Des modifications ont été apportées dans la partie principale de MSPsim afin de s'adapter avec ces capacités mémoire. D'autres différences ont un impact limité sur les performances des composants WPC et ne sont pas considérées. Une nouvelle archive jar a été créée après ces modifications, pour être incluse dans COOJA et l'infrastructure de Contiki.

4.4.4.2 implantation du transceiver WPC

MSPsim offre également une implantation du module CC2420. Ce module RF est un émetteur/récepteur à 2.4GHz compatible avec le standard IEEE 802.15.4. Il inclut une modulation DSSS offrant un gain de 9 dB et un débit effectif de 250 kbps. Le tableau 4.3 fournit une comparaison rapide entre le CC2420 et le WPC.

Des différences majeures apparaissent dans les débits maximaux. Le WPC offre également un double buffer de données, ce qui n'est pas le cas du CC2420. Cependant, cette différence a un impact relatif sur les performances réseaux, compte tenu de la différence de débit. l'implantation du WPC dans MSPsim est basée sur le CC2420 avec une modification du débit. Un nouveau module WPC a été créé avec la même architecture que le CC2420. La période d'un symbole a été ajustée à 16 μs, pour correspondre avec le débit du WPC avec code correcteur de Hamming

Table 4.3: Comparaison entre le CC2420 et le WPC (depuis les sites internet de Texas Instrument et Watteco)

	CC2420	WPC
Fréquence (MHz)	2400	2 – 4 (sur câbles électriques)
Tension maximale de fonctionnement (V)	3.6	5
Courant consommé en RX (mA)	19.7	2
Courant consommé en TX (mA)	17.4	2
Mesure RSSI	Digital	Digital
Buffer de données	128 Octets (TX)	2x 128 Octets (TX/RX)
Débit maximal (kbps)	250	10

qui est de 4,8 kbps. Le CC2420 peut transmettre des données en continu. alors que le WPC envoie des données par trains d'impulsions autour du passage par 0 V de la tension. Avec le code correcteur de Hamming, le WPC envoie des trains de 12 octets durant chaque période de 50 Hz. l'implantation du WPC respecte cette fragmentation au niveau physique.

4.4.4.3 Modification de la couche MAC

La partie MAC n'est pas située dans COOJA, mais dans le noyau de Contiki. Le module WPC réel inclut la partie MAC, ce qui signifie que l'implantation de la couche MAC disponible dans Contiki n'est pas utilisée. Pour simuler le WPC, nous devons donc utiliser cette implantation MAC. Le tableau 4.4 reprend les différences des drivers Contiki entre un noeud réel et simulé pour les plate-formes Sky et WPC.

Table 4.4: Comparaison entre les plate-formes réelles et simulées des noeuds Sky et WPC

Driver	Noeud Sky Réel	Noeud Sky Simulé	Noeud WPC Réel	Noeud WPC Simulé
Réseau	Sicslowpan	Sicslowpan	Sicslowpan	Sicslowpan
MAC	Csma	Csma	Nullmac	Csma_wpc
RDC	Contikimac	Contikimac	Sicslowmac	Wpc_mac
Radio	CC2420	CC2420	Wpc154	Wpc

Toutes ces configurations correspondent à une pile protocolaire IPv6 sur 802.15.4, c'est pourquoi elles utilisent toutes le driver réseau sicslowpan, qui correspond à l'implantation dans Contiki du protocole 6LoWPAN, et notamment du mécanisme défini par la RFC 6282 [31].

Le standard IEEE 802.15.4 [11] définit le mécanisme CSMA/CA de la couche MAC. A partir de l'implantation du CC2420, une version modifiée de l'implantation du protocole CSMA/CA a été créée dans Contiki afin de se conformer aux spécificités du module WPC. Les modifications portent notamment sur le calcul des backoff et le mécanisme de ré-émission de trames du module WPC.

La couche RDC est spécifique à Contiki, et se situe entre les couches PHY et MAC. Elle permet de définir un mécanisme de réveil périodique du module communiquant afin d'économiser les dépenses d'énergie. Ce type de mécanisme n'est pas utilisé sur le module WPC. Cependant, le driver contikimac offre plusieurs mécanismes utiles tels que la détection des No-Ack et des collisions. Ces fonctions sont implantées directement dans le WPC. Pour le noeud WPC

simulé, les parties importantes de ces fonctions existantes dans contikimac ont été ajoutées dans l'implantation de sicslowmac pour créer une couche RDC spécifique appelée Wpc_mac.

Le driver RF est le dernier étage avant la transmission des paquets au module. Les noeuds Sky utilisent un driver spécifique CC2420, alors que les noeuds WPC réels utilisent un autre driver spécifique. COOJA utilisant une implantation complète du CC2420, les drivers RF des noeuds réels et simulés sont identiques. Les noeuds WPC simulés en revanche, utilisent un driver qui est assez semblable au driver CC2420, grâce au choix du design de l'implantation. Des modifications ont été apportées pour synchroniser la transmission des modules WPC simulés avec les variables du noyau Contiki qui reflètent la fenêtre temporelle calculée dans l'implantation du média CPL dans le simulateur COOJA. Le driver WPC attend cette fenêtre temporelle avant de commencer à transmettre des paquets. Ce driver gère également le mécanisme spécifique de Clear Channel Assessment (CCA) du module WPC.

4.5 Tests et résultats de l'implantation

4.5.1 Comportement

Pour utiliser les modules CPL précédemment décrits, une simulation doit être créée dans COOJA en sélectionnant le média "PLC" qui apparaît dans la liste des médias disponibles. La création de cette simulation ouvrira automatiquement 4 fenêtres : Control Panel, Simulator Visualizer, Log Listener and Timeline. Les noeuds CPL doivent ensuite être ajoutés en sélectionnant le type de noeud "Wpcip Mote Type" dans la liste. Le noeud CPL créé se basant sur la plate-forme SKY, tout exemple compilé pour cette plate-forme peut être utilisé sur le noeud CPL émulé, car les drivers bas niveaux permettent cette adaptation. Pour activer la synchronisation entre les noeuds CPL, il est nécessaire d'activer sur tous les noeuds CPL de la simulation le plugin "Powerline Plugin". Une fois les noeuds ajoutés à la simulation, les liens entre les noeuds doivent être configurés manuellement. La boîte de dialogue "DGRM Configurator" permet de spécifier le pourcentage de succès et le délai sur chaque lien orienté. Pour créer rapidement une simulation prédéfinie, il est possible de charger un fichier contenant les configurations des liens. Enfin, pour permettre de connecter la simulation à des applications externes, le plugin "Serial Socket" peut être activé sur le routeur de bordure du réseau simulé, afin d'ouvrir une socket sur laquelle on pourra se connecter depuis l'extérieur. Ce plugin a par exemple été utilisé afin d'envoyer des messages ICMP vers les noeuds virtuels, pour vérifier le comportement de la simulation.

Un exemple de l'environnement complet de simulation est illustré sur la figure 4.6. On y aperçoit une visualisation de la topologie, un affichage de la sortie série de tous les noeuds simulés, un affichage temporel des trames envoyées et reçues, les contrôles sur le temps de la simulation, ainsi que les différents plugin activés nécessaire à la simulation CPL.

La figure 4.7 montre un exemple d'interaction entre la simulation et l'environnement extérieur. Dans ce cas, on utilise la commande "ping" de l'environnement linux pour vérifier le bon fonctionnement des noeuds simulés, à travers la socket ouverte sur le border router simulé, qui sert ici de passerelle entre le réseau simulé et l'OS.

4.5.1.1 Synchronisation des noeuds CPL

Une des caractéristiques clés d'un réseau WPC est que tous les noeuds sont synchronisés, grâce à la fréquence de la tension qui est distribuée sur tous les noeuds. La figure 4.8 montre une requête et une réponse à une commande ping entre deux noeuds. Ces trames sont unicastées et acquittées.

Comme on peut le voir, les noeuds sont bien synchronisés. Les graduations de la partie haute du plugin "timeline" représentent le temps simulé avec un intervalle de 10 ms. La couleur bleue

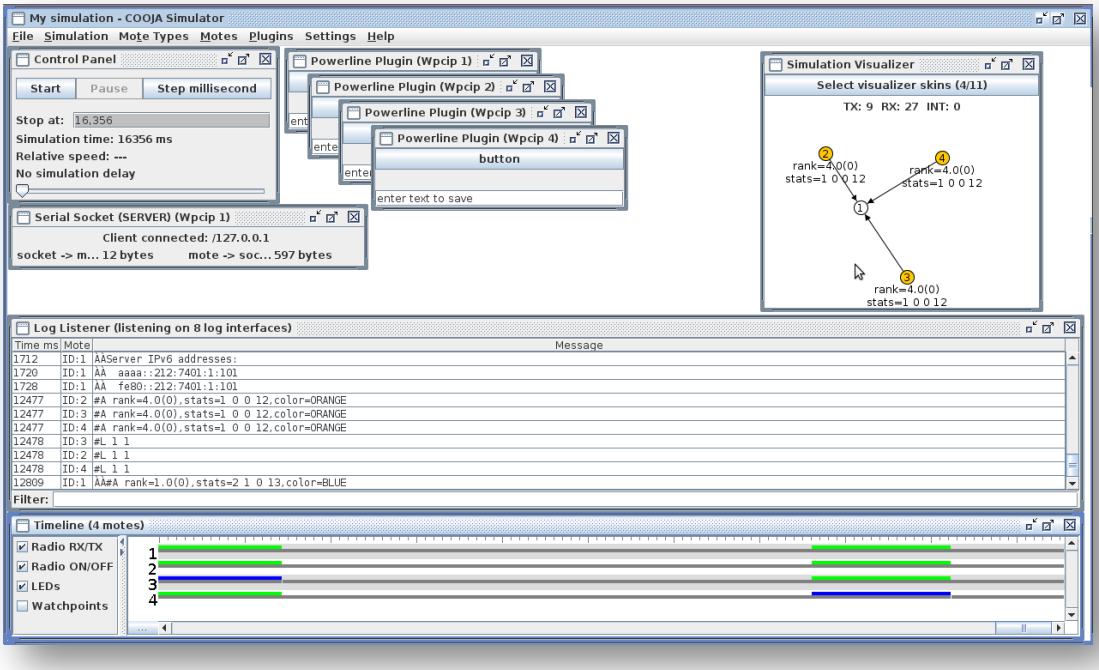


Figure 4.6: Visualisation d'une simulation CPL sous COOJA

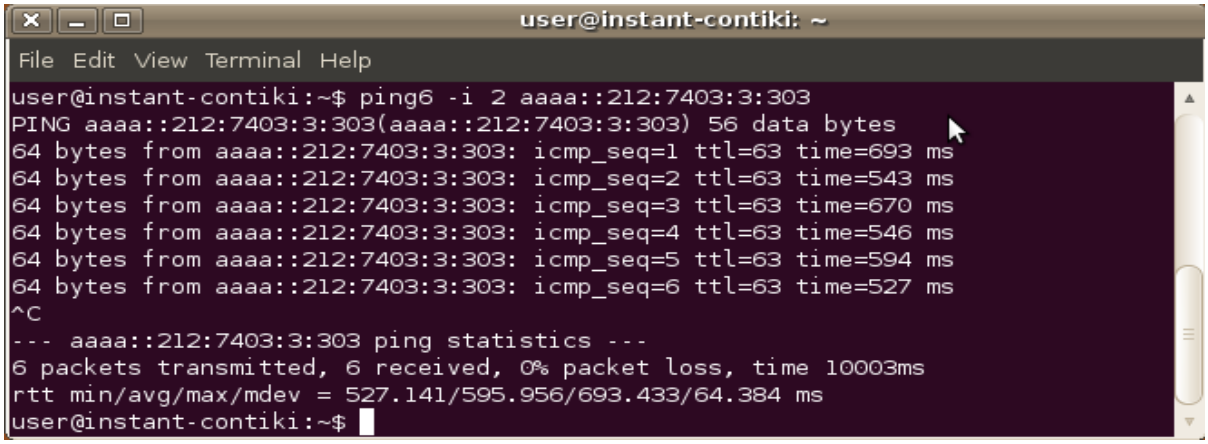


Figure 4.7: Utilisation de la commande "ping" vers un noeud simulé

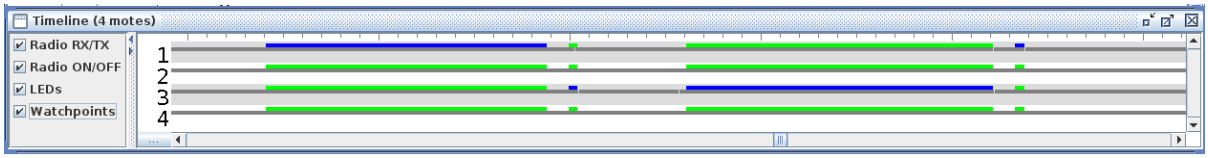


Figure 4.8: Vérification de la synchronisation entre 2 noeuds CPL simulés

représente une émission, la couleur verte une réception, et la couleur rouge une collision entre 2 trame reçues simultanément. On peut observer qu'un envoi de trame ne peut démarrer que sur un multiple de 20 ms. Cela correspond en effet à une période à la fréquence de 50 Hz de la tension émulée dans cette simulation.

4.5.1.2 Vérification des débits

Une autre différence majeure du module WPC avec l'implantation originale du CC2420 est le débit. Avec un code correcteur de Hamming, le WPC émet 12 octets à chaque cycle de 50 Hz de la tension. La figure 4.9 montre le temps nécessaire pour envoyer un message echo request.

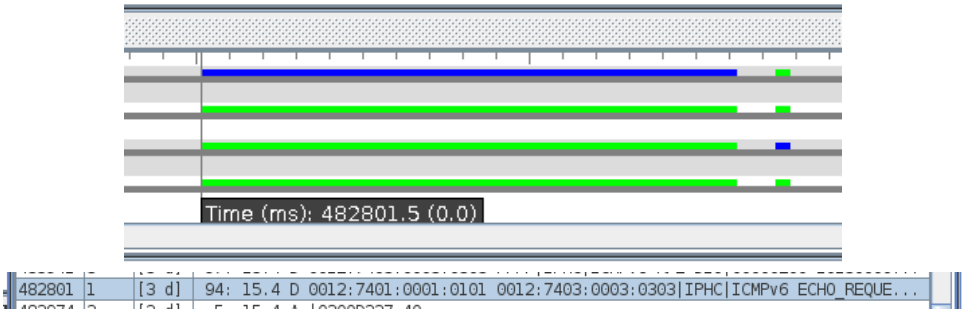


Figure 4.9: Temps nécessaire à une transmission CPL simulée

La partie inférieure de la figure 4.9 est un extrait du plugin Radio Logger. Comme on peut le voir, le message echo request (avec une taille de donnée standard de 60 octets) a une taille totale de 94 Octets (indiquée dans la capture du radio logger). Le WPC a besoin de (94/12) 7,8 périodes pour envoyer ce message. De ce fait, le WPC va utiliser le media CPL durant 8 périodes de 20 ms, ce qui correspond à 160 ms. Cela correspond au temps mesuré sur le plugin timeline. L'échange suivant cet envoi de trame correspond à l'acquittement de la trame.

4.5.2 Comportement de la couche MAC

4.5.2.1 Calcul du backoff

Le mécanisme CSMA/CA utilisé sur le module WPC calcule un temps aléatoire avant chaque envoi. Un nombre aléatoire est tiré dans l'intervalle [0-7] (avec les réglages actuels) et correspond au nombre de périodes de tension avant que la trame ne soit envoyée. Si le canal est occupé ou que la trame n'est pas acquittée, l'intervalle double. Nous autorisons actuellement trois répétitions maximum. La figure 4.10 montre quelques échanges d'écho request/reply pour illustrer la génération de temps aléatoire effectuée par le mécanisme CSMA.

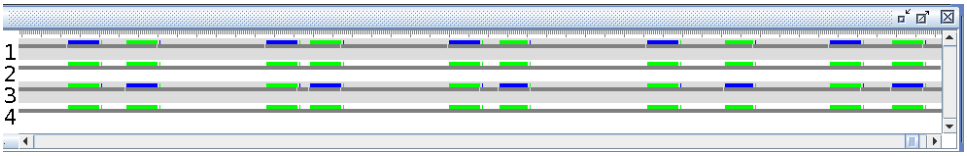


Figure 4.10: Valeur aléatoire du temps de backoff de CSMA/CA

Comme on peut le voir, le temps entre la requête et la réponse au message varie d'un échange à l'autre. L'échelle de temps des graduations du plugin est ici de 100 ms.

4.5.2.2 Evitement de Collision

La variation du mécanisme d'évitement de collision CSMA utilisée reporte la transmission d'une trame si le canal est occupé. L'occupation du média est effectué avec un Clear Channel Assessment (CCA). Si nous reportons l'envoi d'une trame, nous augmentons l'intervalle dans lequel le temps aléatoire est choisi. Les figures 4.11 et 4.12 montrent le cas ou l'envoi d'une trame a été reportée à cause de l'occupation du canal.

Log Listener (listening on 16 log interfaces)

Time ms	Mote	
67752	ID:2	csma: transmitting after 80 ms
67836	ID:2	csma: First sending of number 0 0x11fc
67898	ID:7	csma: transmitting after 0 ms
67905	ID:7	csma: First sending of number 0 0x11fc
67907	ID:7	Status = 1
67910	ID:7	csma: rexmit collision 1
67916	ID:7	csma: retransmitting with time 20 0x11fc
67922	ID:3	#A rank=4.8(0),stats=9 6 15 15,color=ORANGE
67941	ID:7	csma: resending number 1 0x11fc
67943	ID:7	Status = 1
67945	ID:7	csma: rexmit collision 2
67952	ID:7	csma: retransmitting with time 120 0x11fc
68046	ID:2	Status = 0
68048	ID:2	csma: rexmit ok 1
68074	ID:7	csma: resending number 2 0x11fc

Figure 4.11: Traces du mécanisme d'évitement de collision dans COOJA

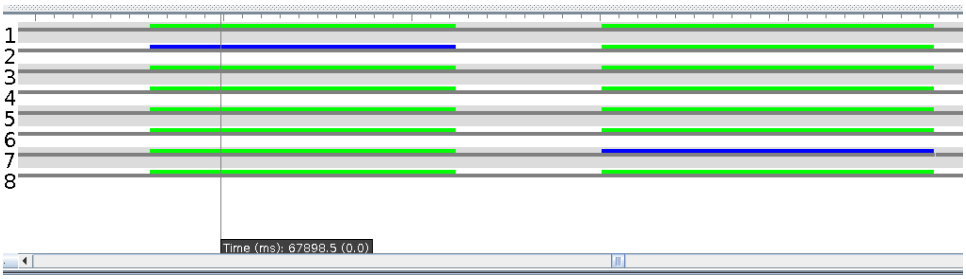


Figure 4.12: Trames correspondantes à la séquence précédentes

Comme on peut le voir sur les figures 4.11 et 4.12, le noeud 2 transmet d'abord un paquet. Durant la transmission, le noeud 7 décide également d'envoyer un trame. Il voit que le canal est occupé, retourne une collision, et calcule un nouveau nombre aléatoire (20 ms). Malheureusement, après ce temps, la transmission au noeud 2 est toujours active et le noeud 7 doit effectuer un nouveau calcul de temps aléatoire (120 ms). Ce temps est suffisant pour démarrer une transmission après que le noeud 2 ait terminé la sienne. La trame du noeud 7 est finalement transmise avec succès après avoir été reportée deux fois. Notons que les temps calculés sont toujours un multiple de 20 ms, pour s'accorder avec la fréquence de 50 Hz de la tension.

4.5.2.3 Détection des No-ACK

Conformément au standard IEEE 802.15.4, les trames unicastées sont acquittées dans les réseaux WPC. Cela ajoute de la robustesse à la communication, et pallie aux collisions, car nous avons la

confirmation que le paquet a été correctement transmis. Dans les réseaux WPC, l'acquittement (ACK) doit être reçu durant la période de tension suivant immédiatement la transmission de la trame. Nous considérons que l'ACK n'a pas été reçu s'il n'est pas présent dans les 40 ms suivant la fin de la transmission (une période de tension = 20 ms pour laisser la transmission se terminer + une nouvelle durant laquelle l'acquittement doit être reçu). Les figures 4.13 et 4.14 montrent une détection de No-Ack.

Log Listener (listening on 16 log interfaces)

Time ms	Mote	
27642	ID:5	csma: rexmit noack 1
27678	ID:5	csma: rexmit collision 2
27742	ID:2	csma: rexmit ok 1
28168	ID:5	csma: rexmit ok 3

Filter: rexmit

Figure 4.13: Détection des No-ACK (logs)

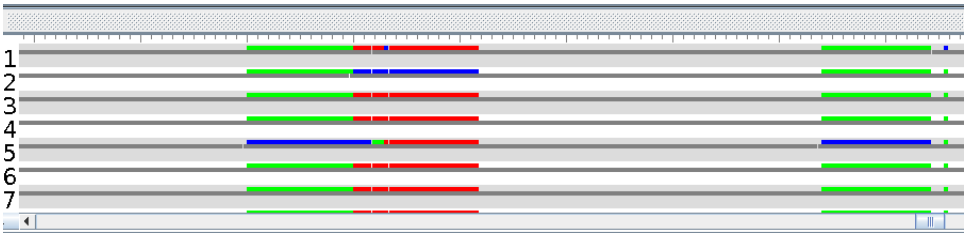


Figure 4.14: Détection des No-ACK (trames)

Comme montré sur la figure 4.14, une collision survient (colorée en rouge) entre les noeuds 5 et 2. L'acquittement n'est pas reçu par le noeud 5 (visible dans les logs sur la figure 4.13) et détecte une collision durant la transmission. Comme le paquet émis par le noeud 2 ne doit pas acquitté (trames broadcast), il est considéré comme correctement transmis. Le paquet du noeud 5 est retransmis après un temps aléatoire puis correctement reçu et acquitté.

4.5.3 Limites et perspectives

Limites connues :

- La simulation émule seulement le CPL sur une tension de 220V, monophasé, et à une fréquence de 50 Hz. La variation de l'amplitude n'a pas d'effet sur la communication, mais la variation de phase et de fréquence refléterait une plus grande diversité de cas réels, en particulier pour des réseaux triphasés.
- Les simulations avec beaucoup de noeuds peuvent nécessiter une machine avec de hautes performances pour exécuter la simulation.
- Si la simulation ne peut pas être exécutée en temps réel, les mesures de performances peuvent dériver de manière significative.
- La qualité des liens est fixe durant toute la durée de la simulation.

- Le simulateur peut seulement être exécuté dans un environnement linux.
- l'implantation des composants du WPC provient d'implantations d'autres composants matériels, et peut diverger du comportement réel.

Perspectives :

- Ajouter une implantation multi-phases et multi-fréquences du média CPL aiderait à être plus proche de certains cas réels.
- l'implantation des composants du WPC pourrait être un bon point de départ pour l'implantation d'un appareil présentant plusieurs interface physiques (mélangeant CPL et RF par exemple).
- Ajouter des noeuds perturbateurs au simulateur aiderait à confronter la simulation aux challenges des réseaux WPC réels.
- Configurer les caractéristiques des liens depuis un fichier reflétant des mesures réelles serait d'une grande utilité.
- Un outil d'analyse interne (disponible dans le simulateur directement) serait moins intrusif que la solution WPCDiag actuelle.
- De futures versions du WPC avec des améliorations de performances seraient facilement implémentables

4.6 Conclusion

Nous avons décrit ici l'implantation du module CPL dans le simulateur COOJA. Cette implantation est fidèle au comportement idéal du module CPL et permet d'étudier cette technologie en s'affranchissant des aléas des expérimentations réelles. En effet, à moins de disposer d'un réseau électrique isolé, le CPL n'est pas un média que l'on peut maîtriser et constitue un environnement qui n'est pas répétable. Compatible de fait avec le micro OS Contiki, les développements effectués dans cet environnement sont directement utilisables sur cette émulation CPL, permettant de concevoir la pile protocolaire à mettre en oeuvre sur le média CPL.

Chapter 5

Intégration du média CPL dans les réseaux de capteurs

5.1 Introduction

L'utilisation d'une pile de communication reposant sur le standard IEEE 802.15.4 est assez populaire dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil, et le nombre d'implantations du protocole 6LoWPAN est en constante augmentation. Cependant, très peu d'entres elles considèrent l'utilisation d'autres médias que IEEE 802.15.4. Dans ce chapitre, nous étudions la possibilité de l'utilisation d'IPv6 dans un réseau de capteurs connectés par CPL, et démontrons l'interopérabilité avec d'autres médias. Ce chapitre décrit l'adaptation du standard IEEE 802.15.4 sur un médium CPL. En nous appuyant sur cette nouvelle interface standard, nous démontrons la possibilité de véhiculer des données sur CPL avec une bonne fiabilité, et une consommation énergétique limitée, grâce à l'utilisation de la modulation par pulses du module CPL WPC. Cela nous permet de bénéficier des développements réalisés dans le cadre des recherches sur les réseaux de capteurs sans fil pour les appliquer aux réseaux de communication CPL. Ainsi, une telle pile 6LoWPAN/802.15.4 fournit un standard de communication générique pour des réseaux de capteurs sur média hétérogènes. Nous démontrons finalement l'interopérabilité créée par notre pile 802.15.4/6LoWPAN par des échanges de paquet entre des réseaux de capteurs CPL et RF.

5.2 IEEE 802.15.4 : Une solution d'adaptation au niveau MAC pour le CPL

Ce chapitre se concentre sur les critères qui doivent être satisfaits pour créer une solution réseau sur CPL. Cette partie trace en particulier un parallèle entre les caractéristiques du CPL et le type de réseaux pour lesquels le standard IEEE 802.15.4 a été conçu, afin de justifier son utilisation sur un autre média que la RF.

Le standard IEEE 802.15.4 étant originellement spécifié pour des appareils RF, son utilisation sur un appareil CPL peut sembler étrange. Pour clarifier cela, revenons sur l'origine de ce standard : Le but de ce standard est de fournir un langage commun à une catégorie de réseaux appelée "Low Rate Wireless Personal Area Networks" (LR-WPANs).

Contrairement aux réseaux locaux sans fils (WLANs), les WPANs offrent une infrastructure minimale, voire aucune infrastructure. Cette caractéristique permet à des solutions nécessitant peu de ressources matérielle, énergiquement efficaces, et peu chères d'être implémentées pour une large gamme d'appareils. Un réseau LR-WPAN est un réseau simple, faible coût, permettant des applications de connectivité sans fil avec une puissance limitée, et des besoins peu élevés en débit. L'objectif principal d'un LR-WPAN est la facilité d'installation, la fiabilité du transfert des données à faible portée, un faible coût et une durée de vie raisonnable (typiquement plusieurs années, voir chapitre 1) tout en maintenant des protocoles de communication simples et flexibles.

Le standard IEEE 802.15.4 définit le protocole et les interconnexions possibles pour les communications entre les appareils dont les contraintes ont été énumérées précédemment. Le module WPC est une technologie de communication bas débit, basse consommation et faible coût, et de nombreuses caractéristiques des LR-WPAN correspondent très bien avec ces spécifications. La principale différence est bien évidement le médium employé, qui peut être utilisé pour communiquer et pour alimenter le noeud. Les noeuds CPL sont de ce fait non contraints par la quantité d'énergie disponible car ils disposent d'une source d'alimentation constante et fiable. Il s'agit de la différence majeure avec les noeuds sans fil. Cependant, même si un noeud CPL n'est pas limité par la quantité d'énergie disponible, il est essentiel de garder sa consommation aussi faible que possible dans un contexte d'économie d'énergie, comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 3. Notons pas ailleurs que dans le cadre d'une application de monitoring énergétique, utiliser un noeud communiquant dont l'alimentation consomme 4 watts de manière continue pour contrôler

un appareil qui consomme lui-même 5 Watts est sans intérêt, car la consommation du noeud sur une journée sera bien supérieure à celle de l'appareil même utilisé plusieurs heures par jour.

Le CPL utilisé comme média de communication fournit potentiellement un lien physique entre chaque noeud connecté au réseau électrique. Toutefois, la présence de ce lien ne signifie pas que la communication est toujours possible quand on prend en compte les perturbations et les bruits générés sur le médium. De même que dans un WPAN et comme nous l'avons vu présenté dans le chapitre 3, la communication entre les noeuds CPL n'est pas toujours possible entre tous les point du réseau. Ainsi, les réseaux CPL font face aux mêmes types de problèmes que les réseaux de capteurs sans fil vis à vis de la possible non fiabilité de leur média. De ce fait, le standard IEEE 802.15.4 adapté au CPL peut être une solution robuste pour des communications bas débit sur le CPL. Associé à un réseau 6LoWPAN, cela représente une excellente solution pour fournir une interopérabilité facile avec les LR-WPAN "classiques". De plus, il est ainsi possible de tirer le meilleur de ces deux mondes physiques et transporter des données sur un LR-WPAN hétérogène mélangeant RF et CPL.

5.3 implantation du standard IEEE 802.15.4 sur CPL

Le standard IEEE 802.15.4 définit les couches PHY et MAC du modèle OSI. Dans cette partie, nous proposons d'adapter ces deux couches sur le CPL.

5.3.1 Emulation d'un transceiver RF sur CPL

Pour l'adaptation du standard IEEE 802.15.4 sur le CPL, une implantation open source de ce protocole a été utilisée. Le but de cette adaptation est d'émuler le module RF avec notre module CPL comme représenté sur la figure 5.1. Pour ce faire, une interface SPI augmentée a été développée entre le module CPL et le micro contrôleur afin de le contrôler de la même manière qu'un module RF "classique".

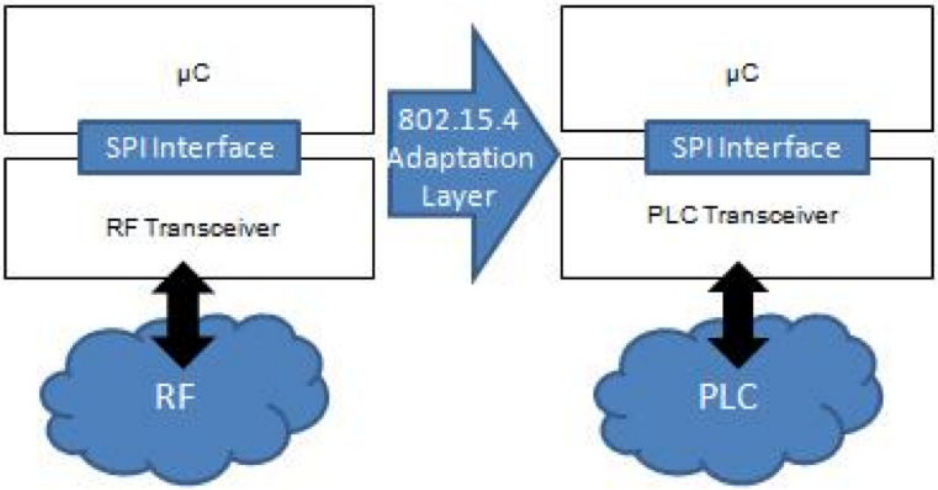


Figure 5.1: Emulation d'un module RF classique par un module CPL à travers une interface SPI augmentée

5.3.2 Adaptation au niveau physique

La couche physique du standard IEEE 802.15.4 propose les services suivants: activation/désactivation du module, détection d'énergie, indication de la qualité de lien, sélection de canal, vérification de la disponibilité du canal, et évidemment la transmission et la réception des paquets à travers un médium physique.

Notre module CPL fragmente chaque trame IEEE 802.15.4 en paquets de taille inférieure aux 127 octets possibles définit dans le standard. Le débit actuel est d'environ 10 kbps sur une tension à une fréquence de 50 Hz, signifiant que 25 octets sont envoyés durant chaque période de la tension. Le module fragmente donc les données en paquets de 25 octets qui sont envoyés autour du passage par 0 V de la tension. L'agencement spécifique de cette communication nécessite des adaptations des timings, comparé à un module RF classique qui permet une transmission continue. La spécification physique du standard décrit complètement l'interface physique (bandes de fréquence, modulations et débits). Pour notre module spécifique, ces spécifications sont réduites a minima. Les attributs de l'interface physique sont écrits dans la base de donnée physique. Cette base de données a été adaptée pour correspondre à notre module CPL:

- phyCurrentChannel: Contrairement à certains média RF, il n'y a qu'un seul canal disponible sur notre module WPC. La normalisation des différentes bandes de fréquences CPL est toujours en progression, mais un intervalle de temps dans le bande de 2 à 4 MHz a déjà été réservé pour notre solutions CPL bas débit à base de pulses par le groupe de travail P1901 [95]. Cet intervalle de temps est appelé "LRWBS" pour Low Rate Wide Band Services.
- phyTransmitPower: Cet attribut est utilisé pour régler la puissance de transmission du module. La puissance de transmission est constante pour notre module CPL, donc ce paramètre est fixé à une constante de manière à respecter les normes CEM en vigueur.
- phyCCAMode: Cet attribut spécifie trois différents modes de vérification de la disponibilité du canal définie dans le standard. Cette vérification est réalisée avec une méthode spécifique par notre module CPL.
- phyCheckCRC: Cet attribut est utilisé pour activer ou désactiver la vérification de la somme de contrôle (CRC). Cette vérification est implémentée directement dans le module CPL, et cet attribut peut être activé ou désactivé suivant le niveau de fiabilité souhaité.
- phyGenerateCRC: Cet attribut est utilisé pour activer ou désactiver la génération du CRC. Une génération est implémentée dans notre module CPL et cet attribut gère donc son utilisation ou non.

5.3.3 Adaptation au niveau MAC

La couche MAC utilisée sur nos modules CPL est très proche de la couche MAC définie par le standard. Quelques ajustement de timing ont toutefois été nécessaires par rapport aux spécificités de la communication. La couche MAC du standard IEEE 802.15.4 fournit les services suivants; gestion des trames beacon, accès au canal, gestion des Guaranteed Time Slot (GTS), validation des trames, acquittement des trames, association / désassociation, sécurité. Les attributs de temps définis dans la base de données MAC ont été incrémentés afin de s'adapter à notre interface physique CPL.

- macAckWaitDuration: Cet attribut détermine le temps maximum acceptable pour la réception des acquittements. Cet attribut a été incrémenté de manière à respecter les spécificités

du module. Cette incrémentation est un résultat de la modification de la constante MAC "aUnitBackoffPeriod", qui participe dans le calcul de l'attribut "macAckWaitDuration". Cette constante détermine le nombre de symboles formant la période de temps de base utilisée par l'algorithme CSMA/CA.

5.3.4 Résultats de l'adaptation

La figure 5.1 compare les caractéristiques des LR-WPAN définies dans le standard IEEE 802.15.4 avec notre réseau CPL implémentant notre adaptation du standard.

Table 5.1: LR-WPAN par rapport à notre PLC-PAN

	LR-WPAN	WPC-PAN
Débit (kbps)	250, 100, 40, 20	10
Topologie étoile ou point à point	OK	OK
Adresses courtes (16 bit) ou longues (64 bit)	OK	OK
GTS	Optionnel	non gérées
CSMA-CA	OK	OK
Protocole acquitté	OK	OK
Basse consommation	OK	OK
Indication de qualité de lien	OK	OK
Canaux disponibles	16 à 2,4 GHz 30 dans la bande 915 MHz 3 dans la bande 868 MHz	1 canal dans la bande 2-4 MHz

Notre adaptation CPL correspond à la définition originale du standard IEEE 802.15.4 pour la plupart des critères.

5.4 Expérimentations

Dans cette section, une expérimentation d'interopérabilité entre des noeuds RF et CPL utilisant le standard IEEE 802.15.4 est démontrée. C'est une première preuve de concept de transfert de données dans un réseau hétérogène CPL/RF. Cette expérience de niveau MAC met en lumière un point de départ pour l'intéropérabilité IEEE 802.15.4.

5.4.1 Description du matériel

5.4.1.1 WPCDevelopment Kit.

La technologie WPC a été utilisée grâce à un Kit de développement WPC de Watteco. Il permet à l'utilisateur d'intégrer facilement un module CPL et de l'utiliser sans risque comme un outil de communication sur CPL.

Cette architecture est assez similaire à un noeud RF qui est principalement composé d'un micro contrôleur et d'un module communicant. L'interface USB fournit une interface série vers le noeud. Dans cette expérimentation, nous utilisons deux noeuds CPL avec des facteurs de formes différentes.

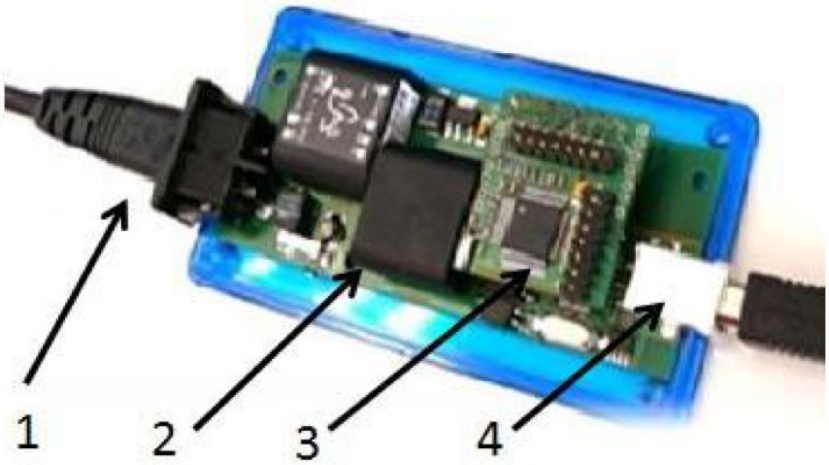


Figure 5.2: Le kit de development WPC de Watteco set composé de 4 parties differentes: 1) Alimentation AC, 2) Module WPC, 3) Microcontrôleur, 4) Interface USB

Le premier est un kit de développement WPC connecté d'un côté à un PC via une interface USB et de l'autre au réseau électrique, de manière à alimenter le système et à pouvoir envoyer des trames sur le CPL. Cet élément est utilisé en quelque sorte comme un dongle USB/CPL.

Le second noeud CPL présente un facteur de forme différent et dispose de fonctionnalités supplémentaires. Cet appareil est appelé une "smartplug". Il comprend un module WPC, un relais électrique permettant de commuter une charge jusqu'à 16 Ampères, ainsi qu'un composant de mesure de consommation électrique. Cet appareil agit comme un interrupteur électrique contrôlé par CPL, capable de retourner des mesures précises de consommation électrique, l'état du relais, et un message d'erreur si la commande échoue. Une ampoule électrique a été connectée à cet appareil pour montrer les capacités de commutation et créer une consommation électrique à mesurer.

5.4.1.2 Noeud sans fil

Figure 5.3: La plate forme Tmote SKY de Crossbow

Ce noeud est un noeud RF classique : le Tmote SKY de Crossbow. Il est composé de trois composants principaux : Un micro contrôleur MSP430 de chez TI (8 MHz, 48k de flash, 10k de

RAM), un module RF CC2420 (fréquence de 2,4 GHz, débit de 250 kbps) conforme au standard IEEE 802.15.4, et une antenne intégrée. Il peut être alimenté par son interface USB, ou avec deux piles AA permettant au noeud d'être autonome et éventuellement mobile. L'interface USB a été utilisée comme un lien série. Cette plateforme inclut également des capteurs pour mesurer la température, l'humidité et la luminosité.

Dans cette expérience, deux Tmote SKY ont été utilisés. Le premier agit comme un émetteur. Il lit la valeur de son propre capteur de lumière et l'envoie dans une trame IEEE 802.15.4. Cette trame est diffusée chaque seconde. Ce noeud est alimenté par deux piles AA et peut donc être placé n'importe où dans la portée RF. Le second agit comme un récepteur pour relayer la valeur de luminosité reçue dans le message RF sur son interface USB. Ce noeud est connecté à la passerelle avec un câble USB qui permet également de l'alimenter. Ce noeud agit comme un dongle RF/USB.

5.4.1.3 Application embarquée

L'application construit un pont applicatif entre les noeuds Tmote SKY et les noeuds CPL. Cette expérience étant une première preuve de concept, le logiciel de cette passerelle est exécuté sur un PC. Cette passerelle lit les données envoyées par le Tmote SKY via son interface USB, compare cette valeur à un seuil et envoie éventuellement une commande au module CPL via son autre interface USB. Le seuil est réglé de manière à définir un état lumineux ou sombre d'après les valeurs de luminosité collectées. L'état défini est ensuite converti en une commande qui sera envoyée par CPL, pour finalement allumer ou éteindre l'ampoule. En résumé, nous avons construit un actionneur CPL contrôlé par un capteur RF, et utilisant le protocole standard IEEE 802.15.4 sur un réseau hétérogène.

5.4.2 Description Matérielle

Les deux noeuds Tmote SKY utilisent l'OS Contiki dans sa version 2.3. Cette version de Contiki inclut une pile de communication IPv6 et une implantation de 6LoWPAN. Cela apporte au noeud la capacité d'échanger des paquets IPv6 sur le standard IEEE 802.15.4. Ainsi, la valeur de luminosité transmise entre les deux Tmote SKY est transportée dans des paquets IPv6. Les deux noeuds CPL utilisent également l'OS Contiki mais dans sa version 2.2 et les données transmises entre ces noeuds sont transportées dans des paquets IPv4. Le premier noeud CPL transmet la commande reçue par la passerelle au format UDP. La Smartplug décode la trame et réalise l'action ON/OFF. Ce noeud retourne ensuite la consommation électrique de la charge connectée dans une trame UDP. Il correspond à la consommation électrique et la valeur de luminosité.

La passerelle relie les noeuds CPL et Tmote SKY au niveau applicatif , comme représenté schématiquement sur la figure 5.4. Le logiciel utilisé dans cette expérience, comme illustré sur la figure 5.5, montre les données transmises.

5.5 Résultats de l'adaptation

La figure 5.5 synthétise l'expérience complète. La partie inférieure est un extrait de l'interface de la passerelle permettant de visualiser les valeurs de luminosité collectées et la commande du relais correspondante envoyée à la smartplug.

Un seuil de luminosité a été fixé à une valeur de 70% de la luminosité maximum mesurable. Le réception d'une valeur de luminosité inférieure génère l'envoi d'une commande CPL de mise en marche de la smartplug. Inversement, une valeur de luminosité supérieure au seuil fixé provoque l'extinction de la lampe.

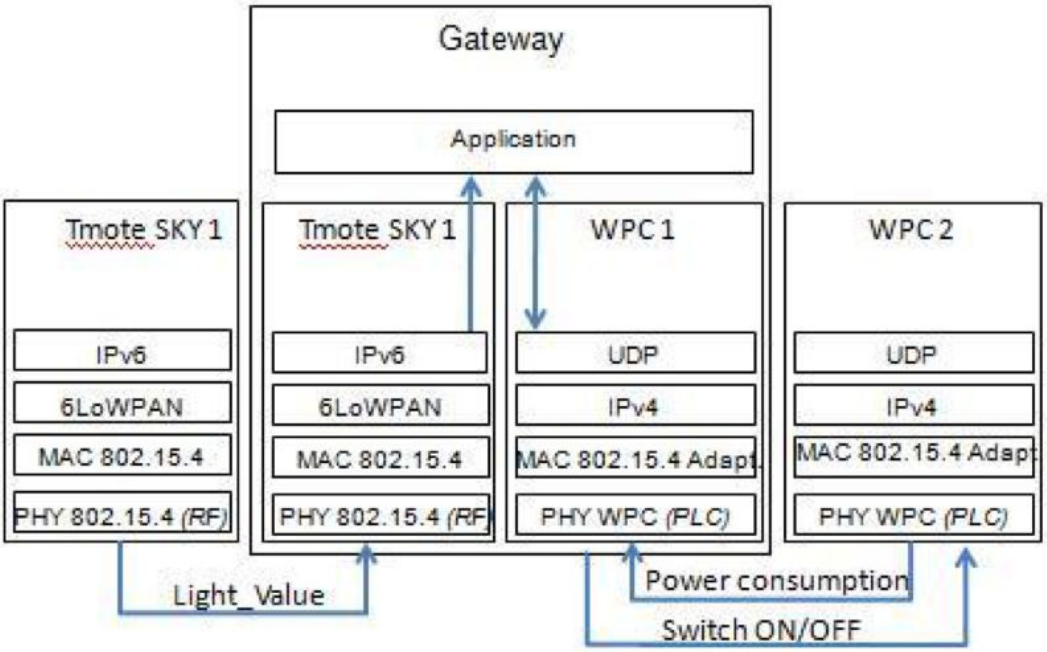


Figure 5.4: Couches de Communication

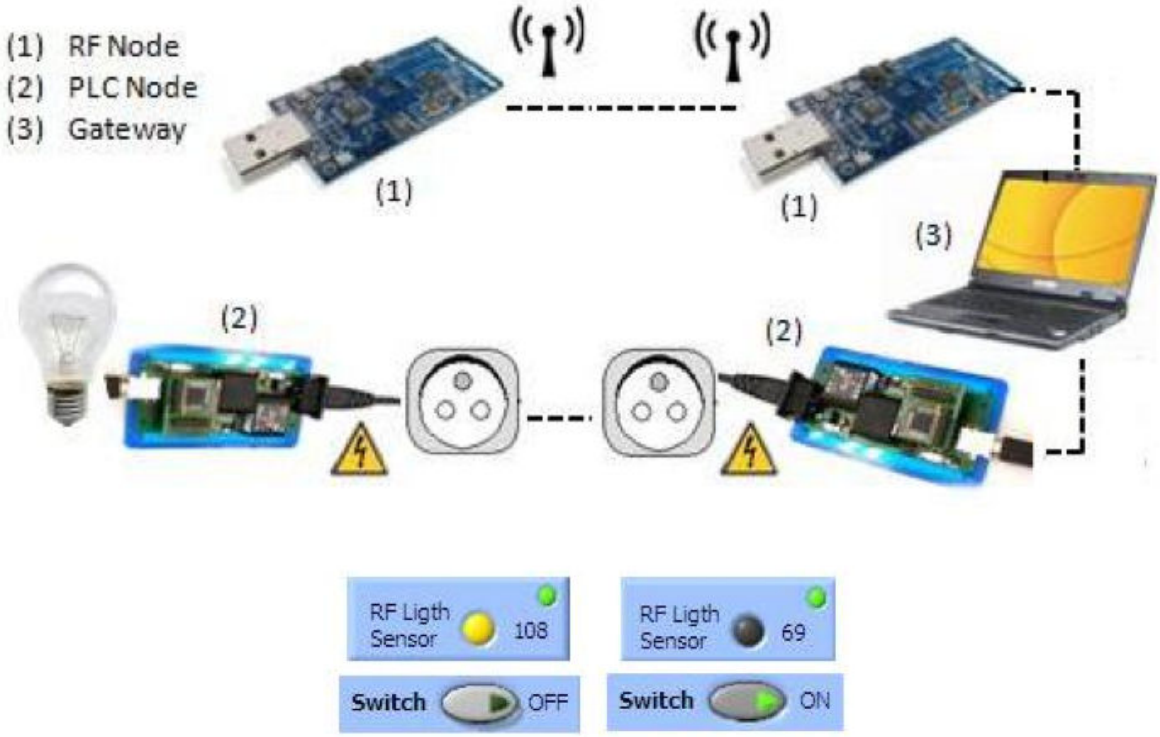


Figure 5.5: Schéma de l'expérience

La figure 5.6 présente un historique des états du relais dans la partie haute, et de la consommation électrique dans la partie basse. On mesure une consommation de 7 Watts quand l'ampoule est allumée, ce qui est cohérent avec le type d'ampoule utilisé (ampoule fluocompacte basse consommation). Les variations de la consommation mesurées sont dues au manque de précision du circuit de mesure de puissance dans la plage des très faibles consommations (il peut mesurer des consommations jusqu'à 3500 Watts). Les différentes trames échangées durant ces actions sont représentées sur la figure 5.7.

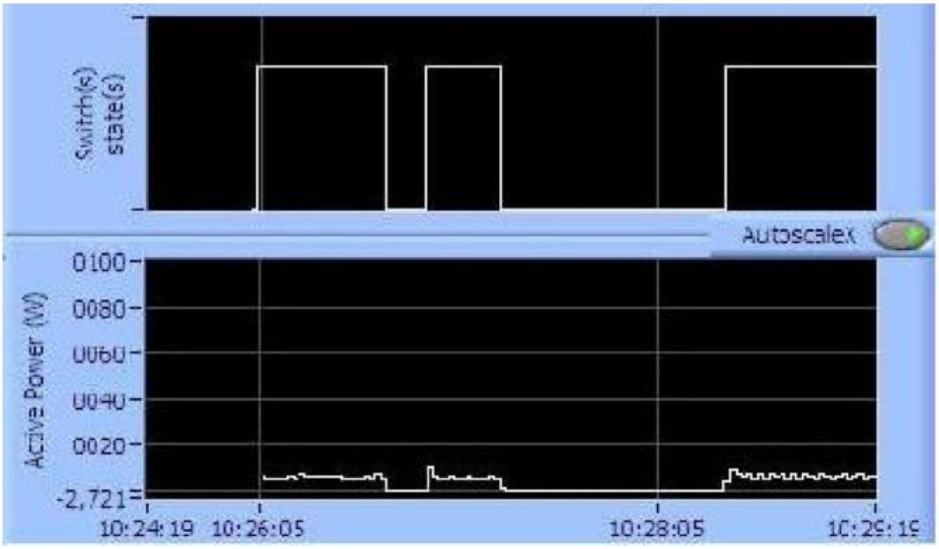


Figure 5.6: Histogramme de l'état du relais (partie haute) avec la consommation électrique correspondante (partie basse)

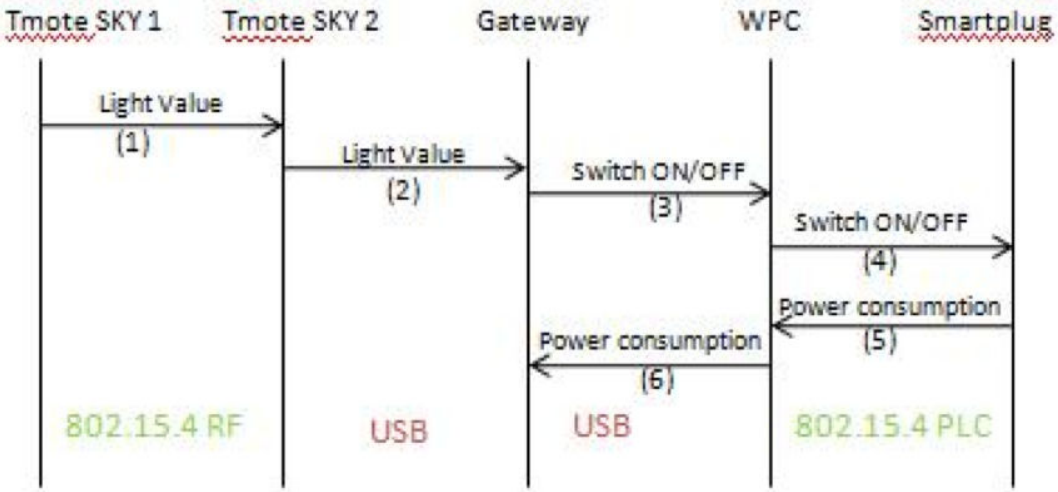


Figure 5.7: diagramme d'échanges de trames IEEE 802.15.4

5.6 Conclusion

Le standard IEEE 802.15.4 implémente de nombreuses primitives qui fournissent un service complet sur des réseaux très contraints tels que les LR-WPAN. Dans cette partie, nous avons exploré les similitudes entre les LR-WPAN et un réseau CPL à base de pulses, et montré la construction d'une couche d'adaptation du standard IEEE 802.15.4 sur notre solution CPL. Avec notre adaptation, une large partie de la pile 802.15.4 est implémentée, permettant de piloter le module WPC. Les primitives MAC et PHY implémentées dans le cadre de cette adaptation fournissent un service IEEE 802.15.4 sur le CPL, ce qui ouvre ce médium au monde IP, grâce au protocole 6LoWPAN. A la date de cette expérimentation (fin 2009), il s'agissait a notre connaissance de la première implantation du standard 802.15.4/IPv6 sur du CPL basse consommation. Depuis, le standard G3 a également utilisé le protocole 6LoWPAN sur CPL [33], ce qui nous conforte dans notre choix d'architecture. Notons toutefois que la technologie G3 présente des consommations au moins 2 ordres de grandeurs supérieurs à la technologie WPC à base de pulses.

Ce chapitre nous a permis de montrer comment interfacer le CPL au standard IEEE 802.15.4 qui est, avec ses multiples variations, le plus utilisé dans l'internet des objets. Ce premier étage d'adaptation et donc de mise en conformité du CPL avec ce standard lui permet d'être intégré comme un média à part entière dans la suite de protocoles dédiés à l'internet des objets. Dans le suite, nous nous reposerons sur cette adaptation pour décrire les bénéfices et les obstacles potentiels de ces nouveaux protocoles de niveaux supérieurs sur le CPL.

5.6.1 Niveau d'interopérabilité possible

A partir de ce travail, il est maintenant possible de fournir un standard simple de communication sur CPL de manière à ouvrir cette couche de communication à des interconnexions avec d'autres médias au niveau réseau. Un comité de l'alliance IPSO a été créé autour du thème de l'intéropérabilité afin de montrer l'intérêt de l'utilisation du standard IP pour faire communiquer des appareils provenant de différents constructeurs. Ce groupe considère l'intéropérabilité entre des protocoles du niveau physique au niveau applicatif, et accepte les appareils utilisant une technologie CPL , RF ou autre afin de prouver la convergence offerte par IP, et de permettre à tous ses membres de valider leurs implantations des standards.

En ajoutant notre plateforme CPL durant plusieurs évènements d'intéropérabilité organisés par l'alliance IPSO, nous avons apporté une perpective importante pour l'intéropérabilité dans les réseaux de capteurs au niveau réseau par l'utilisation du standard IPv6. Nous pensons que chaque média a ses propre forces et faiblesses, et qu'il est important de fournir une possibilité d'échange de données multi-médias qui permet au couches supérieures de tirer parti de chaque médium quand cela est nécessaire.

5.6.2 Architecture d'un réseau hétérogène

L'application utilisée dans cette expérience de 2009 était exécutée sur une machine standard de type PC. Pour mieux se rapprocher du monde des réseaux contraints, cette machine a ensuite été remplacée par des architectures plus contraintes telles que des mini PC industriels.

Au fur et à mesure de nos expérimentations, nous avons identifié 2 endroits où la convergence entre les médias pourrait être réalisée : Au niveau du routeur de bordure avec le réseau de capteurs, ou au niveau d'un noeud à l'intérieur du réseau de capteurs. Dans le premier cas, une machine peu contrainte (en terme de mémoire, de capacité de calcul et d'énergie) pourra agréger plusieurs interfaces réseau vers différentes technologies, par exemple, différentes technologies RF, ou une interface CPL. Les différents réseaux de capteurs connectés à cette machine seront

vu comme des sous réseaux, et la machine sera capable de récupérer les trames de ces sous réseaux afin éventuellement de les rediriger vers la bonne interface si le message ne lui est pas destiné. Ce premier type d'architecture présente la contrainte de devoir remonter jusqu'au routeur de bordure avant de pouvoir routeur le paquet vers un autre média. Dans le deuxième cas, un noeud du réseau de capteurs (donc présentant de fortes contraintes) pourrait disposer de plusieurs interfaces réseaux telles que RF ou CPL afin d'agir comme un pont ou un routeur entre plusieurs technologies. Dans le cas où il agit comme un pont, il se contente de diffuser les messages qu'il reçoit sur une interface vers ses autres interfaces réseaux. Dans le cas où il agit comme un routeur, il permet de relayer le paquet suivant la destination et doit donc gérer une table de routage au dessus de plusieurs technologies. Le chapitre 7 traite la question des réseaux hybrides et en particulier RF/CPL et présente des résultats sur ces propositions d'architectures.

5.6.3 Ouverture au protocole de routage RPL

A la date de cette expérience, le protocole RPL étant en cours de développement à l'IETF. Ce protocole ayant une approche du routage au niveau IP (route-over), il est agnostique du médium utilisé ce qui correspond à notre vision des réseaux de capteurs. De plus, ce protocole multi-sauts permet d'élargir la couverture de notre communication CPL et de permettre la sélection des chemins selon une certaine métrique de routage.

Chapter 6

Routage sur CPL

6.1 Le besoin du routage sur un média câblé

Comme nous nous sommes attachés à le démontrer au chapitre 3, le CPL n'est absolument pas comparable aux média câblés et dédiés avant tout au transport de l'information. En particulier, ce n'est pas un média à diffusion c'est à dire que l'information injectée en un point du réseau CPL n'est pas reçue par tous les autres points de ce réseau. Vu du niveau MAC, chaque noeud CPL possède donc un voisinage dynamique qui ne correspond qu'à une sous-partie du réseau électrique, et nous montrerons dans nos expériences qu'une topologie de type multi-sauts est nécessaire pour couvrir le réseau électrique complet d'un bâtiment. Pour ce faire, une solution de routage doit être mise en place afin de permettre le transport de l'information entre tous les points du réseau CPL.

Rappelons les contraintes auxquelles devront s'adapter le protocole de routage. Considérant le nombre important d'appareils électriques connectés au réseau, et la variété de leur comportements qui perturbe de manière aléatoire le canal, le mécanisme de routage sur les réseaux CPL doit s'adapter à des liens qui peuvent présenter des taux de pertes de paquet importants et une forte variabilité. De plus, les appareil connectés au réseau électrique génèrent des bruits et des atténuations qui peuvent créer des liens asymétriques, ajoutant de la complexité au routage. Les technologies CPL qui seront utilisées fournissent des débits très faibles (quelques kbps), tout en offrant une forte densités de noeuds, notamment pour des déploiements dans des environnements urbains, compliquant de manière notable le passage à l'échelle de la solution de routage à employer.

Les protocoles de routage élaborés jusqu'ici ne prenaient pas en compte totalement ces nouvelles contraintes, et ne savaient pas répondre efficacement à ces nouveaux types de réseau appelés "Low Power and Lossy Networks " (LLN) [101]. L'Internet Engineering Task Force (IETF) a donc reconnu le besoin de créer un groupe de travail appelé ROLL (Routing Over Low power and Lossy networks) en 2008 afin de définir des protocoles permettant de relever ce défi. Comme tout groupe de travail IETF, le groupe a défini un "charter", qui est en quelque sorte la feuille de route des travaux qui seront menés par le groupe. Cette feuille de route stipule notamment [38] :

Les réseaux LLNs sont formés de plusieurs appareils embarqués avec des limitations d'énergie, de mémoire et de capacité de calcul. Ils sont interconnectés par une variété de liens tels que IEEE 802.15.4, Bluetooth, Wifi basse puissance, ou encore des média câblés tels que le courant porteur en ligne (CPL). Les LLNs suivent la transition vers une solution IP de bout en bout, pour éviter le problème de réseaux non interopérables, interconnectés par des passerelles et des proxys qui font des translations de protocoles.

Le groupe de travail considère donc un protocole de routage pour réseaux contraints mais distribués sur plusieurs médias différent tel que RF ou CPL. Cela correspond tout à fait à la vision hétérogène que nous considérons ici. Le protocole de routage produit par le groupe ROLL est le protocole RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks [38]. Il est aujourd'hui la solution de routage par défaut de la plupart des solutions utilisant la couche d'adaptation 6LoWPAN, notamment l'alliance ZigBee [102] dans le cadre de sa solution ZigBeeIP [103]. En tant que protocole de routage de niveau réseau, RPL est indépendant du média sur lequel il est utilisé, et il peut donc être une base de l'interopérabilité entre des noeuds utilisant des média différents, tels que le CPL et la RF. L'intéropérabilité est simplement accomplie par des messages de routage de type ICMPv6 échangés entre ces noeuds, comme nous le montrerons dans les expérimentations suivantes. Les récents travaux menés dans ROLL, et la convergence vers le standard IPv6 ont permis la création de nouveaux standards CPL interopérables avec des services sans fil, permettant de concrétiser notre idée de réseaux hétérogènes.

Un protocole de routage adapté au CPL devra prendre en considération ces contraintes

particulières, et en particulier la non fiabilité du média, les faibles débits, les densités de noeuds qui peuvent être élevées et le passage à grande échelle.

Comme précisé dans le chapitre 3, il convient de distinguer les différents types de CPL pour comprendre leurs contraintes et leur besoins, qui impactent directement le protocole de routage à mettre en oeuvre au dessus de la technologie CPL considérée. Nous avons montré que l'on peut diviser ces technologies CPL en 2 grandes familles : les technologies haut débit (plusieurs Mbps) et hautes fréquences (entre 2 et 30 MHz) de type Homeplug, et les technologies bas débit (quelques kbps) et basse fréquences (Entre 10 et 500 kHz) de type G3-PLC ou WPC.

Le premier type de CPL est plutôt mature et commence à être assez largement déployé. Il est principalement utilisé pour des applications multimédia ou réseaux dans les maisons. L'architecture typique sur ces technologies se limite à un lien bidirectionnel entre une box internet et un boîtier multimédia, ou la mise en réseau d'ordinateurs via des adaptateurs CPL/Ethernet. Dans le premier cas, un lien direct est établi entre les deux points du réseau par un appairage, et un protocole de routage n'est pas nécessaire. Dans le second cas, les adaptateurs CPL se présentent simplement comme des interfaces réseaux pour les machines connectées et les machines utilisent les mêmes protocoles de routage que pour d'autres interfaces réseaux de type Ethernet.

Pour le deuxième type de CPL en revanche, les applications et les scénarios sont différents. En premier lieu, les déploiements de ce type dépassent largement le cadre d'une maison individuelle, et s'étendent aux environnements industriels, aux bâtiments tertiaires, et aux environnements extérieurs pour des applications de type éclairage urbain, AMR (Automatic Meter Reading), ou smartgrid. Ces déploiements impliquent donc des distances de communications plus élevées et un environnements potentiellement plus difficile du point de vue de la propagation du signal, pouvant conduire à des taux d'erreurs importants sur les liens. Ces réseaux sont également de taille supérieure, tant par la taille que par le nombre de noeud. Le paradigme est donc complètement différent et une autre approche du routage doit être envisagée sur ces technologies.

Ce changement de paradigme est finalement très similaire à celui observé dans les réseaux RF, quand on compare les solutions haut débit de type Wifi, avec des modules RF bas débit et faible puissance du type IEEE 802.15.4. Ainsi, les technologies CPL bas débit et RF faible puissance peuvent être regroupées sous le terme générique LLN définit dans le charter du groupe ROLL.

Dans cette thèse, nous nous concentrons sur ces technologies CPL bas débit et sur les LLNs au sens large. La solution idéale pour nous est donc un protocole de routage qui couvre les spécificités des LLNs sans distinction de la nature du média utilisé.

6.2 Critères du routage sur CPL

Les deux scénarios que nous considérons sur le CPL sont les applications de type "Smart Energy" tels que des relevés de consommations électriques périodiques, ou home automation. Dans ces applications, chaque noeud envoie périodiquement une trame à un puits de collecte qui permettra de remonter des mesures énergétiques aux occupants, ou au fournisseur d'énergie par le réseau Internet. Le type de trafic dans ces réseaux est donc majoritairement asymétrique, avec une majorité de messages qui circulent périodiquement des noeuds vers la racine du réseau. Le protocole de routage à utiliser devra donc optimiser ce type de trafic.

Les messages descendants sont moins fréquents dans ce type de réseau, mais sont tout aussi importants. Ils sont typiquement envoyés pour configurer les noeuds du réseau (information sur l'abonnement électrique, les tarifs, la mise en place ou l'activation de services), voire pour mettre à jour les compteurs électriques. Certains cas d'usages particuliers tels que le Distribution Automation (DA), requièrent de fortes contraintes de latences sur des actions de délestage ou

de mise en sécurité, nécessitant que le protocole de routage maintienne continuellement une route satisfaisant ces contraintes de latences. Dans le cadre d'un scénario d'instrumentation des bâtiments, des messages seront également envoyés aux noeuds pour les configurer ou les mettre à jour. Ces messages peuvent être fréquemment envoyés vers certains appareils tels que des actionneurs, qui devront pouvoir être commandés à travers le réseaux avec parfois des contraintes de latence (pour la commandes de volets roulants, de gestion de l'éclairage ou d'alarmes). Le protocole de routage devra donc permettre de véhiculer ces messages descendants, en permettant d'ajouter des contraintes de latence sur les routes vers certains points particuliers du réseau. De plus, pour répondre au besoin de reconfiguration ou de mise à jour des noeuds, le protocole de routage devra permettre de diffuser une information descendante vers tous les noeuds du réseau.

Dans le cas particulier d'un scénario d'instrumentation de bâtiment, des liaisons point à point entre des éléments doivent pouvoir être établis, typiquement entre une télécommande et un actionneur. Si la route entre ces deux éléments doit repasser par la racine du réseau ou un ancêtre commun, l'utilisation de cette route sous optimale pourrait ne pas correspondre aux contraintes de latences de ce type de scénario. Ce type de chemin doit pouvoir être établi par le protocole de routage.

Etant donné le nombre très importants d'objets qui sont amenés à devenir "intelligents" [104] (c'est à dire communicants), le protocole de routage doit pouvoir passer à l'échelle facilement, c'est à dire qu'il doit pouvoir maîtriser son trafic de contrôle en fonction de l'augmentation de la taille du réseau. Typiquement, il faudrait que le volume du trafic de contrôle augmente de manière logarithmique avec la taille du réseau [105].

Suivant le cas d'usage, ces réseaux pourront être mono technologie (uniquement RF, uniquement CPL ou une autre technologie), ou alors multi technologies avec plusieurs sous réseaux connectés entre eux par des liaisons hauts débit, voire des passerelles entre les différentes technologies, comme nous l'envisagerons dans la suite. Le protocole de routage devra donc s'adapter à différentes technologies avec la possibilité de passer d'un média à l'autre de manière transparente.

Idéalement, ces réseaux seront connectés avec l'infrastructure internet existante, afin de les rendre accessibles à distance à moindre coût. Le protocole de routage devra donc permettre une interconnexion de ces nouveaux réseaux avec les infrastructures existantes de manière simple.

Les liens CPL présentent une forte dynamique, notamment vis à vis de la qualité des liens. La protocole de routage doit permettre de s'affranchir de cette contrainte en permettant de maintenir des routes fiables sur ces liens dynamiques. De plus, les changements de topologie résultant de ces variations doivent avoir un impact limité sur le réseau global.

Les technologies CPL et RF que nous considérons ont des débits variables et faibles, de l'ordre de quelques kbps. Le protocole de routage doit donc limiter l'envoi de paquet de contrôle ainsi que leur taille.

Dans le cas particulier du CPL, le média est partagé entre plusieurs noeuds connectés sur un même câble électrique. Cela correspond donc à un bus, ou l'accès et le partage de la bande passante est sensible, d'autant plus que le débit sur ce bus est faible. Le volume de messages nécessaire au maintien de la topologie doit donc être contenu.

Les noeuds CPL ne sont pas tous des machines initialement conçues pour des applications réseau, ce qui veut dire que les ressources en mémoire et en capacité de calcul sont limitées. Cela permet également de limiter le coûts des architectures qui intègrent la communication CPL. Le protocole de routage doit donc pouvoir être implanté sur des architectures contraintes à seulement quelques kB de RAM et quelques dizaines de kB de Flash.

6.3 Etat de l'art des protocoles de routages adaptés au CPL

Avant que les efforts sur le protocole RPL soient engagés, quelques solutions ont été expérimentées sur des réseaux CPL de grande taille, notamment pour relever les index des compteurs électriques. Pour former la topologie permettant à un concentrateur de récupérer les données de tous les compteurs, une solution de routage géographique a été étudiée [106]. En effet, dans ce type d'application, la topologie électrique est relativement simple, fixe, et hiérarchisée. Chaque point est associé à une localisation qui est connue a priori. Les compteurs d'une rue sont branchés sur une même ligne électrique, elle même raccordée à un niveau de distribution supérieur par un transformateur électrique. Le réseau peut ainsi être découpé en plusieurs grappes électriques reliées entre elles au niveau de distribution supérieur via un transformateur. Les compteurs communicants vont donc chercher à s'associer directement au point CPL situé dans le transformateur de niveau supérieur, ou à un répéteur ou un routeur dans la direction géographique de cette destination. Les positions géographiques, contrairement au cas des réseaux CPL indoor, peuvent avoir du sens dans ces déploiements extérieurs, car un routeur CPL géographiquement plus proche de la destination sera plus à même d'atteindre la destination [106].

Cependant, ce type de routage est basé sur des informations fixes qui sont les positions. Hors nous avons vu dans le chapitre 3 que les liaisons CPL bas débit, notamment celles qui rentrent dans la définition du LLN ont des caractéristiques dynamiques et le routage doit pouvoir s'adapter à ces variations, notamment vis à vis de la dynamique des liens entre les noeuds, et ce même si le réseau est physiquement stable. La bonne approche est donc d'utiliser un protocole de routage qui gère les métriques de liens, afin de s'adapter à ces changements.

Les solutions CPL "historiques" de type X10 [76], n'utilisaient pas de protocoles de routage. Les messages étaient simplement envoyés avec l'adresse de destination, en supposant que les messages seraient reçus par tous les noeuds du réseau. La possibilité d'ajouter des répéteur permettait détendre la couverture du réseau, ou de palier à des limites de transmission locales, mais au prix d'une utilisation plus importante de la bande passante. Utiliser des répéteurs est un palliatif aux limitations du niveau physique et ne constitue pas une solution efficace dans des réseaux de grande taille car ils peuvent provoquer une "tempête de message" dans tout le réseau à chaque transmission. Le papier [107] propose toutefois un système de routage au dessus de X10, mais très basique, car il se contente de rediffuser les paquets reçus, sans création d'une table de routage.

Les travaux présentés dans [108] étudient également le routage sur CPL en comparant de manière analytique une approche par inondation et un approche de routage par la source. Leur résultats montrent que les meilleures performances sont obtenues avec les protocole de routage par la source. Cependant, les protocoles considérés ne se conforment à aucun standard et considèrent un modèle maître esclave. Le papier [109] considère également un mode maître esclave sur CPL et propriétaire, mais possède une approche IP, ce qui le rapproche un peu de notre solution. Toutefois, tous ces travaux ne présentent pas de retour d'expérience et ne conduisent pas d'expérimentations permettant de confronter ces protocoles de routage aux difficultés réelles du CPL.

Plusieurs protocoles de routage ont été considérés dans les débuts des travaux dans ROLL, afin de voir si le design d'un nouveau protocole était nécessaire. Conscient du fait qu'une multitude de protocoles de routage ont été présentés dans les papiers de recherche ou déployés dans des réseaux propriétaires, les protocoles considérés dans cette étude [105] se limitent aux protocoles de routage standardisés ou en passe de l'être par l'IETF. Ce draft définit des métriques permettant de juger de l'applicabilité de ces protocoles aux LLNs. Ces métriques sont : L'espace mémoire nécessaire au stockage des informations de routage, le nombre de transmissions nécessaires à la réparation d'un lien qui devient inutilisable, le coût du trafic de contrôle par rapport

au trafic de données, et l'habilité à former une topologie de routage à partir de métriques de liens et de noeuds. Ce draft dresse un tableau de satisfaction de ces métriques pour les protocoles OSPF/IS-IS, OLSRv2, TBRPF, RIP, AODV, DYMO et DSR. Ce tableau conclut qu'aucun de ces protocoles ne satisfait pleinement les critères sélectionnés. Le protocole qui s'approche le plus de la complétion des critères est le protocole DYMO, qui passe 2 critères sur 5 et est considéré comme pas assez spécifié pour satisfaire les 3 autres. Il fallait donc spécifier un protocole qui puisse clairement satisfaire les contraintes listées dans ce document.

6.4 Description et applicabilité du protocole RPL au CPL

La figure 6.1 décrit une exemple de topologie créé par RPL. Les paragraphes suivants décrivent le fonctionnement du protocole et son adaptabilité aux spécificités du média CPL.

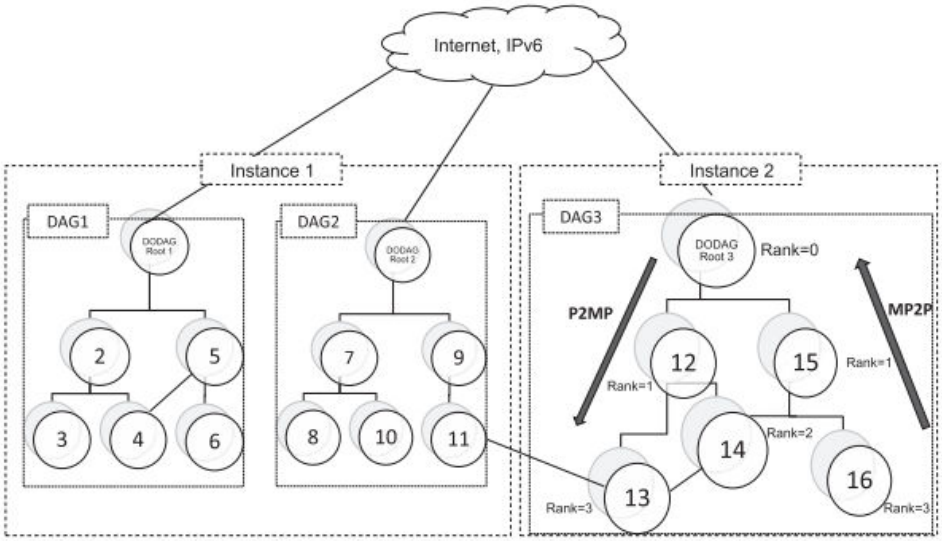


Figure 6.1: Exemple de réseau RPL constitué de 3 DODAGs et de 2 instances [110]

Le trafic multi-point à point (MP2P) peut être facilement convoyé par une structure en arbre. En effet, RPL construit une topologie de type arbre appelée Destination Oriented Directed Acyclic Graphs (DODAG), exigeant que chaque noeud du réseau choisisse un parent qui pourra relayer ses informations jusqu'à la racine. L'idée est reprise du Collection Tree Protocol (CTP) [111] qui permet de construire avec un trafic de contrôle minimum un arbre de collecte de donnée. Ce mécanisme s'applique bien au réseaux CPL extérieurs, où la topologie hiérarchisée du réseau électrique permet à chaque compteur électrique de trouver naturellement un parent de niveau supérieur pour collecter les données. Pour les applications intérieures, nous verrons lors de nos expérimentations que les liens CPL (avec l'utilisation de la technologie WPC) peuvent couvrir une zone étendue d'un bâtiment permettant généralement de joindre la racine du réseau en très peu de sauts. RPL répond donc au premier besoin de ce type d'application, en établissant une structure de collecte efficace.

Le trafic point à multipoint (P2MP) est géré dans RPL par des messages particuliers (Destination Advertisement Object, DAO) qui sont émis périodiquement le long de l'arbre formé par RPL. Ces messages viennent renseigner des tables de routage distribuées dans la topologie (storing mode) ou une table de routage principale concentrée dans la racine du réseau (non-storing mode). Ces deux modes ont chacuns leurs avantages et leurs inconvénients, et doivent

être choisis en fonction des contraintes de l'application. Le storing mode crée des routes plus optimisées, au prix d'un besoin en mémoire qui augmente avec la taille du réseau, tandis que le non-storing mode n'impose pas de contraintes de mémoire sur les noeuds, mais crée des routes qui peuvent être plus longues, car tous les messages devront transiter par la racine du réseau. Même si un fonctionnement hybride entre ces 2 modes est actuellement discuté dans ROLL, le mode de gestion des routes descendantes doit être identique pour tous les noeuds du DAG, afin être conforme à la RFC 6550 [38] définissant le protocole RPL. Dans le cas de nos expérimentation CPL, nous avons utilisé le storing mode de RPL, car les réseaux que nous avons déployés étaient de taille suffisamment petite (100 noeuds maximum) pour ne pas dépasser la mémoire disponible dans les noeuds. De plus, nous verrons que les latences sur CPL peuvent être importantes par rapport à des solutions RF, et l'utilisation de routes sous-optimales que pourrait créer le mode non storing pourrait causer des temps de réponse trop importantes pour des scénarios de contrôle commande, et augmenter le risque de collision et de pertes de paquets en créant une concentration de messages autour de la racine du réseau. RPL permet donc de maintenir des routes vers l'ensemble des noeuds du réseau, en remontant jusqu'à la racine ou par un ancêtre commun. Cela répond à notre besoin pour la configuration des noeuds CPL ou le contrôle commande de certains actionneurs distribués dans le réseau. Il est important de noter que ces routes peuvent être sous optimales car elles reposent sur la structure en arbre du DODAG. De plus, comme RPL est un protocole proactif, le maintien de ces routes descendantes est imposé vers tous les noeuds du réseau, ce qui a l'avantage de maintenir des routes de manière continue, mais d'induire un trafic de contrôle permanent, même si aucun trafic n'est véhiculé dans le réseau. Ce surcoût doit être mis en regard d'un mécanisme réactif qui pourrait créer des routes à la demande, créant un volume de message important (causé par une inondation du réseau par exemple) mais localisé dans le temps et dépendant du trafic. Certaines solutions dérivées de AODV [112] telles que DYMO [113] ou LOADng [114] utilisent ce principe pour des réseaux de type MANET. Dans le cadre de RPL, l'envoi des messages de contrôle Destination Advertisement Objects (DAO) permettant de maintenir ces routes descendantes est gouverné par l'incrémentation du paramètre DAO Trigger Sequence Number (DTSN) qui est propagé dans les DIO.

Pour permettre d'optimiser la création de routes point à point dans un DODAG, un mécanisme a été ajouté à RPL afin de créer ce type de route à la demande, sans tenir compte de la topologie existante créée par RPL. Ce mécanisme est défini dans un draft séparé [60], et reprend le mécanisme d'inondation de AODV pour créer des routes à la demande, pendant une durée de temps limitée. Techniquement, un nouveau mode d'opération de RPL est appelé mode P2P, qui vient s'ajouter aux modes storing et non-storing existants. Dans ce mode, un DODAG temporaire est créé, dont la racine est la source de la route qui doit être découverte et crée une route bidirectionnelle vers une destination. Cette route est découverte par la propagation dans le réseaux de messages DIO contenant une option "route discovery" ainsi que la destination vers laquelle la route doit être découverte. Une fois la destination atteinte, un nouveau type de message "Discovery Reply Object" (DRO) est remonté jusqu'à la source selon le chemin inverse de celui qui a permis d'atteindre la destination. Reprenant l'idée de storing et de non storing mode de RPL, cette route peut être distribuée dans les noeuds situés sur le chemin ou concentrée à la racine de ce DODAG temporaire, afin de l'utiliser par la méthode du source routing. Ce mécanisme permet donc, dans un scénario de type home automation, de créer les routes point à point dont nous pourrions avoir besoin en CPL pour attacher un actionneur à un capteur par exemple.

Pour s'adapter aux variations de la qualité des liens sur lesquels RPL devra opérer, différentes métriques sont définies dans le RFC 6551 [58]. Cette RFC définit plusieurs métriques de lien et de noeud, dont la plus utilisée est ETX [115], permettant d'optimiser la création des routes

selon un critère de fiabilité. Cette métrique est mise à jour tout au long de la durée de vie du réseau et permet si nécessaire de réinitier une découverte de route ou de supprimer les routes utilisant des liens qui ne sont pas considérés assez fiables au sens de la métrique.

Enfin, pour s'adapter aux faibles débits qui peuvent apparaître sur les technologies LLNs, RPL utilise des messages de taille fixe et limitée (compatibles avec la limite de taille de 127 octets du standard IEEE 802.15.4) en plus de l'utilisation du mécanisme trickle qui permet de réduire le volume de messages de contrôle.

Chapter 7

Expérimentations

7.1 Implémentation et paramétrage de RPL adapté au CPL

Notre pile protocolaire repose sur l'implémentation open source de Contiki. Ainsi, nous partons de l'implémentation ContikiRPL [116] pour construire notre solution de routage sur CPL. Cette implémentation utilise le mode storing de RPL et est principalement utilisée sur des noeuds RF tels que la plateforme SKY (MSP430f1611 - 10k RAM / 48k Flash + CC2420 [30]).

Les paramètres de notre implémentation RPL sur CPL sont les suivants :

- Les DIO sont utilisés pour propager des informations relatives à RPL et leurs envois sont gouvernés par un temporisateur "trickle"[117, 57]: Ce temporisateur a une valeur initiale de 4 secondes (temporisateur sur 12 bits et $2^{12}ms = 4096ms$) et double 8 fois jusqu'à une valeur maximum qui est donc d'environ 17 minutes ($4096 * (2^8) = 1048576ms$ = 17,5 minutes). La valeur minimum de 4 096ms a été choisie compte tenu des temps de latence typiquement observés sur notre solution CPL, de 0,5 à 1 seconde par saut. Cette valeur permet ainsi de limiter les collisions lors de la phase de découverte du réseau. Conformément à [57], le DIO est envoyé à un temps aléatoire compris entre la valeur maximum et la moitié de l'intervalle de temps actuellement sélectionné par l'algorithme trickle. Une fois le message envoyé, l'intervalle de temps double et l'algorithme reboucle. Ces messages étant diffusés, ils ne sont pas acquittés, et donc émis une seule fois quelque soit le nombre de voisins qui reçoivent correctement ce message. Quand le réseau est stable, le temporisateur trickle est à sa valeur maximale et le volume de messages représenté par ces DIO est faible.

- Les DAO sont envoyés lors de l'incrémentation du DTSN. Cette valeur étant contenue dans les DIO, les DAO ne seront envoyés qu'après la réception d'un DIO dont le champ DTSN aura été incrémenté. Dans notre implémentation, le DTSN est incrémenté toutes les 4 minutes, afin de garantir un rafraîchissement des routes fréquents. Ainsi, les DAO seront envoyés au minimum toutes les 4 minutes et au maximum toutes les 17,5 minutes, cela correspondant au temporisateur trickle maximal utilisé par les DIO. Notons que nous utilisons les messages DAO_ACK, envoyés après chaque DAO pour confirmer la bonne réception des DAO, afin de fiabiliser la construction des routes descendantes. Dans le cas d'un changement de parent préféré, le noeud doit émettre un nouveau DAO afin de mettre à jour les tables de routage. Les routes vers le sous-arbre sont ensuite rafraîchies lors de l'émission des prochains DAO.

- Les DIS sont envoyés par les nœud RPL qui souhaitent s'associer à un DAG RPL. Ce message n'est normalement envoyé qu'une fois lors de la constitution du réseau, afin de récupérer les identifiants et les paramètres du DAG. Un DIS peut être émis si le noeud perd la connexion avec tous ses parents potentiels.

RPL suppose que les voisins soient dans un état "REACHABLE" au sens du protocole de découverte des voisins [55] pour être utilisés. Cet état est décrit dans la section 7.3.2 de [55], et définit un mécanisme externe à RPL. Notons que ce protocole comprend désormais une optimisation spécifique aux LLNs dans la RFC 6775 [32]. La section 3.1 de ce document précise les extensions apportées à la spécification originale de la RFC4861 [55]. Pour assurer que les voisins soient joignables et utilisables par RPL, des échanges périodiques des messages de type "Neighbor Sollicitation" (NS) et "Neighbor Advertisement" (NA) sont nécessaires.

- Les échanges NS/NA sont utilisés de manière régulière pour mettre à jour les métriques, maintenir les routes à jour et détecter les pertes de liens. Un échange NS/NA est effectué toutes les minutes vers le meilleur parent afin de garantir une vérification périodique de l'état des liens,

et toutes les 2 minutes vers les autres parents possibles afin de limiter la surcharge de trafic engendrée par ces messages tout en garantissant une réparation rapide en cas de pertes des liens.

7.2 Déploiement au laboratoire CITI

Cette section présente un retour d'expérience sur un déploiement de noeuds CPL utilisant la technologie WPC dans un bâtiment de type tertiaire. Les noeuds ont été déployés au laboratoire CITI, qui est composé de 26 salles réparties sur 2 étages. Le laboratoire est une partie récente (inauguré en 2009) d'un plus grand bâtiment et dispose de sa propre installation électrique triphasée. Chaque salle dispose d'une douzaine de prises électriques. Les tests ont été réalisés durant les heures de travail, sans recommandation particulière sur l'utilisation des appareils électriques.

Nous avons utilisé un routeur de bordure et 6 prises communicantes CPL appelée "Smart-Plugs". Le routeur de bordure est resté connecté à la même prise électrique durant toute la durée des tests. Les 6 prises intelligentes ont été branchées aléatoirement sur des prises libres d'une même pièce. Aucun appareil électrique n'a été branché derrière ces prises intelligentes. L'ensemble des prises intelligentes est déplacé de salles en salle jusqu'à avoir testé toutes les pièces du laboratoire sans que le routeur de bordure ne soit déplacé. Les prises intelligentes sont directement connectées aux prises électriques, sans utilisation de multiprises.

Pour mesurer les performances du réseau CPL, nous avons choisi de soumettre le réseau à un trafic important via l'envoi de messages PING périodiques. En effet, l'utilisation d'un trafic faible n'aurait pas permis d'approcher les limites du système. Nous avons utilisé l'outil de diagnostic WPC, qui utilise des messages ICMPv6. Nous avons fixé la taille du payload des messages PING à 10 Octets, créant des paquets d'une taille de 45 octets au niveau Physique. Cela correspond à la taille moyenne au niveau physique des trames UDP générés par notre couche applicative Zigbee Cluster Library (ZCL). Ce protocole applicatif a été choisi car sa spécification est librement accessible et comprend d'office une implémentation des différents types capteurs que nous utilisons.

Les expériences et les simulations réalisées précédemments nous prédisent qu'un échange de messages ICMPv6 aura un temps d'aller/retour moyen d'environ 600 ms (dans des conditions favorables). Une approximation réaliste (en considérant les perturbations externes) est que ce temps d'aller/retour devrait prendre environ une seconde en moyenne: En considérant les retransmissions qui peuvent survenir à causes de collisions, du report d'émission dû à l'occupation du canal, et de la surcharge du trafic de contrôle composé des messages de contrôle de RPL et des NS/NA. Nous avons choisit un intervalle de 2 secondes entre chaque message ping émis afin d'éviter les collisions.

RPL créant des topologies multi sauts, les noeuds intermédiaires relaient des paquets. De ce fait, le temps d'aller/retour est proportionnel au nombre de relais. De plus, un plus grand nombre de sauts induit un plus grand risque de pertes. Pour s'adapter au temps de routage des paquets, l'intervalle entre chaque ping est multiplié par le nombre maximum de routeurs présents sur le chemin. Par exemple, si le DAG créé a une hauteur de 3 (i.e. le noeud le plus loin est à 2 sauts, et le chemin pour l'atteindre implique 2 routeurs), l'intervalle entre chaque ping est fixé à 2x3 = 6 s. L'intervalle est fixe entre chaque message ping, indifféremment de la distance pour atteindre le noeud que l'on veut joindre.

7.2.1 Topologie

La topologie électrique du bâtiment n'a pas permis de créer un lien CPL entre les 2 étages du bâtiment, car chacun des étage était alimenté par un circuit électrique séparé. Ainsi, aucune connexion électrique n'existait entre les 2 étages, rendant impossible les communications CPL. Nous aurions pu augmenter nos chances de créer ce lien avec l'installation d'un point CPL au niveau du tableau électrique. En effet, le tableau électrique est l'endroit où tous les câbles électriques convergent, créant des possibilités de couplage entre les câbles et donc de transmission du signal CPL. Cependant, nous n'avions pas accès à l'armoire électrique pour ces tests.

Nous avons conduits 2 sessions de tests, une pour chaque étage. Le routeur de bordure avait une position fixe pour chaque session de test (i.e. une localisation fixe par étage). La figure 7.1 montre l'agencement des salles du bâtiment.

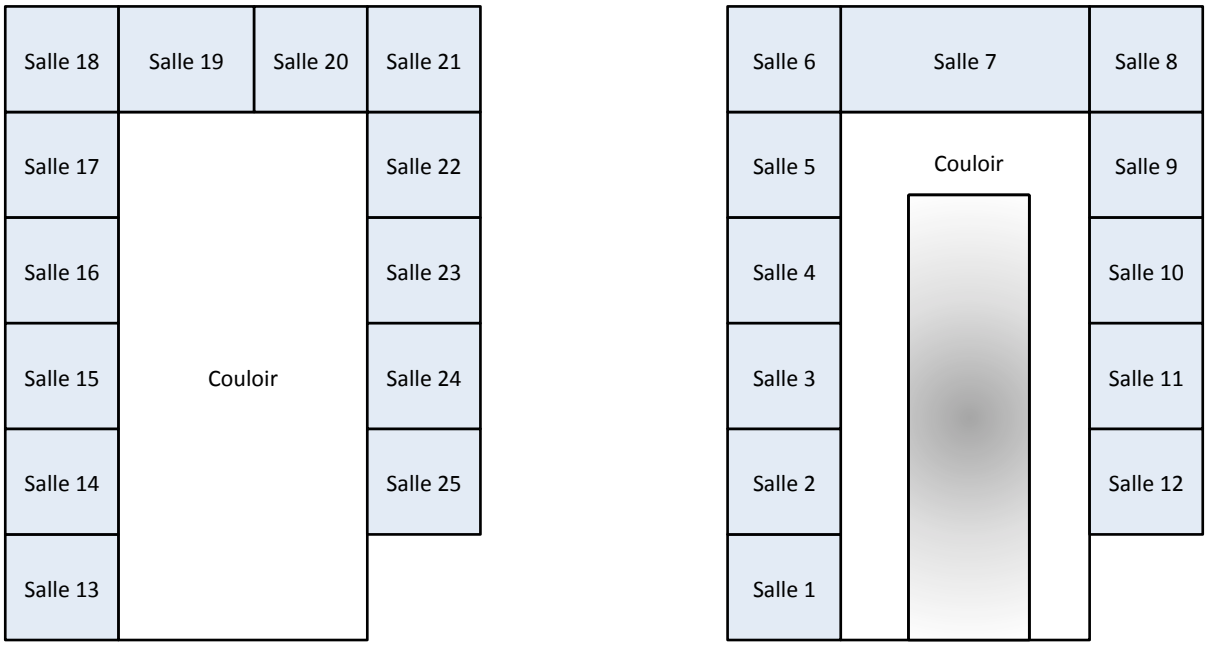


Figure 7.1: Disposition des salles du rez de chaussée et du 1er étage dans le bâtiment du CITI

Pour chaque session de tests, l'ensemble des smartplugs est déplacé dans une nouvelle salle. Les topologies créées au rez de chaussée et au premier étage sont représentées respectivement sur les figures 7.2 et 7.3. La figure 7.2 représente la topologie indépendamment de la cartographie du bâtiment pour simplifier la lecture.

Comme nous pouvons le voir sur les figures 7.2 et 7.3, au moins une des prises électriques de chaque pièce a été jointe directement depuis le routeur de bordure. Les autres prises électriques ont été jointes par 1 voire 2 sauts maximum. Les topologies du 1er étage montrent que 25 prises ont été jointes directement depuis la position du router de bordure, 26 via un seul routeur, et 9 via un 2ème relayage. Pour le rez de chaussée, 5 prises ont été jointes directement depuis le router de bordure, 9 via 1 routeur, et 4 via un 2ème relayage. Ces résultats montrent donc que la couverture de ce bâtiment avec la technologie WPC n'aurait pas pu être assurée sans solution de routage, et qu'une profondeur de 2 routeurs nous a permis de couvrir toutes les pièces accessibles de ce bâtiment étage par étage.

Par ailleurs, nous pensons que les chemins de câbles installés dans le bâtiment ont facilité les possibilités de couplage et augmenté la connectivité du réseau CPL, grâce à la proximité des câbles dans ces éléments.

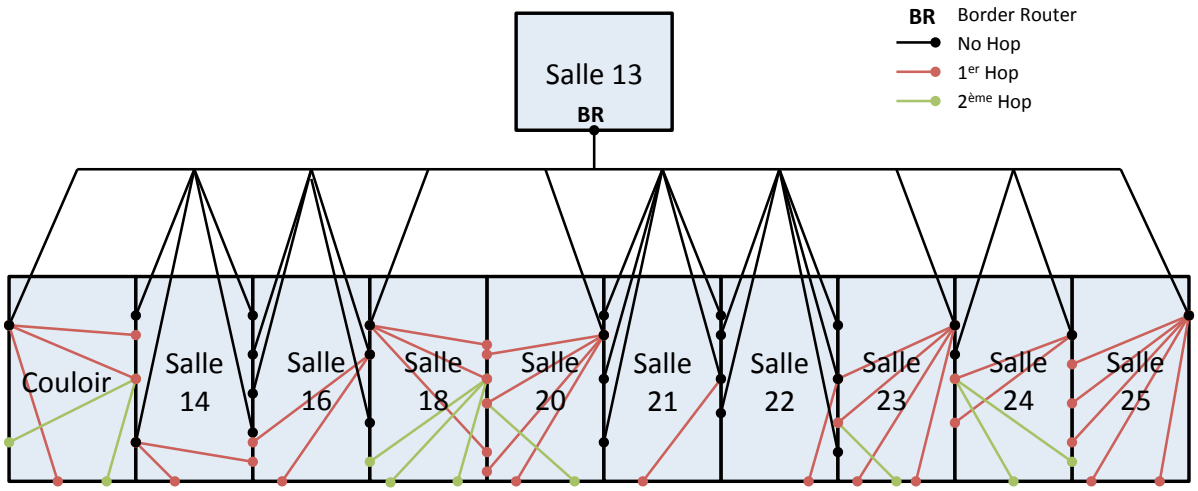


Figure 7.2: Superposition de tous les DAG créés au Rez de Chaussée (vue logique)

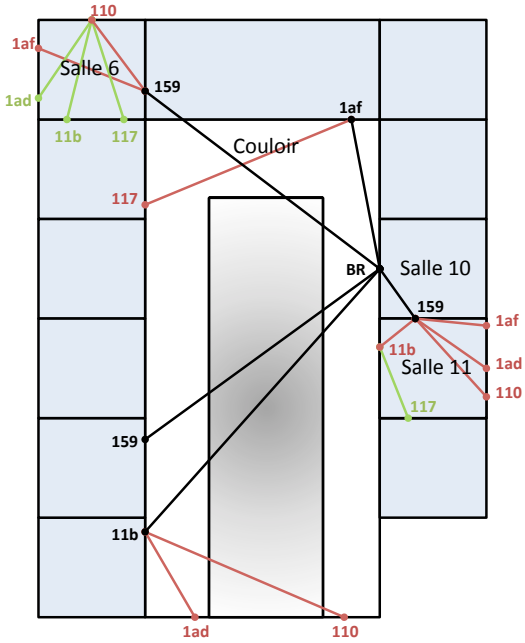


Figure 7.3: Superposition de tous les DAG créés au premier étage (vue logique et géographique)

Un résultat important mis en lumière par ces tests est que toutes les prises d'un même étage ont été atteintes à travers des chemins de 2 sauts maximum. Le relayage impactant de manière significative les performances réseau, un nombre limité de sauts permettra de conserver des performances acceptable vis à vis de l'application. Cependant, pour des réseaux comprenant un grand nombre de noeuds, une topologie "plate" peut induire des tables de routage volumineuses. Ceci peut être problématique pour des noeuds dont les ressources sont contraintes. Cela est particulièrement vrai pour les noeuds qui sont proches du routeur de bordure dans l'arbre de routage, et pour le routeur de bordure lui même. Une forte connectivité de noeuds peut également mener à des congestions sur ces noeuds particuliers. La figure 7.4 montre un exemple de topologie observée durant l'expérience et illustrant la possibilité de congestion qui peut résulter d'une telle topologie.

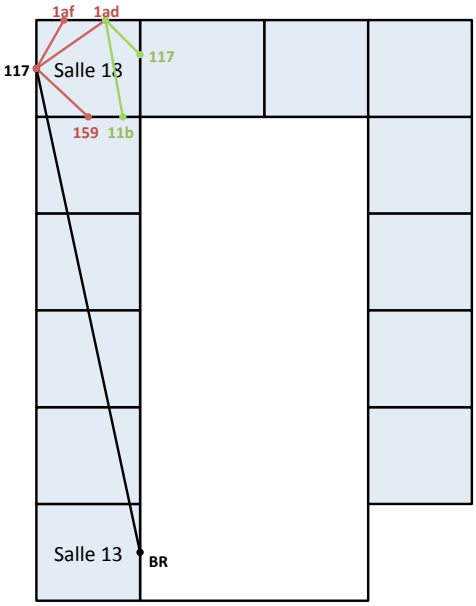


Figure 7.4: Topologie présentant un risque de congestion

Cette topologie a le plus grand nombre moyen de sauts pour atteindre l'ensemble des noeuds. Ici, toutes les prises relayent leurs messages vers un seul noeud, ce qui peut mener à une congestion et rende les performances globales de cette topologie très dépendantes du lien entre le noeud 117 et le routeur de bordure.

Durant cette expérimentation, nous avons constaté qu'il n'y avait pas de relation forte entre la localisation physique des noeuds et les liens CPL créés. Alors que pour les réseaux sans fils, la propagation peut être estimée selon une atténuation dépendant de la distance entre les noeuds, cette approximation ne peut pas être faite sur le CPL. En effet, les réseaux CPL utilisent des câbles qui n'ont pas forcément de rapport avec la localisation. Concrètement, nous avons observé qu'il était parfois impossible d'établir une communication CPL entre 2 points d'une même pièce situés sur des murs opposés, car mêmes si ces points étaient physiquement proches, il y avait plusieurs dizaines de mètres de câbles pour les relier via le tableau électrique. La figure 7.5 est un bon exemple de ce type de situation.

Sur la figure 7.5, sur les 6 noeuds déployés par salle, 5 noeuds de la salle 21 peuvent être joints directement par le routeur de bordure, alors qu'il n'y en a que 4 dans la salle 14. Cependant, la salle 21 est géographiquement plus éloignée de la salle 14. On ne peut donc pas dire qu'un noeud CPL appartenant à une salle voisine de l'émetteur a plus de chance d'être atteinte

directement via un lien CPL.

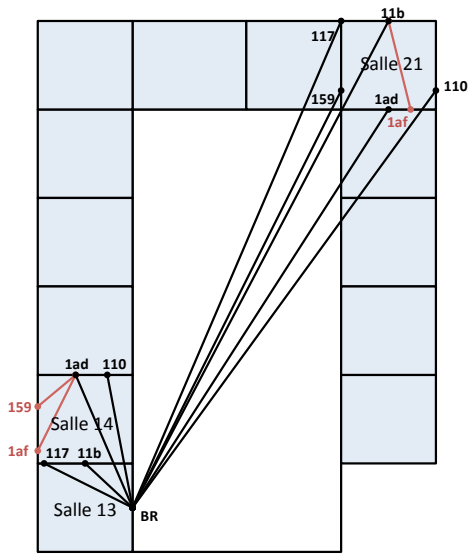


Figure 7.5: Il n'existe pas de relation évidente entre topologie CPL et localisation géographique

Les figures 7.6, 7.7 et 7.8 donnent les résultats complets. Nous discutons ensuite des performances des noeuds CPL. Le grand total calculé dans les résultats suivants considère les liens CPL entre le routeur de bordure et les prises intelligentes.

Hallway	IP	Noise-min	Noise-max	Noise-avg	ETX-Ttal	ETX-Scs	% Success	BR-min	BR-max	BR-avg	DLY-min	DLY-max	DLY-avg
	aaaa::10:1af	0	31	12,5	90	69	76,6666667	34	217	106,333333	367	2342	1005
	aaaa::10:11b	0	31	11	90	68	75,5555556	27	98	64,6666667	813	2933	1331,66667
	aaaa::10:1ad	0	31	11,6666667	90	78	86,6666667	34	201	136,666667	397	2348	666
	aaaa::10:159	0	31	13	90	64	71,1111111	32	93	63	855	2446	1337,33333
	aaaa::10:117	0	31	14,6666667	90	70	77,7777778	39	194	97,3333333	412	2046	942,333333
	aaaa::10:110	0	31	15,5	90	68	75,5555556	30	99	57,6666667	804	2633	1460
	aaaa::ff:ff00:5034	7	13	7	90	90	100	102	2105	1922,66667	38	780	54
Room 14	IP	Noise-min	Noise-max	Noise-avg	ETX-Ttal	ETX-Scs	% Success	BR-min	BR-max	BR-avg	DLY-min	DLY-max	DLY-avg
	aaaa::10:1af	0	31	19	90	71	78,8888889	28	89	55,6666667	896	2829	1500
	aaaa::10:11b	0	31	17	90	67	74,4444444	24	202	84,6666667	395	3324	1253,66667
	aaaa::10:1ad	0	31	19,3333333	90	73	81,1111111	44	204	114,333333	392	1809	778
	aaaa::10:159	0	31	12	90	26	28,8888889	26	104	50,6666667	764	2971	1863,33333
	aaaa::10:117	0	31	18,3333333	90	78	86,6666667	37	188	117,333333	424	2153	783,333333
	aaaa::10:110	0	31	20,3333333	90	85	94,4444444	49	210	138	380	1623	661,333333
	aaaa::ff:ff00:5034	7	12	7	90	89	98,8888889	163	2105	1873	38	489	50,6666667
Room 16	IP	Noise-min	Noise-max	Noise-avg	ETX-Ttal	ETX-Scs	% Success	BR-min	BR-max	BR-avg	DLY-min	DLY-max	DLY-avg
	aaaa::10:1af	0	31	19,6666667	90	80	88,8888889	37	95	62	836	2152	1335,33333
	aaaa::10:11b	0	31	15,3333333	90	80	88,8888889	29	95	59	842	2677	1420,33333
	aaaa::10:1ad	0	31	18,3333333	90	85	94,4444444	48	212	136	376	1650	643,666667
	aaaa::10:159	0	31	14,3333333	90	83	92,2222222	29	215	74	372	2678	1176,66667
	aaaa::10:117	0	31	16,5	90	83	92,2222222	30	205	135,666667	389	2597	654,333333
	aaaa::10:110	0	31	11,3333333	90	89	98,8888889	45	225	143	354	1753	618,666667
	aaaa::ff:ff00:5034	7	10	7,33333333	90	90	100	296	2105	1926	38	270	43,3333333
Room 18	IP	Noise-min	Noise-max	Noise-avg	ETX-Ttal	ETX-Scs	% Success	BR-min	BR-max	BR-avg	DLY-min	DLY-max	DLY-avg
	aaaa::10:1af	0	31	15	60	35	58,3333333	18	78	52	1015	4238	1742,5
	aaaa::10:11b	0	31	10	60	24	40	18	49	33	1630	4363	2496
	aaaa::10:1ad	0	31	19	60	26	43,3333333	22	52	35	1512	3555	2311,5
	aaaa::10:159	0	31	12	60	53	88,3333333	29	216	130,5	370	2736	726
	aaaa::10:117	0	31	16	60	55	91,6666667	45	208	129,5	384	1752	691,5
	aaaa::10:110	0	31	19,5	60	28	46,6666667	24	75	52	1054	3209	1615,5
	aaaa::ff:ff00:5034	7	9	7	60	60	100	201	2105	1883	38	397	50
Room 20	IP	Noise-min	Noise-max	Noise-avg	ETX-Ttal	ETX-Scs	% Success	BR-min	BR-max	BR-avg	DLY-min	DLY-max	DLY-avg
	aaaa::10:1af	0	31	12	90	69	76,6666667	28	92	59	869	2813	1428,66667
	aaaa::10:11b	0	31	11,3333333	90	69	76,6666667	37	100	64,3333333	797	2159	1272,33333
	aaaa::10:1ad	0	31	12,6666667	90	72	80	28	93	64	852	2832	1300
	aaaa::10:159	0	31	18	90	72	80	34	96	65,3333333	826	2291	1267,33333
	aaaa::10:117	0	29	3,66666667	90	68	75,5555556	29	86	59	928	2709	1436,66667
	aaaa::10:110	0	31	14	90	81	90	62	197	131,666667	406	1275	653
	aaaa::ff:ff00:5034	7	12	7	90	90	100	952	2105	1949	38	84	41

Figure 7.6: Statistiques du Rez de Chaussée (1ère Partie)

Room 21	IP	Noise-min	Noise-max	Noise-avg	ETX-Ttal	ETX-Scs	% Success	BR-min	BR-max	BR-avg	DLY-min	DLY-max	DLY-avg
	aaaa::10:1af	0	31	13	90	68	75,5555556	27	190	98,6666667	419	2931	924,333333
	aaaa::10:11b												
	aaaa::10:1ad	3	29	15,3333333	90	76	84,4444444	22	92	56,3333333	862	3566	1506,33333
	aaaa::10:159	0	31	10	90	81	90	43	203	129	394	1823	692,666667
	aaaa::10:117	0	31	16,3333333	90	74	82,2222222	25	179	111	445	3111	844
	aaaa::10:110	0	31	10	90	90	100	86	219	154	364	925	546,666667
	aaaa::ff:ff00:5034	7	20	7	90	89	98,8888889	337	2105	1915	38	237	43,3333333
Room 22	IP	Noise-min	Noise-max	Noise-avg	ETX-Ttal	ETX-Scs	% Success	BR-min	BR-max	BR-avg	DLY-min	DLY-max	DLY-avg
	aaaa::10:1af	0	31	12,6666667	90	85	94,4444444	33	208	129,333333	384	2403	707
	aaaa::10:11b	0	31	21	90	82	91,1111111	51	216	140	370	1556	618,333333
	aaaa::10:1ad	0	31	14	90	86	95,5555556	56	218	138,666667	366	1404	636
	aaaa::10:159	0	31	17	90	69	76,6666667	40	196	72,6666667	408	1967	1217,66667
	aaaa::10:117	0	31	16,6666667	90	73	81,1111111	35	171	79	466	2264	1159,33333
	aaaa::10:110	0	31	15	90	74	82,2222222	30	102	65,3333333	782	2617	1289,66667
	aaaa::ff:ff00:5034	7	8	7	90	89	98,8888889	318	2105	1914,33333	38	251	43,6666667
Room 23	IP	Noise-min	Noise-max	Noise-avg	ETX-Ttal	ETX-Scs	% Success	BR-min	BR-max	BR-avg	DLY-min	DLY-max	DLY-avg
	aaaa::10:1af	0	31	15,6666667	90	56	62,2222222	21	101	53	791	3783	1717,33333
	aaaa::10:11b	0	31	19	30	4	13,3333333	103	190	158	421	771	532
	aaaa::10:1ad	0											
	aaaa::10:159	0	31	19,3333333	90	71	78,8888889	23	95	61	839	3392	1444,33333
	aaaa::10:117	0	31	11,3333333	90	80	88,8888889	38	180	110,333333	443	2087	851,333333
	aaaa::10:110	0	31	17									
	aaaa::ff:ff00:5034	7	9	7	90	90	100	146	2105	1673	38	546	76,3333333
Grand Total	IP	Noise-min	Noise-max	Noise-avg	ETX-Ttal	ETX-Scs	% Success	BR-min	BR-max	BR-avg	DLY-min	DLY-max	DLY-avg
	aaaa::10:1af	0	31	14,9375	690	533	77,2463768	18	217	77	367	4238	1295,02083
	aaaa::10:11b	0	31	14,952381	540	394	72,962963	18	216	86,2380952	370	4363	1274,90476
	aaaa::10:1ad	0	31	15,7619048	600	496	82,6666667	22	218	97,2857143	366	3566	1120,21429
	aaaa::10:159	0	31	14,4583333	690	519	75,2173913	23	216	80,7708333	370	3392	1215,66667
	aaaa::10:117	0	31	14,1875	690	581	84,2028986	25	208	104,895833	384	3111	920,354167
	aaaa::10:110	0	31	15,3333333	600	515	85,8333333	24	225	105,952381	354	3209	977,833333
	aaaa::ff:ff00:5034	7	20	7,04166667	690	687	99,5652174	102	2105	1882	38	780	50,2916667
Outlet's stats			Noise	14,9384921		Sucess Ratio	79,6882716		Baud Rate	92,0238095		Latency	1133,99901

Figure 7.7: Statistiques du Rez de Chaussée (2ème Partie)

Room 11	IP	Noise-min	Noise-max	Noise-avg	ETX-Ttal	ETX-Scs	% Success	BR-min	BR-max	BR-avg	DLY-min	DLY-max	DLY-avg
	aaaa::10:1af	0	31	23	84	48	57,1428571	20	99	48	802	3848	1834,66667
	aaaa::10:11b	0	31	23,5	84	49	58,3333333	28	95	64	835	2804	1315,33333
	aaaa::10:1ad	0	31		85	50	58,8235294	23	82		964	3363	
	aaaa::10:159	0	31	21,5	85	51	60	33	93	60,6666667	857	2367	1407,33333
	aaaa::10:117	0	31	12	85	45	52,9411765	28	98	63	812	2851	1376,66667
	aaaa::10:110	0	31	9,5	85	62	72,9411765	37	213		374	2118	
	aaaa::ff:ff00:5034	5	10	5,5	85	71	83,5294118	1818	2105	2015	38	44	39,3333333
Room 6	IP	Noise-min	Noise-max	Noise-avg	ETX-Ttal	ETX-Scs		BR-min	BR-max	BR-avg	DLY-min	DLY-max	DLY-avg
	aaaa::10:1af	0	31	18,5	90	54	60	19	74	43,3333333	1070	4060	1931
	aaaa::10:11b	0	31	17	90	78	86,6666667	25	96	58	827	3118	1487,66667
	aaaa::10:1ad	1	30		90	79	87,7777778	31	104		763	2514	
	aaaa::10:159	0	31	14	90	86	95,5555556	35	216	140	369	2240	652,333333
	aaaa::10:117	0	31	16,3333333	90	69	76,6666667	23	95	53	838	3458	1668,33333
	aaaa::10:110	0	31	17	90	62	68,8888889	25	62		1276	3188	
	aaaa::ff:ff00:5034	5	16	5	90	88	97,7777778	84	2162	1977	37	945	52,6666667
Corridors	IP	Noise-min	Noise-max	Noise-avg	ETX-Ttal	ETX-Scs		BR-min	BR-max	BR-avg	DLY-min	DLY-max	DLY-avg
	aaaa::10:1af	0	31	12,3333333	90	79	87,7777778	41	96	71	829	1930	1141,66667
	aaaa::10:11b	0	31	20	90	86	95,5555556	48	204	139,333333	391	1648	625
	aaaa::10:1ad	0	31		90	81	90	34	101		791	2341	
	aaaa::10:159	0	31	16,3333333	90	84	93,3333333	55	204	133,666667	391	1436	658
	aaaa::10:117	0	31	14,3333333	90	87	96,6666667	53	220	136,666667	363	1506	642,333333
	aaaa::10:110	0	31	13,5	90	82	91,1111111	26	96		830	2991	
	aaaa::ff:ff00:5034	5	6	5	90	90	100	301	2105	1951,33333	38	265	45
Grand Total	IP	Noise-min	Noise-max	Noise-avg	ETX-Ttal	ETX-Scs		BR-min	BR-max	BR-avg	DLY-min	DLY-max	DLY-avg
	aaaa::10:1af	0	31	17,9444444	264	181	68,5606061	19	99	54,1111111	802	4060	1635,77778
	aaaa::10:11b	0	31	20,1666667	264	213	80,6818182	25	204	87,1111111	391	3118	1142,66667
	aaaa::10:1ad	0	31		265	210	79,245283	23	104		763	3363	
	aaaa::10:159	0	31	17,2777778	265	221	83,3962264	33	216	111,444444	369	2367	905,888889
	aaaa::10:117	0	31	14,2222222	265	201	75,8490566	23	220	84,2222222	363	3458	1229,11111
	aaaa::10:110	0	31	13,3333333	265	206	77,7358491	25	213		374	3188	
	aaaa::ff:ff00:5034	5	16	5,16666667	265	249	93,9622642	84	2162	1981,11111	37	945	45,6666667
Outlet's stats			Noise	14,6851852		Sucess Ratio	77,5781399		Baud Rate	84,2222222		Latency	1228,36111

Figure 7.8: Statistiques du1er étage

7.2.2 Résultats

7.2.2.1 Taux de livraison des paquets (Packet Delivery Ratio - PDR)

Table 7.1: Taux de livraison des paquets

	PDR
Premier étage	79,69 %
Rez de Chaussée	77,58 %

Le tableau 7.1 présente la moyenne des taux de livraison de paquet échangés durant toute l'expérience. Le but ici est de tracer un périmètre de la fiabilité de la topologie créée. Ces taux de succès sont à mettre en regard avec la forte charge de trafic imposée. En réalité, nous avons choisi d'avoir un trafic important pour induire des pertes de paquets et les quantifier. Dans le cadre de l'instrumentation réelle d'un bâtiment, le trafic serait plutôt de l'ordre d'une trame par minute et par capteur au maximum. Cette baisse de trafic et donc la réduction de la charge de trafic pourrait nous permettre d'obtenir de meilleurs résultats.

Le taux de livraison des paquets (PDR) mesuré (autour de 80 %) est acceptable dans le cadre du déploiement d'un réseau de capteur en considérant les conditions expérimentales, la nature instable des liens CPL et le timing agressif entre les pings. Nous pouvons voir que les résultats sont plutôt homogènes parmi les étages, ce qui signifie qu'il n'y avait pas de perturbateurs particuliers dans ces salles. Un perturbateur local aurait biaisé les résultats d'une salle ou d'un étage en particulier.

7.2.2.2 Délai de livraison des paquets (Latence)

Table 7.2: Latence moyenne

	Latence
Premier étage	1228,36 ms
Rez de Chaussée	1133,99 ms

Le tableau 7.2 présente les latences moyennes mesurées durant l'expérience. Pour les noeuds WPC, la latence dépend du nombre de sauts nécessaires pour atteindre la destination. Chaque saut présente un temps d'aller retour moyen d'environ 600 ms avec des liens idéaux. La latence moyenne mesurée correspond à 1228 ms pour le premier étage et 1133 ms pour le rez de chaussé, soit environ le double de la valeur théorique pour 1 saut. Cela est cohérent par rapport à la topologie du réseau où 39% des noeuds sont joint directement, 46% des noeuds sont situés à 2 sauts, et 15% à 3 sauts comme décrit plus loin dans la figure 7.11. Il faut également prendre en compte le trafic de contrôle, et la qualité des liens des réseaux CPL réels qui augmentent les risques de perte de paquets et donc les latences. La métrique utilisée pour former le réseau est ETX [115, 58] qui favorise l'utilisation des liens offrant la meilleure fiabilité. Ainsi, le but ici n'était pas d'optimiser la latence. Cela peut être fait avec une fonction objective différente. Avec les réglages et les performances actuelles, le réseau est capable du supporter un polling à la minute (i.e. avec une requête et une réponse) d'un réseau de 45 noeuds (considérant une latence

moyenne de 1,3 secondes pour tous les noeuds, une qualité de lien similaire, et un ordonnancement optimal des émissions). Le nombre de noeuds supportés peut être doublé (i.e. 90 appareils) dans le cas d'une remontée automatique d'information à la minute (Une seule trame est envoyée dans ce cas). Ces performances sont en phase avec un système de gestion énergétique résidentiel.

7.2.2.3 Débits

Table 7.3: Débits moyens

	Débits (niveau applicatif)	Débits (niveau Physique)
Premier étage	84,22 bps	379 bps
Rez de Chaussée	92,02 bps	414,1 bps

Les débits sont calculés au niveau ICMPv6. Ils correspondent au débit nécessaire pour transmettre le payload du message ICMPv6 uniquement. Notons que ce payload ne représente que les 3/4 de la taille totale du paquet. Nous pouvons espérer une amélioration du débit en augmentant la taille du payload mais cela augmentera aussi le risque de collisions et la latence moyenne. Si nous considérons la taille totale des trames en incluant les entêtes qui est de 45 Octets, les débits correspondant sont indiqués dans la 3ème colonne du tableau 7.3. Il est important de noter que ces débits sont calculés sur des liens de bout en bout. Ainsi, le calcul est impacté par le nombre de sauts, et le nombre de retransmissions le long du chemin.

7.2.3 Discussions

Les observations suivantes découlent de ces expérimentations :

- Nous avons toujours réussi à atteindre les 6 noeuds CPL à travers des chemins de 3 sauts maximum depuis une position du routeur de bordure fixe.
- Les performances du réseau CPL (PDR, Débits, et Latence) diminuent avec la longueur du chemin (nombre de sauts)
- Les latences mesurées montrent que les liens CPL réels induisent de nombreuses retransmissions au niveau MAC dans notre réseaux CPL.

Un déploiement réel est difficile à observer sans être intrusif. Ici, nous limitons la surcharge de l'observation aux caractéristiques locales de PDR, débit et latence qui sont remontées par chaque smartplug à la fin de la session de test. De ce fait, nous n'avons que 2 images de la topologie: une première avant la session test et une autre à la fin. Nous n'observons pas les changements intermédiaires, et ne pouvons pas évaluer les capacités de reconstruction du réseau. Cependant, les résultats de PDR montrent que le réseau est stable.

Nous disposions d'un sniffer CPL (appareil permettant d'enregistrer toutes les trames transitant sur le médium en un point donné) durant toute la durée de l'expérimentation. Sur les traces, nous avons remarqué que la plupart des noeuds gardent leur parents (la majorité des paquets sont envoyés à leur meilleur parent). Nous avons également remarqué que les noeuds

conservaient leur profondeur dans le DAG lors des changements de topologie. La plupart des changements de topologie sont dus à un noeud qui oscille entre différent parents disposant d'un rang proche (calculé avec la métrique ETX ici). Nous pouvons considérer que la topologie créée avec RPL a été stable durant la période de test.

Un résultat intéressant qui n'apparaît pas sur les mesures est le temps nécessaire à la construction de la topologie. Nous avons mesuré un temps moyen de moins d'une minute pour construire la topologie permettant d'atteindre tous les noeuds.

7.2.4 Simulation des topologies dans COOJA

7.2.4.1 Description du test

Pour comparer les performances entre un réseau réel et un réseau idéal, nous avons reproduit la topologie obtenue avec le réseau réel dans le simulateur COOJA avec notre implémentation du médium et des noeuds WPC décrite au chapitre 4. Cette configuration est construite avec le plugin "Directed Graph Radio Medium" (DGRM) et des liens idéaux (Latence nulle, 100% de taux de succès) en reproduisant les topologie observées lors du déploiement réel.

La configuration des réseaux simulés est similaire à l'exemple présenté dans la section précédente. Pour notre test, nous avons réalisé le même nombre de pings (un total de 90 sur chaque prise), avec la même taille de payload (10 Octets) et mesuré les mêmes paramètres (PDR, latence et débit). Les commandes sont exécutées depuis le noyau et transmises à la simulation par un tunnel vers le simulateur.

7.2.4.2 Résultats

Les figures 7.9 et 7.10 donnent les statistiques globales du rez de chaussée simulé. Seul les topologies observées au rez de chaussé lors de nos expériences sont reproduites ici.

La partie gauche de la figure 7.11 présente la répartition du nombre de sauts sur toutes les topologies reproduites dans le simulateur. Cette répartition est donc également valable pour les expérimentations réelles. La partie droite de la figure 7.11 présente les taux de livraison de paquets pour le cas réel et le cas simulé. Ces résultats sont discutés dans le paragraphe suivant.

7.2.4.3 PDR

Table 7.4: Taux de livraison moyens dans un réseau simulé

	Taux de succès
Rez de Chaussée Simulé	92,87 %
Rez de Chaussée Réel	79,69 %
Différence	16,54 %

La tableau 7.4 présente les taux de livraison moyens mesurés dans les réseaux simulés. Comme on pouvait le prévoir, le taux de livraison est significativement plus élevé avec des liens idéaux (16% meilleur que dans le cas réel), ce qui nous permet de quantifier l'influence de l'environnement CPL réel sur les résultats. Dans la simulation, même avec des liens parfaits,

Hallway	IP	ETX-Ttal	ETX-Scs	% Success	BR-min	BR-max	BR-avg	DLY-min	DLY-max	DLY-avg
	aaaa::212:7401:1:101	90	90	100	175	3478	2326	23	456	45
	aaaa::212:7402:2:202	90	87	96,6666667	81	231	154	346	981	534
	aaaa::212:7403:3:303	90	77	85,5555556	36	93	75	853	2177	1080
	aaaa::212:7404:4:404	90	78	86,6666667	37	97	75	818	2149	1078
	aaaa::212:7405:5:505	90	75	83,3333333	40	99	75	806	1966	1079
	aaaa::212:7406:6:606	90	66	73,3333333	29	60	50	1332	2668	1577
	aaaa::212:7407:7:707	90	74	82,2222222	28	61	50	1310	2848	1595
Room 14	IP	ETX-Ttal	ETX-Scs	% Success	BR-min	BR-max	BR-avg	DLY-min	DLY-max	DLY-avg
	aaaa::212:7401:1:101	90	90	100	784	3333	2507,5	24	102	34,5
	aaaa::212:7402:2:202	90	86	95,5555556	78	303	178,5	264	1020	466,5
	aaaa::212:7403:3:303	90	86	95,5555556	76	273	171,5	293	1042	481,5
	aaaa::212:7404:4:404	90	86	95,5555556	80	276	174,5	289	990	476
	aaaa::212:7405:5:505	90	84	93,3333333	76	276	170,5	289	1049	493
	aaaa::212:7406:6:606	90	82	91,1111111	50	125	85,5	638	1592	947
	aaaa::212:7407:7:707	90	84	93,3333333	53	119	84,5	671	1492	956
Room 16	IP	ETX-Ttal	ETX-Scs	% Success	BR-min	BR-max	BR-avg	DLY-min	DLY-max	DLY-avg
	aaaa::212:7401:1:101	90	90	100	1538	3809	2998,5	21	52	27
	aaaa::212:7402:2:202	90	90	100	124	252	176,5	317	642	460
	aaaa::212:7403:3:303	90	90	100	125	238	173,5	336	639	469,5
	aaaa::212:7404:4:404	90	90	100	85	264	176	303	937	468
	aaaa::212:7405:5:505	90	90	100	123	246	179	325	648	454
	aaaa::212:7406:6:606	90	89	98,8888889	65	115	88	693	1214	912,5
	aaaa::212:7407:7:707	90	87	96,6666667	57	116	86	684	1392	938
Room 18	IP	ETX-Ttal	ETX-Scs	% Success	BR-min	BR-max	BR-avg	DLY-min	DLY-max	DLY-avg
	aaaa::212:7401:1:101	90	90	100	2162	3636	3131	22	37	25
	aaaa::212:7402:2:202	90	90	100	125	283	185	282	639	442
	aaaa::212:7403:3:303	90	90	100	55	112	88	711	1431	909
	aaaa::212:7404:4:404	90	89	98,8888889	64	113	87	706	1235	919
	aaaa::212:7405:5:505	90	89	98,8888889	64	112	88	713	1241	908
	aaaa::212:7406:6:606	90	85	94,4444444	47	76	59	1039	1684	1358
	aaaa::212:7407:7:707	90	90	100	39	75	59	1053	2026	1356
Room 20	IP	ETX-Ttal	ETX-Scs	% Success	BR-min	BR-max	BR-avg	DLY-min	DLY-max	DLY-avg
	aaaa::212:7401:1:101	90	90	100	1777	3809	3123	21	45	25
	aaaa::212:7402:2:202	90	77	85,5555556	122	266	180	300	652	452
	aaaa::212:7403:3:303	90	76	84,4444444	64	115	89	691	1232	902
	aaaa::212:7404:4:404	90	78	86,6666667	67	117	87	679	1180	920
	aaaa::212:7405:5:505	90	77	85,5555556	69	111	87	718	1144	924
	aaaa::212:7406:6:606	90	77	85,5555556	46	119	88	670	1711	914
	aaaa::212:7407:7:707	90	76	84,4444444	45	73	58	1092	1764	1378

Figure 7.9: Statistiques du Rez de Chaussée Simulé (1ère Partie)

Room 21	IP	ETX-Ttal	ETX-Scs	% Success	BR-min	BR-max	BR-avg	DLY-min	DLY-max	DLY-avg
	aaaa::212:7401:1:101	90	90	100	1481	3809	3042	21	54	26
	aaaa::212:7402:2:202	90	86	95,5555556	71	261	176	306	1122	468
	aaaa::212:7403:3:303	90	89	98,8888889	123	249	172	321	650	472
	aaaa::212:7404:4:404	90	89	98,8888889	55	283	178	282	1447	468
	aaaa::212:7405:5:505	90	88	97,7777778	121	253	178	315	660	461
	aaaa::212:7406:6:606	90	89	98,8888889	108	253	178	316	737	460
	aaaa::212:7407:7:707	90	87	96,6666667	66	119	87	671	1202	918
Room 22	**IP**	**ETX-Ttal**	**ETX-Scs**	**% Success**	**BR-min**	**BR-max**	**BR-avg**	**DLY-min**	**DLY-max**	**DLY-avg**
	aaaa::212:7401:1:101	90	90	100	1481	3809	3042	21	54	26
	aaaa::212:7402:2:202	90	86	95,5555556	71	261	176	306	1122	468
	aaaa::212:7403:3:303	90	89	98,8888889	123	249	172	321	650	472
	aaaa::212:7404:4:404	90	89	98,8888889	55	283	178	282	1447	468
	aaaa::212:7405:5:505	90	88	97,7777778	121	253	178	315	660	461
	aaaa::212:7406:6:606	90	89	98,8888889	108	253	178	316	737	460
	aaaa::212:7407:7:707	90	87	96,6666667	66	119	87	671	1202	918
Room 23	**IP**	**ETX-Ttal**	**ETX-Scs**	**% Success**	**BR-min**	**BR-max**	**BR-avg**	**DLY-min**	**DLY-max**	**DLY-avg**
	aaaa::212:7401:1:101	90	90	100	1777	3809	3123	21	45	25
	aaaa::212:7402:2:202	90	77	85,5555556	122	266	180	300	652	452
	aaaa::212:7403:3:303	90	76	84,4444444	64	115	89	691	1232	902
	aaaa::212:7404:4:404	90	78	86,6666667	67	117	87	679	1180	920
	aaaa::212:7405:5:505	90	77	85,5555556	69	111	87	718	1144	924
	aaaa::212:7406:6:606	90	77	85,5555556	46	119	88	670	1711	914
	aaaa::212:7407:7:707	90	76	84,4444444	45	73	58	1092	1764	1378
Grand Total	**IP**	**ETX-Ttal**	**ETX-Scs**	**% Success**	**BR-min**	**BR-max**	**BR-avg**	**DLY-min**	**DLY-max**	**DLY-avg**
	aaaa::212:7401:1:101	720	720	100	175	3809	2911,625	21	456	29,1875
	aaaa::212:7402:2:202	720	679	94,3055556	71	303	175,75	264	1122	467,8125
	aaaa::212:7403:3:303	720	673	93,4722222	36	273	128,75	293	2177	711
	aaaa::212:7404:4:404	720	677	94,0277778	37	283	130,3125	282	2149	714,625
	aaaa::212:7405:5:505	720	668	92,7777778	40	276	130,3125	289	1966	713
	aaaa::212:7406:6:606	720	654	90,8333333	29	253	101,8125	316	2668	942,8125
	aaaa::212:7407:7:707	720	661	91,8055556	28	119	71,1875	671	2848	1179,625
Outlet's stats			Sucess Ratio	92,8703704		Baud Rate	123,020833		Latence	788,145833
Reals stats			Sucess Ratio	79,6882716		Baud Rate	92,0238095		Latence	1133,99901
% Enhancement			Sucess Ratio	16,5420814		Baud Rate	33,6836999		Latence	30,498543

Figure 7.10: Statistiques du Rez de Chaussée Simulé (2ème Partie)

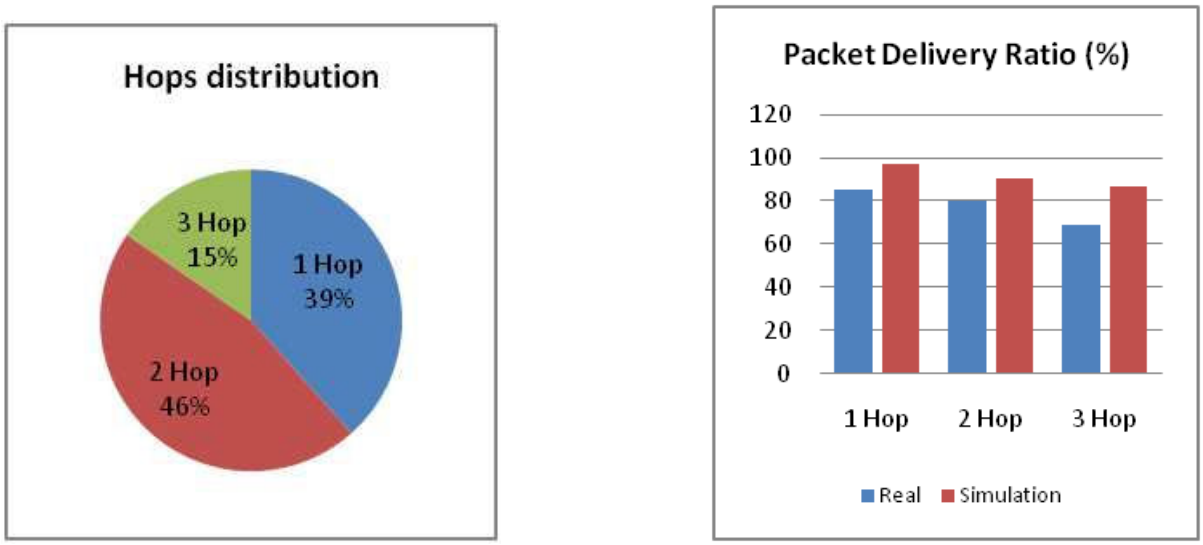


Figure 7.11: Distribution du nombre de sauts et du taux de livraison des paquets

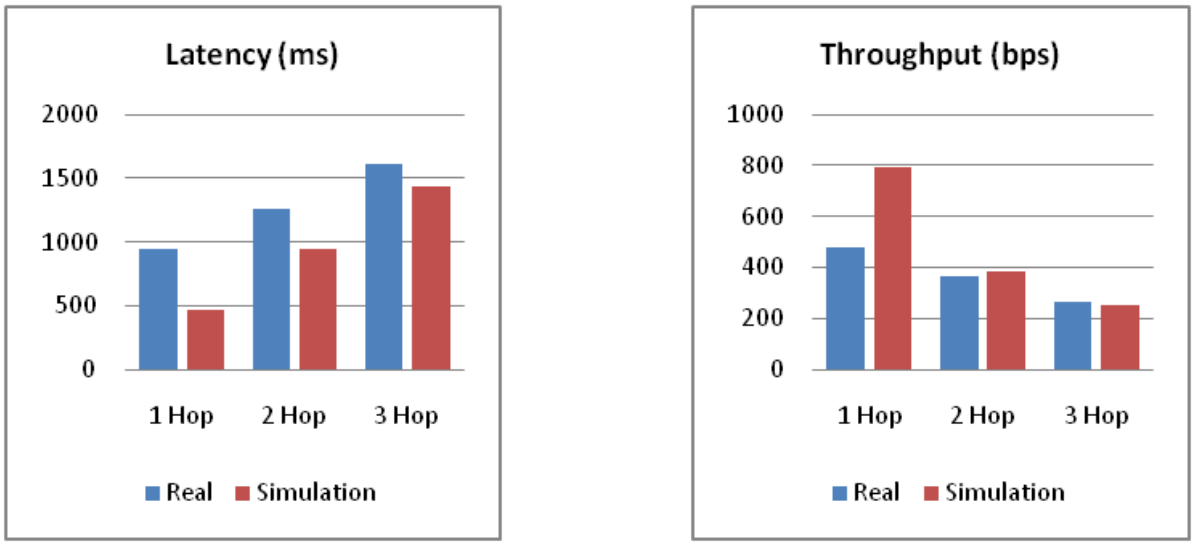
un PDR de 100% n'est pas atteint à cause de collisions avec des messages de contrôle (trafic de contrôle RPL et gestion des connexions avec les voisins). Le tableau 7.4 montre un PDR maximal de 92,87% dans ces conditions. Nous avons gardé le même intervalle entre les pings que pour le cas réel, de telle sorte que la charge du réseau soit identique. Nous avons construit la topologie de telle sorte que le numéro de l'adresse IP augmente avec la profondeur dans le DAG. Nous voyons dans le grand total de la figure 7.10 que plus le noeud est proche du routeur de bordure, meilleur est le taux de livraison. Avec des liens idéaux, un noeud dans le voisinage de la racine (tel que le noeud aaaa::212:7402:2:202), atteint un taux de livraison moyen de 94,3%.

7.2.4.4 Latence

Table 7.5: Latences moyennes dans un réseau simulé

	Latence
Rez de Chaussée Simulé	788,15 ms
Rez de Chaussée Réel	1134 ms
Amélioration	30,50 %

Figure 7.12: Latences et débits moyens observés



La partie gauche de la figure 7.12 présente les valeurs moyennes de latence calculées sur le réseau réel et simulé en fonction de la profondeur du noeud dans l'arbre. A nouveau, on constate que les résultats sont significativement meilleurs (la latence plus faible et débit plus élevé) dans l'environnement simulé. Comme nous n'avons pas de perturbations externes dans la simulation, les messages sont plus rarement retransmis à cause de collisions ou d'échecs du Clear Channel Assessment (CCA). Comme expliqué précédemment, seules les collisions avec les messages de contrôle peuvent survenir (Cela renforce l'intérêt de garder un volume de messages de contrôle aussi faible que possible). Nous observons dans le tableau 7.5 une amélioration moyenne de 30,5 % de la latence globale entre le réseau réel et le réseau simulé. Cette variation est assez importante, car les retransmissions (qui surviennent régulièrement sur un réseau réel)

diminuent de manière importante les mesures de latences moyennes (une retransmission double approximativement la latence). On constate que l'écart de latence entre le réseau simulé et le réseau réel se réduit au fur et à mesure que le noeud est distant de la racine. En effet, alors que la latence dans le réseau simulé augmente de façon quasi linéaire avec la profondeur dans l'arbre, l'augmentation de la latence dans le réseau réel n'est pas proportionnel au nombre de sauts. Cela montre que dans le cas d'un réseau réel, les liens situés autour de la racine sont plus fortement perturbés. Nous pensons que cela s'explique par la structure en arbre créé par RPL, qui concentre les paquets en un point. Ainsi il y a d'avantage de risque de collision lorsqu'on s'approche du puits de collecte car ce noeud est la destination de tous les paquets qui remontent des noeuds. La gestion de la bande passante devient donc critique dans le voisinage de la racine, en particulier dans notre cas où les débits sont très faibles et les temps de transmission très longs. Dans le cas du CPL, ce type de topologie reste cependant idéale, car elle correspond à la topologie électrique en étoile des bâtiments qui concentrent les câbles au niveau du tableau électrique. De plus, les circuits des différentes pièces peuvent être séparées par plusieurs organes de sécurité électriques qui peuvent entraver le passage du CPL, et donc compliquer les communications CPL "transversales" à cette structure orientée.

7.2.4.5 Débits

La partie droite de la figure 7.12 représente les débits moyens calculés sur le réseau réel et simulés en fonction de la profondeur du noeud.

Table 7.6: Débits moyens dans un réseau simulé

	Débit
Rez de Chaussée Simulé	123,02 bps
Rez de Chaussée Réel	92,02 bps
Amélioration	33,68 %

Comme précédemment, les résultats du réseau simulé sont meilleurs que pour le réseau réel. Nous observons dans le tableau 7.6 une amélioration moyenne de 33,68 % de débits mesurés entre le réseau réel et le réseau simulé. Le débit est lié à la latence, ici, car nous calculons les débits sur le temps total qu'il faut pour transmettre un paquet d'une taille donnée, en comptant les délais induits par la couche MAC. Il est donc logique d'avoir des différences de performances comparables entre les débits et les latences des ces 2 réseaux. L'amélioration des débits bénéficie directement du canal idéal de la simulation, qui réduit les retransmissions de paquets. Les valeurs calculées ici correspondent aux débits au niveau physique.

7.2.4.6 Discussions

Les différences de performances dans le réseau CPL simulé met en lumière la capacité réelle du médium CPL. Nous voyons clairement que dans le cadre d'une expérimentation réelle, le médium CPL présente des taux de perte importants qui ont un impact significatif sur les performances du réseau. Cependant, les protocoles utilisés dans notre pile réseau sont capables de s'affranchir de cela, notamment par l'utilisation de trames de taille réduite, et de la métrique ETX pour la formation de la topologie. Ces résultats insistent également sur le besoin de garder un volume

de message de contrôle très faible dans ces réseaux afin d'éviter une saturation de bande passante.

7.3 Déploiement au laboratoire LIG

7.3.1 Description de l'expérience

Pour cette nouvelle expérience, nous avons effectué un déploiement de smartplugs CPL dans un bâtiment de taille plus importante, et avec plus de noeuds. Le déploiement a été fait au 3ème étage du bâtiment D de l'ENSIMAG, au laboratoire LIG. Ce bâtiment est de type tertiaire, faisant une centaine de mètres de long sur 4 niveaux. Contrairement au bâtiment du CITI, ce bâtiment date plutôt des années 70. Il comprend plusieurs sous réseaux électriques, dont un située derrière un onduleur. Les appareils CPL dont nous disposions étaient identiques à l'expérience au CITI (Smartplug utilisant la technologie WPC de Watteco), mais nous disposions ici de 7 kits composés chacun d'un routeur de bordure et 10 smartplugs, représentant donc un total de 70 point CPL. Ces appareils ont profité d'une mise à jour logicielle, intégrant notamment une gestion plus efficace de la mémoire, permettant d'étendre à 50 le nombre de routes pouvant être géré par chaque smartplugs. Les routeurs de bordure ont profité d'une mise à jour matérielle, avec un remplacement du micro contrôleur ATMega1281 (8k RAM / 128k Flash) par un MSP430F5438 (16k RAM / 256k Flash). Ce routeur de bordure agissant comme la racine du DODAG créé par RPL, il stockera toutes les routes descendantes vers les noeuds. La capacité mémoire de ce nouveau micro contrôleur permet de gérer jusqu'à 100 entrées dans la table de routage, ce qui dépasse le nombre maximum de points CPL dont nous disposions.

L'objectif de cette expérience a été double : L'objectif principal consiste à étudier le passage à l'échelle de notre solution CPL et diversifier les environnements de déploiements. Les smarplugs permettant également de mesurer des puissances électriques jusqu'à 16 A, cette expérience a également permit de monter une plateforme de mesure énergétique du laboratoire. Pour permettre la mesure d'un maximum d'appareils électriques, nous avons regroupé autant que possibles les équipements derrière une même smartplug, afin de remonter l'ensemble des consommations.

Ces smartplugs ont d'abord été connectées sur des prises murales sans distinction de leur appartenance à un sous réseau électrique particulier. Cependant, nous avons constaté que la partie ondulée du réseau ne permettait pas de communiquer en CPL avec l'autre partie du réseau électrique (dénué d'un onduleur). Nous avons donc branché un 2ème routeur de bordure sur ce réseau ondulé, afin de créer 2 réseaux de monitoring énergétique disjoints. Or, nous avons constaté que la technologie CPL utilisée n'était pas capable de fonctionner sur un réseau électrique situé derrière un onduleur. Suite à cette constatation, nous avons proposé aux personnes de passer les équipements branchés sur le réseau ondulé sur le réseau classique, mais tout monde ne l'a pas accepté, ce qui a restreint le nombre de points CPL que nous avons pu installer.

Au total, 25 points CPL ont pu être installés au total, répartis sur un même étage et un même réseau électrique. Pour observer le réseau, nous disposions d'un sniffer CPL (appareil permettant d'enregistrer toutes les trames transitant sur le CPL en un point donné), ainsi que des données de l'application Watteco qui collecte les mesures énergétiques. Le sniffer fournit une vision locale du réseau électrique. Nous avons enregistré des traces pendant 1 à 2 heures depuis 2 points différents du réseau électrique, depuis lesquels nous voyons une grande partie des points CPL. Le recoupement de ces 2 traces permet d'observer la topologie dans son ensemble, à ceci près que les enregistrements sont différés dans le temps. L'application fonctionnant sur la machine hôte où le routeur de bordure a été connecté permet de décoder le contenu des trames applicatives afin d'en extraire les consommations électriques instantanées et les kWh cumulés des

éléments connectés en aval de chaque smartplug. L'application compte le nombre de données qui sont collectée pour chaque Smartplug, permettant de voir le taux de succès au niveau applicatif.

7.3.2 Paramètres de l'expérience :

Nous savons que la bande passante de notre média CPL nous contraint environ à 1 trame par seconde en moyenne, en comptant les délais induits par la couche MAC. Les paramètres des messages périodiques devront donc respecter cette contrainte.

Applicatif: Un report automatique de la consommation électrique mesurée toute les 30 minutes est paramétré sur chacune des smartplugs. Ce paramétrage est préprogrammé dans les smartplugs, de telle sorte que les trames de configuration n'aient pas besoin d'être envoyées au début de l'expérimentation.

DAO: Les DAO sont envoyés toutes les 6h, via l'incrémentation du DTSN. En effet, le type de trafic convoyé étant très largement convergecast, les routes descendantes sont peu utilisées et n'ont pas besoin d'être rafraîchie régulièrement. De même, pour limiter le trafic à convoyer sur le réseau CPL, les DAO_ACK sont désactivés. Les DAO étant unicastés, il doivent être acquittés et seront ré-émis par l'algorithme CSMA/CA en cas de non réception de l'acquittement de niveau MAC.

ND (Neighbor Discovery): La fréquence des échanges NS/NA est réduite pour limiter la congestion du média CPL. Les noeuds émettent un NS vers leur meilleur parent toutes les 8 minutes augmentées d'une période aléatoire choisie dans un intervalle de 16 minutes. Les NS vers les autres parents potentiels sont émis toutes les 32 minutes, augmentées d'une période aléatoire de 16 minutes. La période aléatoire limite les risques de collision. Typiquement, suite à une coupure électrique, il est possible que les Smartplugs soient toutes réinitialisées au même moment, ce qui pourrait avoir comme effet de synchroniser toutes leurs émissions de messages périodiques. Il faut aussi prendre en compte le fait que chaque émission de NS déclenche un message NA en retour, ce qui augmente le volume de messages sur le média CPL.

DIO: L'émission de ces messages est gouvernée par un temporisateur trickle, dont la période minimum est de 4 secondes (compte tenu de la latence observée sur la technologie WPC), et la période maximale est de 17,5 minutes, comme décrit dans les cas précédents.

En faisant le total des trames qui seront transmises et reçues pour chaque noeud et par période de 30 minutes, on obtient donc 1 trame UDP de donnée émise, 2 NS envoyés et 2 NA reçus (si le noeud n'a qu'un parent), ainsi que 2 DIO émis. Cela fait donc un total de 7 trames par période de 30 minutes et par noeud, soit environ 1 trames toutes les 4 minutes par noeud. En considérant l'utilisation de la totalité des noeuds CPL dont nous disposons, soit 80 noeuds CPL, cela correspond donc à 1 trame toutes les 3 secondes qui sera convoyée par le réseau. En ajoutant le routage des trames de données (1 relayage en moyenne si la distribution du nombre de sauts est identique à l'expérience précédente) et les échanges NS/NA supplémentaires engendrés par les autres parents potentiels (sur une base de 5 parents alternatifs), le volume de message est de 18 trames par période de 30 minutes, soit environ une trame toutes les 1,5 secondes pour 80 noeuds CPL. Dans cette configuration, la périodicité des messages reste compatible avec nos limites de bande passante.

Les Smartplugs sont toutes connectés à une prise du réseau électrique non ondulé, et une charge électrique est branchée derrière chacune d'elle. Suite aux premières expériences menées

sur ces appareils lors de développements de la technologie WPC, il a été observé que le branchement d'une charge électrique derrière ces appareils pouvait améliorer les communications CPL. En effet, cela limite les phénomènes de réflexion du signal CPL en bout de ligne et agit en quelque sorte de la même manière qu'un "bouchon" pour les circuits RF. Le fait d'avoir tous ces appareils connectés derrière les smartplugs doit donc améliorer la fiabilité des communications CPL. La figure 7.13 montre une image de la topologie qui a été construite lors de ce déploiement.

7.3.3 Résultats

7.3.3.1 Topologie

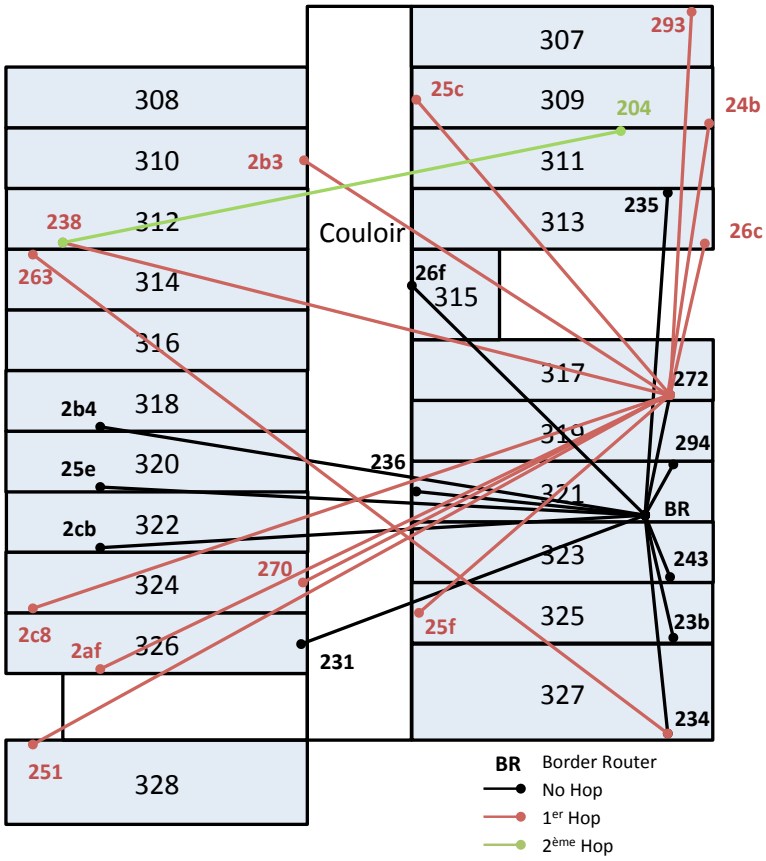


Figure 7.13: Topologie créée par RPL lors du déploiement CPL au LIG

Répartition par nombre de sauts :

Communication Directe: 11/25 Noeuds (44%)

1 saut: 13/25 Noeuds (52%)

2 sauts: 1/25 Noeuds (4%)

Comme pour l'expérience au CITI, on observe une topologie en arbre plutôt "plate" avec une faible profondeur et 2 sauts maximum pour couvrir l'ensemble du bâtiment. La différence ici est

que la quasi totalité des noeuds à 1 saut ont sélectionné le même parent comme on peut le voir sur la figure 7.13. Cette spécificité de la topologie a été observée tout au long de l'expérience.

Cette topologie a été obtenue à partir de l'étude des traces enregistrées par le sniffer aux 2 endroits où il a été connecté. Les liens entre parents et enfants sont déterminés à partir du trajet des paquets applicatifs, des messages DAO et des rangs indiqués dans les DIO.

A partir de ces traces, on peut également avoir un aperçu du voisinage des noeuds CPL. En effet, chaque noeud émet des NS vers son meilleur parent (i.e. un noeud de rang inférieur dans le voisinage), et répond donc par des NA à ses enfants ou aux noeuds dont il est un parent potentiel (i.e. un noeud de rang supérieur dans son voisinage). Par ailleurs, chaque noeud CPL ajoute à sa table de voisinage les sources des DIO qu'il entend. De ce fait, comme chaque noeud WPC émet périodiquement des DIO, tout ses voisins seront ajoutés à la table de voisinage, et des échanges NS/NA réguliers seront initiés selon la fréquence décrite dans la section 7.2.2. Les voisins d'un noeud sont donc déduits des traces par les destinations des NS qu'il émet et les sources des NA qu'il reçoit.

La figure 7.14 représente le nombre de voisins pour chaque noeud CPL observé. Les noms donnés aux noeuds correspondent aux derniers octets de leur adresse MAC et cela permet donc de les identifier de manière unique.

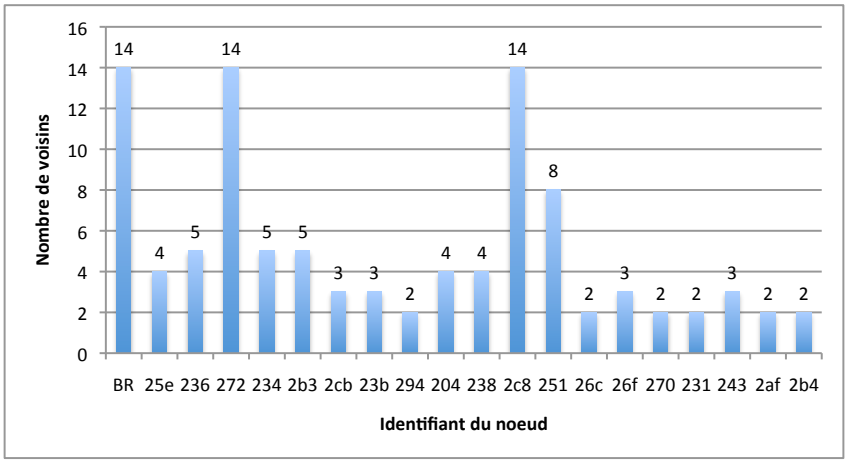


Figure 7.14: Nombres de voisins par noeud

On voit que le nombre de voisins varie fortement. Les 3 noeuds ayant le plus grand nombre de voisins sont le routeur de bordure (BR), et les noeuds 272 et 2c8. En comparant avec la figure 7.13, on remarque que le routeur de bordure et le noeud 272 sont les 2 noeuds qui ont le plus d'enfants. Le noeud 2c8 quant à lui n'a pas d'enfants d'après la topologie présentée sur la figure 7.13. En observant la liste des voisins, on constate que ce noeud n'inclut pas le routeur de bordure dans ses voisins, ce qui le situe plus profondément que le noeud 272 dans le DODAG, qui peut joindre le routeur de bordure par un lien direct. Dans l'algorithme de sélection des parents, les noeuds vont s'associer avec le parent ayant le rang le plus faible, ce qui donne l'avantage au routeur de bordure qui aura toujours un rang fixe égale à 1**MinHopRankIncrease*, soit 256 dans notre cas (afin de représenter les rangs sur 2 octets). Pour les noeuds ne pouvant pas joindre directement la racine, ils sélectionneront le noeud présentant le rang le plus faible, sachant qu'il est calculé à partir du rang du parent et de la métrique définie dans la fonction objective. Dans notre, cas, il est donc logique que les noeuds se soient de préférence associés au noeud 272, plutôt que 2c8.

7.3.3.2 Utilisation de la métrique de routage ETX dans RPL

Dans notre cas, la métrique utilisée est la métrique Expected Transmission count (ETX [115]), qui est une métrique représentant un indicateur de la fiabilité d'un lien. Il permet de déterminer une estimation du nombre d'envois qui seront nécessaires sur ce lien pour que la donnée soit correctement reçue. Notre calcul de l'ETX est basé sur les informations du niveau MAC, et en particulier de l'algorithme CSMA/CA. La métrique prend en compte le nombre de transmissions au niveau MAC jusqu'à l'acquittement. Le noeud fixe un coût unitaire de 1, 2 ou 3 au lien en fonction du nombre de transmissions nécessaires, sachant que notre paramétrage CSMA/CA n'autorise que 2 rémissions de paquets maximum. Au delà de 2 tentatives de retransmission échouées, nous considérons que la communication a échoué, et nous attribuons un coût de 8 au lien, afin de marquer une différence forte entre les liens fiables et les liens où la communication est difficile. Cette différence importante permet d'éliminer plus rapidement les liens non fiables dans le réseau. Ce coût est ensuite pondéré par une moyenne exponentielle glissante (Exponentially-Weighted Moving Average - EWMA [118]) qui va agir comme un filtre passe bas sur la variation de la métrique. Dans notre cas, la constante de lissage est égale à 0,1, ce qui veut dire que les valeurs de 1,2,3 ou 8 précédemment mentionnées ne comptent que pour 10% dans la mise à jour de la métrique. La métrique est initialisée à une valeur de 3 sur chaque lien. Si le lien est bon, alors la valeur de cette métrique va converger vers une valeur plus faible, idéalement 1, au fur et à mesure des échanges. La dynamique de la variation de la métrique est donc dépendante du trafic qui transitera par ce lien.

L'avantage est que si un lien peu fiable est utilisé pour convoyer un trafic important, alors la métrique va rapidement augmenter, et le lien sera vite détecté et écarté par l'algorithme de routage. L'inconvénient est que tous les liens ne sont pas logés à la même enseigne, car les valeurs de la métrique convergeront plus lentement sur des liens moins utilisés. De ce fait, pour 2 liens possédant une fiabilité égale, celui sur lequel le trafic sera plus important apparaîtra comme meilleur ponctuellement, le temps que les métriques convergent. Cela crée le risque que l'algorithme de routage utilise ces informations qui ne sont que ponctuellement vraies pour favoriser ce lien, conduisant à sa saturation et donc à un effondrement de sa fiabilité. Par conséquent, ce lien pourtant fiable pourrait présenter une mauvaise métrique. L'algorithme pourrait alors sélectionner un autre lien, sur lequel le même problème pourrait se produire pour conduire à des saturations successives de différents liens, créant des oscillations de la topologie de routage et une mauvaise répartition du trafic dans le réseau.

Pour pallier à ce phénomène, nous utilisons un hystérésis sur la sélection de parent. Ce mécanisme est définit dans la RFC 6719 [59], qui est un document complémentaire à la spécification de RPL. La sélection de parent dans RPL est basée sur le rang, qui est lui même calculé en fonction de la métrique sélectionnée. Le mécanisme défini dans ce standard utilise 2 seuils pour définir une plage dans laquelle le noeud ne changera pas de parent si les rangs des autres parents potentiels sont inclus dans cet intervalle. Ainsi, un noeud ne changera de parent que si ce dernier est meilleur que le parent actuel d'au moins un certain intervalle. Cet hystérésis agit comme un autre filtre passe bas sur les variations de la topologie, limitant les oscillations si 2 parents ont des rangs proches, et ne déclenchant un changement de topologie que si cela est vraiment profitable. Combiné à l'utilisation de l'EWMA, et des valeurs locales de l'ETX (1,2,3 et 8), ces mécanismes permettent de conserver une topologie stable pendant que les valeurs de la métrique ETX convergent.

Les petites variations de la métrique étant lissées par ces mécanismes, le désavantage est que la topologie créée peut être sous optimale. Il y a donc un compromis à trouver entre une topologie stable et une topologie optimale. Dans notre cas, nous avons fait le choix de mettre l'avantage sur la stabilité de la topologie. En effet, un changement de topologie implique une remise à zéro du

temporisateur trickle dans RPL, et génère des envois de messages plus fréquents afin de propager les nouvelles informations de routage. La spécification de RPL impose également qu'un noeud qui change de parent émette un nouveau DAO qui sera relayé jusqu'à la racine afin de mettre à jour les tables de routage. D'après nos expérimentations, les DODAG créés dans les bâtiments sur le CPL ont une faible profondeur, ce qui limite le nombre de relais qu'effectuent les DAO et donc le nombre de messages induits. En revanche, les routes vers le sous arbre de ce noeud se retrouvent fausses, et il faut attendre l'émission de leurs prochains DAO pour que les routes descendantes soient rafraîchies. Il résulte donc du changement de parent une augmentation du trafic de contrôle, et un état transitoire durant lequel certaines routes ne sont plus valides. De plus, l'avertissement du nouveau rang du noeud dans ses DIO peut déclencher des changements de parents de ses voisins, multipliant le risque de reconfiguration de la topologie.

7.3.3.3 Construction du DODAG et stabilité de la topologie

Compte tenu de la limitation importante de la bande passante sur le médium CPL et des besoins de fiabilité pour les routes descendantes (commandant par exemple des actionneurs dans le cas d'application de type home/building automation), nous avons donc pris le parti de limiter les changements de topologie, plutôt que de chercher le routage optimum.

La sélection de parent se déroule de la manière suivante : Les noeuds émettent régulièrement des DIO contenant leur rang, représentant la distance par rapport à la racine du réseau, et la métrique ETX du lien vers ce parent. Ces valeurs sont initialisées par la racine (le routeur de bordure dans notre cas) qui a toujours un rang de 256 et une métrique égale à 0. Les autres noeuds du réseau écoutent les DIO qui sont émis, ou en font la demande par l'émission d'un DIS, et sélectionnent le noeud avertissant le rang le plus faible comme leur parent préféré. A ce stade, la métrique ETX vers tous ses voisins, y compris ce parent préféré est initialisée à une valeur de 3. Seul le rang peut donc être utilisé pour discriminer qui est le meilleur parent potentiel. Les valeurs de l'ETX seront ensuite calculées au fur et à mesure des échanges avec ces voisins. Lorsque la sélection du meilleur parent est faite, le noeud détermine son rang comme étant égal au rang de son parent, plus la métrique ETX du lien vers ce parent. La métrique est propagée dans l'option "metric container" des DIO et sera égale à la somme de la métrique avertie par le parent et la métrique vers ce dernier. La métrique est donc additionnée le long du chemin. Notons que pour permettre un calcul et une visibilité plus fine de la métrique ETX, la RFC6551 [58] définissant les métriques de RPL suggère de multiplier la valeur réelle de l'ETX par 128. Dans le cas d'un noeud qui s'associe à la racine du réseau, il enverra donc dans son premier DIO un rang de $(1+3)*MinHopRankIncrease = 1024$ et une métrique de $(3+0)*128 = 384$. Cet exemple est illustré sur la figure 7.15. Pour les noeuds dont le parent préféré est la racine du DODAG, son rang étant fixe et sa métrique nulle, le rang de ces noeuds reflétera donc la variation de la métrique des liens vers ce parent. Nous pourrons donc utiliser la valeur du conteneur de métrique des DIO pour récupérer les métriques calculées par les noeuds.

Par récursivité, nous voyons que la variation du rang et de la métrique propagée dans les DIO dépend uniquement de la métrique calculée vers le parent préféré. En faisant la soustraction du rang avec la métrique, nous trouvons toujours la valeur $R - etx$ qui est toujours égale à $1 * MinHopRankIncrease - 0 = MinHopRankIncrease$. Dans notre cas, la différence sera donc égale à 256. De ce fait, il ne semble pas utile de propager 2 valeurs qui suivent la même variation. Une optimisation possible serait donc de ne plus utiliser l'option metric container des DIO pour propager les métriques mais simplement se baser sur la valeur du rang pour effectuer la sélection de parent et construire la topologie . Cette idée est d'ailleurs proposée dans la RFC 6719 [59].

A partir des valeurs des rangs propagées dans les DIO, on peut obtenir une image de la

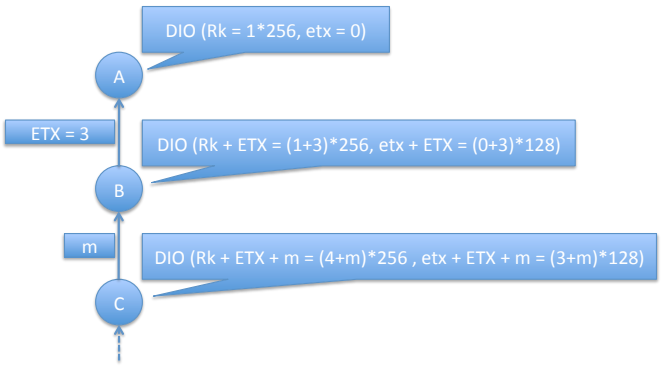


Figure 7.15: Propagation de la métrique dans les DIO

stabilité du réseau, en analysant les variations des rangs. Les figures 7.16 et 7.17 représentent respectivement les valeurs moyennes, minimum et maximum des rangs observés depuis les salles D315 et D327 durant des durées d'obervations différents. On ajoute également à ces graphiques la profondeur du noeud dans le DODAG.

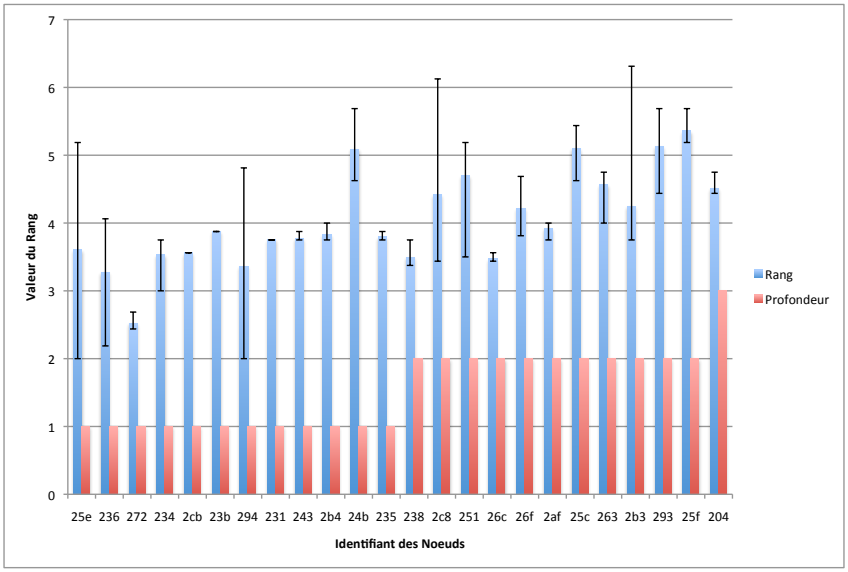


Figure 7.16: Variation des rangs des Noeuds CPL depuis la salle D315

Etant donné que ces observations menées depuis 2 salles différents ont été conduites pendant des périodes différentes, on ne peut pas recouper les informations pour obtenir une vision complète du DODAG. En effet, on constate que certains points observables depuis la prise électrique utilisée dans la salle D315 ne le sont plus depuis la prise de la salle D327 et inversement (cf figure 7.13). Cela confirme bien le fait que le CPL ne soit pas un médium de type broadcast. En comparant les 2 figures, on constate que le noeud 270 n'a pu être observé que depuis la prise utilisée dans la salle 327. A l'inverse, les noeuds 243, 26c, 293, 25f, et 204 n'ont pu être observés que depuis la prise utilisée dans la salle 315.

Sur ces 2 graphiques, on observe que les rangs ont une forte dynamique. Compte tenu de la méthode de calcul du rang décrite plus haut, cela reflète une forte dynamique des liens. Cependant, notre observation se limite à l'extraction des données envoyées périodiquement dans

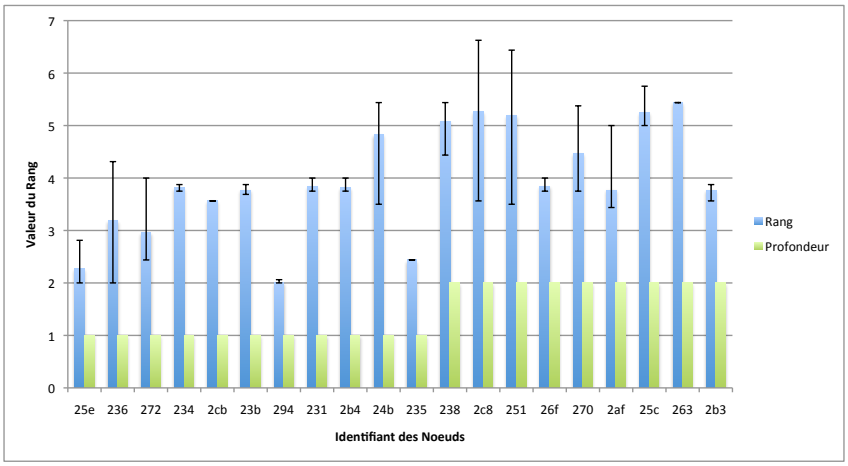
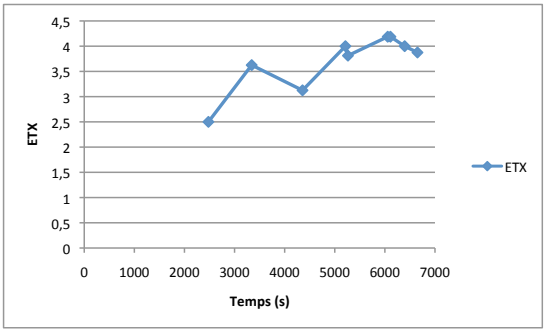


Figure 7.17: Variation des rangs des Noeuds CPL depuis la salle D327

les DIO et correctement reçus par le sniffer, et nous n'avons pas accès aux calculs internes que font les noeuds. Ainsi, nous ne pouvons pas savoir si les pertes de paquets sur les liens CPL sont dûes à des collisions au niveau MAC, ou à des trames erronées. Nous pourrions avoir une première source d'information en comptant les paquets qui sont effectivement émis ou reçus par le noeud que l'on observe, mais le sniffer observe justement ce noeud à travers un lien CPL qui a lui même des caractéristiques propres. Dans le mesure ou le sniffer n'est pas situé au même endroit que le noeud, il est possible que nous puissions entendre les trames émises par le noeud (en fonction du lien entre le sniffer et le noeud) mais ne pas entendre les trames qui sont reçues par le noeud observé. En ayant 2 points d'observation différents, nous élargissons la couverture d'observation du réseau, mais nous sommes toujours limités à une vision instantanée et partielle du réseau, soumis aux contraintes du média CPL pour effectuer l'observation. Au delà des raisons qui mènent à ces échecs de transmissions, le fait est que les informations contenues dans les messages que nous observons indiquent clairement que le CPL est un média difficile, pouvant présenter des taux de pertes importants et qui varient dans le temps. Pour illustrer clairement ce fait, nous présentons dans la figure 7.18 l'évolution de la métrique ETX propagée dans les DIO émis par le noeud 251.



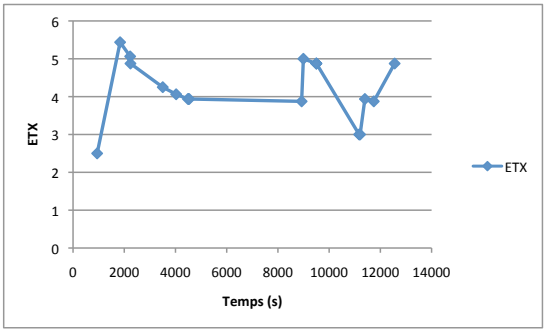


Figure 7.18: Variation de l'ETX du Noeud 251 depuis les salles D315 et D327

Nous voyons que l'ETX propagé par ce noeud varie entre 2,5 et 5,5 au cours des 2 périodes d'observations. Il n'y a pas de période durant laquelle la métrique est stable, ce qui montre que le lien entre ce noeud et son parent (le noeud 272) présente une forte dynamique.

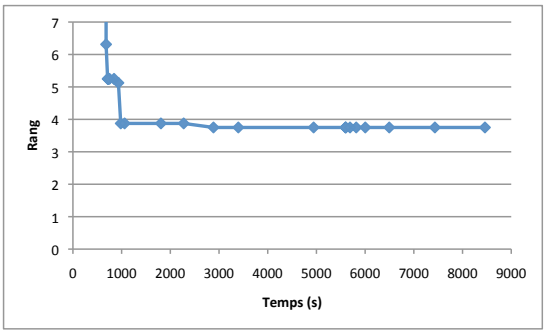
Nous remarquons dans la topologie représentée à la figure 7.13 que le noeud 272 est le parent préféré de nombreux autres noeuds du réseau. Ainsi, ce noeud va relayer un grand nombre de paquets et être sollicité régulièrement par tous ses fils par des échanges NS/NA. Il est possible que le noeud soit saturé par ces messages, ce qui pourrait expliquer les variations importantes de la métrique du lien du noeud 251 vers le noeud 272.

Pour estimer cette charge, nous avons compté le nombre de trames reçues et envoyées par le noeud 272 durant la période d'observation depuis la salle D315. Nous avons compté 63 messages locaux (NS, NA, DAO, DIO) émis et 70 messages locaux reçus. Nous avons également compté 131 messages globaux (trames UDP) émis (6 dont le noeud 272 est la source) et 125 messages globaux reçus (trames UDP à router). Cela fait donc un total de 395 messages reçus et émis pendant une durée d'observation de 8546 s, soit un rythme moyen d'un paquet échangé toutes les 21,6 s. Sachant qu'il faut un temps d'occupation du canal d'une seconde maximum pour émettre ou recevoir une trame sur le média CPL utilisé, ce trafic est donc largement inférieur à la bande passante offerte par notre technologie CPL. Il faut également noter que nous comptons ici tous les paquets émis et reçus, y compris les ré-émissions de paquets. Les pertes de paquets observées sur les liens CPL vers ce noeud 272 sont donc principalement dues à des difficultés de niveau physique plutôt que des problèmes de niveau MAC. Il est également important de noter que nous ne pouvons compter que les messages correctement reçus par le sniffer, et qu'un certain nombre de paquets supplémentaires (mais dont nous ne pouvons pas estimer le nombre) ont pu être émis et reçus par le noeud 272.

D'une manière générale, nous n'observons pas de concordances entre le nombre de voisins et la fiabilité reflétée par la métrique ETX. En effet, on pourrait penser que les noeuds qui ont un nombre de voisins important sont des noeuds "fiables", dans le sens où ils sont joignables facilement, et par de nombreux chemins. Or, outre le routeur de bordure, les 2 noeuds qui ont le plus de voisins, les noeuds 272 et 2c8, n'ont pas du tout les mêmes profils concernant leur rang moyen et ses variations. D'après les observations depuis la salle D315, le noeud 272 possède un rang moyen de 2,52 avec une variance très faible de 0,01, tandis que le noeud 2c8 a un rang moyen de 4,42 avec un variance de 0,63. Lors de la 2ème période d'observation depuis la salle D327, le noeud 272 a un rang moyen de 2,95 et une variance de 0,36, alors que le noeud 2c8 a un rang moyen de 5,26 et une variance de 0,55. Ces différences de profil se vérifient sur les figures 7.16 et 7.17.

Pour obtenir une vision de la stabilité de la topologie, il est intéressant de vérifier si un noeud s'est complètement déconnecté du DODAG. Dans ce cas, il remet à zéro son temporisateur trickle et sélectionne un rang infini. Un noeud se déconnecte lorsqu'il perd la connexion avec son meilleur parent et qu'il n'a pas de parent alternatif auquel se rattacher. Lors de l'observation depuis la salle D315, les noeuds 25e, 2c8 et 2b3 se sont déconnectés 1 fois chacun, et le noeud 236 s'est déconnecté 2 fois. Lors de l'observation depuis la salle D327, une seule déconnexion a été observée sur le noeud 2c8. La topologie présente donc quelques instabilités, mais ces déconnexions n'ont pas impacté la topologie globale, car ces noeuds n'avaient pas de fils. De plus en regardant précisément les variations de rang pour ces noeuds, on observe que les noeuds 25e et 2b3 ont été déconnecté au début de la mise en place du DODAG. La variation du rang de ces noeuds est présentée sur les figures 7.22 et 7.21. Les déconnexions apparaissent comme les pics sortant du cadre du graphique, du fait de la valeur infinie (0xFFFF dans notre cas, le rang étant codé sur 2 octets) induite par ces déconnexions.

Les variations du rang du noeud 2b3 présentées sur la figure 7.19 montrent qu'il est possible que ce noeud ne trouve pas de parent accessible au début de la vie du DODAG. Cela peut être dû aux quantités importantes de messages qui transitent lors de la formation initiale du DODAG. En effet, à ce moment, les paramètres régulant les envois périodiques tels que trickle sont à leur période minimale, qui est de 4 s dans notre cas. On voit ensuite que la valeur du rang



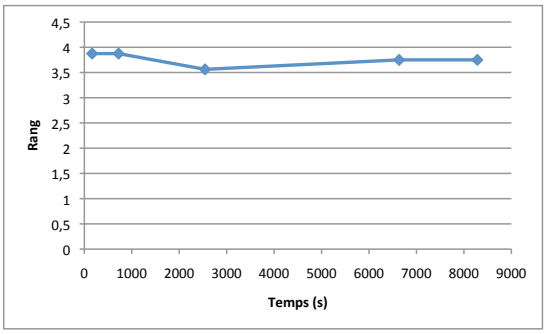
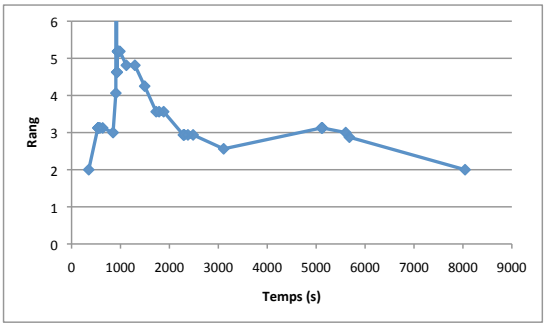


Figure 7.19: Variation du rang du Noeud 2b3 respectivement depuis les salles D315 et D327 (les valeurs non représentées correspondent à des rangs infini)

converge. En recoupant les temps durant lesquels ces variations de rang surviennent , on observe que cela correspond à des changements de parent. Le premier moment où le noeud s'associe au DODAG, il sélectionne et informe un rang de 6,3, puis peu de temps après 5,25 et enfin un rang de 3,9, qui converge ensuite vers une valeur de 3,75. Ces changements de rang correspondent respectivement à la sélection des noeuds 238, 272 et enfin le router de bordure comme parent préféré. Ces noeuds ayant respectivement des profondeurs de 3, 2 et 1 dans le DODAG au moment de la sélection, leur rang et leur métrique les positionnent comme des meilleurs parents que celui précédemment sélectionné. Le routeur de bordure étant le parent présentant le rang le plus faible dans le DODAG, le noeud 2b3 reste donc naturellement attaché à lui et sa métrique converge au fur et à mesure que les échanges avec lui sont réussis.



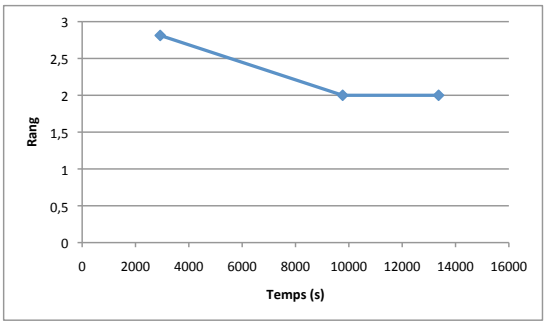


Figure 7.20: Variation du rang du Noeud 25e respectivement depuis les salles D315 et D327 (les valeurs non représentées correspondent à des rangs infini)

Le noeud 25e s'associe d'abord au routeur de bordure, comme indiqué par le rang initial d'une valeur de 2 (ici, le rang est égal au rang du routeur de bordure (1) additionné de la métrique vers lui (1)). Le rang augmente ensuite, reflétant une diminution de la fiabilité sur le lien vers le routeur de bordure jusqu'à provoquer une déconnexion du noeud avec le DODAG au bout de 1000 s d'observation, signifiant que le noeud a perdu la connexion avec son parent. Un parent alternatif ne peut pas être sélectionné, car le parent préféré est le router de bordure, qui est le seul noeud du DODAG présentant un rang minimum de 1. Les voisins du noeud 25e sont donc de rang supérieur ou égal à son propre rang, ce qui les exclut de sa table des parents potentiels. Le noeud arrive ensuite à se reconnecter directement au routeur de bordure, et le lien redevient fiable, comme l'indique la convergence de la métrique. On observe par la suite (sur la fin de l'observation depuis la salle D315 et durant l'observation depuis la salle D327) que

le lien n'est pas parfait, mais que la valeur du rang, donc la métrique reste proche d'une valeur idéale.

Pour ce qui est des 2 autres noeuds, 236 et 2c8 ont des rangs qui varient plus que pour les 2 noeuds précédents, et de manière erratique, ce qui tend à montrer que les liens entre ces noeuds et leur meilleur parent n'est pas fiable ou présente une forte dynamique.

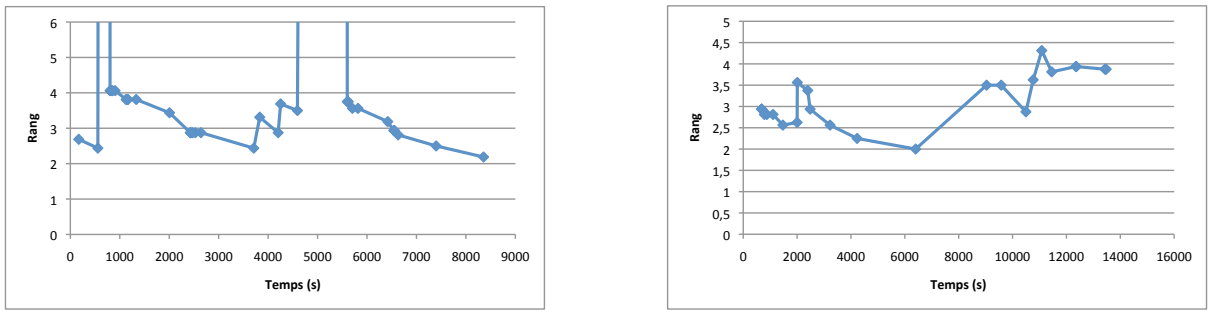
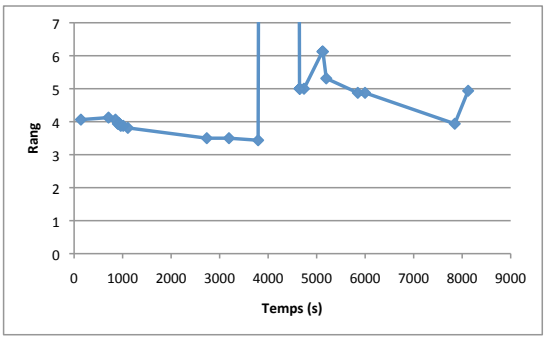


Figure 7.21: Variation du rang du Noeud 236 respectivement depuis les salles D315 et D327 (les valeurs non représentées correspondent à des rangs infini)

D'après les traces des messages observés depuis la salle D315, on observe que le noeud 236 s'attache dans un premier temps au routeur de bordure. Il se déconnecte ensuite un peu avant un temps d'observation de 1000 s. L'analyse des traces autour de cette déconnexion montre qu'un premier échange de NS/NA entre le noeud et son parent préféré a échoué, malgré les 2 nouvelles tentatives de la couche MAC. Ces échecs déclenchent de nouveaux échanges NS/NA entre le noeud et le routeur de bordure, qui considère que son fils n'est plus correctement accessible. On observe sur les traces que 7 paquets consécutifs de type NS ou NA ne sont pas acquittés, reflétant une très mauvaise qualité de lien à ce moment. Ces échecs conduisent à la déconnexion du noeud du DODAG, qui se rattache un peu plus tard au routeur de bordure, lorsque la connexion avec le routeur de bordure est rétablie. Le rang converge ensuite vers une valeur idéale, synonyme d'une qualité de lien correcte. La 2ème déconnexion se produit pour les mêmes raisons que la première fois : La connexion vers le routeur de bordure se dégrade, jusqu'à ce que le noeud considère la connexion comme perdue. Le noeud se reconnecte à nouveau quand le lien redevient utilisable. De même que pour le noeud 25e, le noeud se déconnecte du DODAG plutôt que de se raccrocher à un parent alternatif, car son rang est inférieur ou égal à ses autres voisins, ou que la différence de rang est plus petite que le seuil de l'hystérésis déclenchant le changement de parent. Sur l'observation depuis la salle D327, on n'observe pas de déconnexion du noeud mais des variations importantes du rang. En croisant ces changements brusques de rang avec les traces de paquets, on observe que ces changements résultent d'échecs successifs d'échanges NS/NA avec le routeur de bordure, mais contrairement au cas précédent, le nombre d'échecs successifs est moins important et le noeud ne considère pas le lien comme perdu.

Le dernier pic observé sur la variation du rang est dû à un changement de parent. En effet, en ayant un rang plus important, le noeud accepte dans sa table de parent d'autres noeuds que le routeur de bordure, et peut se rattacher à un parent alternatif qui n'est pas le routeur de bordure. Dans le cas présent, le noeud 236 s'est rattaché au noeud 243, avant de revenir s'attacher au routeur de bordure, une fois le lien rétabli. Ce rattachement à un parent alternatif aurait pu également se produire à la place de la 2ème déconnexion lors de la première observation, mais il semblerait que le noeud n'avait pas d'autres entrées dans sa table de parents. Cela est probablement dû à la dégradation du lien vers le routeur de bordure et donc à l'augmentation rapide du rang, ce qui a pu l'empêcher d'entendre le DIO d'un voisin qui aurait pu être un

parent potentiel. En effet, la valeur maximale de l'algorithme trickle est fixée à 17,5 minutes dans notre cas, ce qui correspond à 1050 s. L'augmentation du rang entre sa valeur minimum et la déconnexion se fait en 500 s environ, ce qui pourrait expliquer que le noeud n'ait pas eu le temps de recevoir un DIO. Aucun DIO d'un voisin identifié du noeud 236 n'est observé durant cette période. Une autre possibilité est que la qualité des liens ai été dégradée durant cette période, et que le noeuds 236 n'ai pas reçu ces DIO.



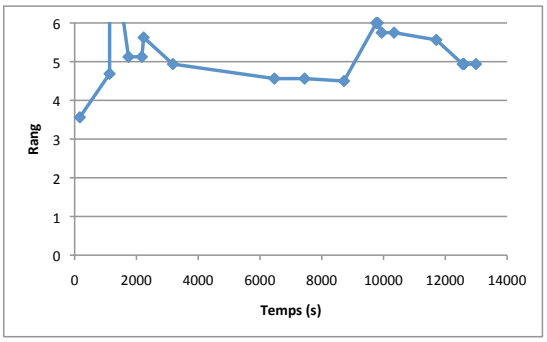


Figure 7.22: Variation du rang du Noeud 2c8 respectivement depuis les salles D315 et D327 (les valeurs non représentées correspondent à des rangs infinis)

Après observation des traces, on constate que le noeud 2c8 est attaché au routeur de bordure. Comme pour les noeuds précédents, la perte de la connexion vers ce parent provoque une déconnexion du noeud du DODAG. Le noeud se rattache ensuite au premier voisin avec lequel il rétablit une connexion, qui est ici le noeud 2cb. Le noeud se rattache ensuite au noeud 25e, car il présente un rang plus faible, mais le lien vers ce dernier parent se dégrade et le noeud finit par retrouver une connexion vers le routeur de bordure qui devient son nouveau parent préféré jusqu'à la fin de la période d'observation depuis la salle D315. Sur la période d'observation depuis la salle D327, on observe de nombreuses variations du rang, et cela se traduit dans l'étude des traces par de nombreux changements de parent préféré. En effet, le noeud 2c8 va successivement s'associer au noeud 272, puis 23b, 25e, 2cb et enfin 2af. A chaque fois, on observe que la connexion est perdue par des échecs sur les échanges de NS/NA, et que le parent passe à un parent alternatif. Ce comportement tend à montrer que les liens vers le noeud 2c8 sont particulièrement instables.

7.4 Conclusion

Ces expérimentations confirment que le CPL n'est pas un média de type broadcast et qu'une topologie multi sauts est nécessaire pour couvrir un bâtiment complet. Comme nous l'avons observé, le CPL présente des taux de pertes et des caractéristiques de propagation qui varient dans le temps. Il est difficile d'expliquer la cause de ces variations de qualité de lien, car il faudrait avoir une trace complète de l'activité électrique du bâtiment pour essayer de croiser les informations. De plus, comme expliqué dans la partie théorique sur le CPL, l'identification de la source des perturbations du signal CPL peut être multiple.

Toutefois, nous avons montré que notre implémentation du protocole RPL était capable de construire et de maintenir une topologie permettant une collecte de données fiable sur ce média difficile. Nous retenons en particulier le fait que les topologies créés par le réseau CPL dans des bâtiments de type tertiaire ont une faible profondeur, ce qui présente l'avantage de limiter les latences et la quantité de messages qui transitent sur le média afin de remonter une

information de n'importe quel point du DODAG. Nous avons également observé que les points CPL pouvaient posséder de quelques voisins (2 au minimum) à plus de 14 dans nos expériences. Cela montre donc que le CPL peut offrir une forte connectivité et donc une diversité de chemins intéressante.

La forte connectivité de certains noeuds dans l'expérience du LIG a créé une topologie assez peu commune, car de nombreux noeuds ont un même parent en commun. C'est une faiblesse potentielle du réseau créé, car cela concentre les problèmes en cas de défaillance de ce noeud. Toutefois, nous n'avons pas observé de déconnexion ou de besoin de reconstruction totale du DODAG, lors de la période d'observation.

Notre plateforme ne nous permettait pas de récupérer les données locales des noeuds. Dans notre étude, nous nous limitons à l'observation des paquets écoutés par le sniffer CPL depuis 2 points du réseau électrique. Comme tout point CPL, ce sniffer voit le réseau à travers des liens qui peuvent également présenter des pertes, ce qui rend l'observation partielle. Une visibilité sur les valeurs internes des noeuds pourrait permettre de récupérer les valeurs temporaires des métriques et donc une image plus précise de l'état des liens CPL dans le réseau, ainsi que le contenu exact des tables de routage et de voisinage en fonction du temps.

Chapter 8

Optimisation de l'énergie dans les WSN

8.1 Optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs RF

Comme nous l'avons montré au chapitre 2, les plateformes de réseaux de capteurs se sont cristallisées sur un design basé sur un micro-contrôleur et un module RF basse consommation. En ajoutant une ou plusieurs sondes à cette plate-forme communicante, et en l'alimentant par une batterie, on obtient un capteur communicant autonome qui, si ce noeud arrive à s'affranchir correctement des contraintes précédentes, permet d'atteindre une durée de vie suffisamment longue pour fournir un retour sur investissement (ROI) raisonnable. Une consommation énergétique trop importante peut provoquer des ruptures de service et des remplacement fréquent de la batterie, augmentant de manière significative les coûts de maintenance, écroulant le ROI. Afin d'atteindre une durée de vie acceptable d'au moins 5 ans sur une même batterie, les composants matériels doivent garder leur consommation énergétique à un niveau minimal quand ils sont actifs et offrir un mode de veille très basse consommation.

Pour minimiser leur consommation, ces appareils sont donc dans un mode de veille plus de 99% du temps, et se réveillent de manière périodique pour effectuer leurs opérations. Cette séquence est contrôlée par le logiciel embarqué. Ces appareils doivent également embarquer une pile protocolaire compatible avec les contraintes des réseaux de capteurs que nous avons listées au chapitre 2. Ces protocoles offrent de nombreux axes de liberté et doivent être paramétrés avec attention et mis en accord avec les contraintes applicatives. Dans cette section, nous dressons l'état de l'art des méthodes d'optimisation énergétique, et nous les appliquons à la conception d'un noeud pour des applications d'instrumentation de bâtiments. Nous présentons quelques plate-formes de réseaux de capteurs existantes et décrivons nos choix matériels. Nous décrivons ensuite le modèle de consommation que nous avons élaboré. Il permet de calculer les consommations de chacune des différentes parties matérielles du noeud, afin de prédire sa durée de vie. Ce modèle permet égalent de prendre en considération le système d'exploitation et la pile logicielle comme un composant, car il impacte la consommation d'énergie globale. Nous utilisons ensuite ce modèle pour identifier les éléments les plus consommateurs d'énergie dans notre architecture, et nous proposons plusieurs optimisations. Nous quantifions enfin leurs bénéfices dans le modèle à travers des mesures réelles après leur implémentation.

8.1.1 Approches classiques d'optimisation énergétique

La consommation énergétique est le critère dominant dans le développements des plate-formes de réseaux de capteurs autonomes. Comme expliqué dans [119], le remplacement des batteries n'est pas une option pour des réseaux de milliers de noeuds et ce papier liste diverses techniques communes permettant de sauvegarder de l'énergie. Il propose par exemple d'utiliser les ressources matérielles en fonction du niveau d'énergie disponible, de développer le logiciel embarqué en faveur de l'optimisation d'énergie, ou de gérer finement les modules communicants. Toutes ces techniques ont pour but de maximiser les temps de veille, voir d'arrêt des composants, afin de restreindre les dépenses d'énergie à l'exécution des quelques tâches périodiques [120]. Une autre technique intéressante présentée dans [121] est d'équilibrer la charge du trafic entre les noeuds afin d'éviter la concentration du routage et donc de la consommation d'énergie sur certains noeuds du réseau, typiquement les noeuds dans le voisinage du puit de collecte. D'autres travaux développent l'idée de protocoles d'auto-organisation [122] basse consommation permettant la création de tologies multi sauts à moindre coût.

Les problématiques énergétiques ont été considérées dès les premiers développements des réseaux de capteurs, depuis le premier noeud a concrétiser l'idée d'un capteur communicant tel que le noeud WeC conçu en 1998 [28]. Au fur et à mesure des évolutions des plateformes [29] [30], des règles de conception du matériel et de l'approche logicielle sont parvenues à maturité. En nous reposant sur ces règles et par l'utilisation de matériel récent et de la pile protocolaire

présentée précédemment, nous décrivons dans ce chapitre les étapes qui ont permis la conception d'un noeud RF permettant d'atteindre une durée de vie supérieure à 7 ans sur une pile 1000 mAh tout en assurant une remontée de données applicatives toutes les 10 minutes. Menant de front les approches matérielles et logicielles, nous garantissons ainsi une excellente intégration entre ces deux parties.

L'étude de la partie matérielle repose sur des mesures réelles de consommation, et des comparaisons de données théoriques issues de fiches techniques. Comme proposé dans le papier [119], nous partageons tout d'abord le système en plusieurs sous parties et menons une analyse individuelle pour chacune d'elles.

L'étude de la partie logicielle estime les modes et les temps de fonctionnement des ressources matérielles afin de déterminer l'impact énergétique des paramètres logiciels.

La pile logicielle que nous utilisons, conçue pour les architectures contraintes (y compris du point de vue de l'énergie) est déjà conçue pour limiter l'utilisation des ressources, et donc la consommation d'énergie. Ainsi, le standard IEEE 802.15.4, que nous avons adapté sur le CPL [34], permet des transmissions RF avec de faibles quantités d'énergie, notamment par l'utilisation de trames de petite taille (127 Octets maximum). De plus, ce standard définit le mécanisme CSMA/CA au niveau MAC, permettant ainsi d'éviter les transmissions concurrentes (plutôt que de les détecter, comme dans la variante CSMA/CD), et ainsi d'éviter des dépenses d'énergie inutiles.

Entre la couche MAC et la couche physique, les noeuds RF utilisent une couche intermédiaire (appelée "rdc" pour Radio Duty Cycling dans Contiki) gérant les réveils du module RF, afin de limiter la dépense d'énergie qu'il occasionne. Contrairement à notre solution CPL ou le front end analogique du WPC permettait de rester continuellement en écoute sans dépense énergétique significative, l'écoute des trames RF a un coût énergétique important. Certains modules RF consomment même parfois plus en réception qu'en émission. Le module RF230 de chez ATMEL par exemple consomme 15,5 mA en réception et 12,5 mA en émission à -3 dBm (voir [123] page 80). Notons que la puissance d'émission est réglable, la consommation énergétique augmentant logiquement avec la puissance d'émission, alors que la consommation en réception est souvent fixe pour un type de modulation donnée. Certains modules comme le RF212 de ATMEL disposent toutefois d'un mode "haute sensibilité" qui consomme plus d'énergie (voir [124] page 155). Quelque soit la valeur de la consommation, il faut tout de même un mécanisme permettant de gérer l'activation et la désactivation du module RF de manière transparente, afin de ne pas impacter le fonctionnement du noeud.

Le protocole gérant cela dans Contiki est "ContikiMAC" par défaut [125]. C'est un protocole à préambule, ce qui veut dire qu'il envoie des trains des trames d'une longueur au moins égale à la durée entre 2 réveils périodiques du module RF. Ainsi, le module RF se réveille à une fréquence relativement basse (4Hz par défaut), et les envois durent jusqu'à 250 ms (la trame est répétée pour atteindre cette durée). Dès que la trame émise est acquittée, le module sort de son état d'émission. Bien que cela réduise de manière significative les consommations d'énergie, la fréquence de réveil du récepteur induit une consommation énergétique fixe, quelque soit le trafic circulant dans le réseau. Typiquement, dans une application de type Home Automation, le trafic applicatif sera faible, de l'ordre d'un paquet toutes les 10 minutes, ou alors lors d'évènements particuliers (ouverture de porte, de fenêtre, détection de personnes etc...). Mettre le module RF en écoute toutes les 250 ms semble donc surdimensionné pour ce type d'applications. De plus les capteurs sur pile émettrons principalement des trames pour informer des valeurs mesurées par les sondes qu'ils embarquent, mais ne seront pas souvent la destination de trames, contrairement aux actionneurs, qui doivent pourvoir être contrôlés et répondre dans un délai de temps imparti.

Dans notre scénario, les capteurs RF se contentent donc de réveils programmés pour chaque émission de trame applicative, et les fonctions de routage sont restreintes aux noeuds alimentés.

Ainsi, les routeurs sont sur secteur, et les noeuds alimentés par batterie sont des noeuds feuilles, dans le but de réduire au minimum les dépenses énergétiques des noeuds sur pile. De plus, par l'utilisation des fréquences sub GHz, leur portée permet dans la majorité des cas de joindre un noeud alimenté, quand ce n'est pas le routeur de bordure directement. La topologie créé par notre solution ressemble donc à un backbone de noeuds alimentés, sur lequel se connectent des grappes de noeuds sur batterie. Comme nous l'évoquerons plus tard, ces noeuds alimentés peuvent naturellement disposer d'une interface CPL, afin de multiplier les possibilités de routage et d'augmenter la durée de vie du réseau.

La communication entre un routeur alimenté et un noeud feuille sur batterie est gérée de la manière suivante : Quand un routeur veut envoyer un paquet à un noeud feuille, il mémorise le paquet et attend un NS de ce dernier. Quand le NS est reçu, il ajoute un drapeau "data_pending" dans le NA de retour, de manière à ce que le noeud feuille garde son module RF actif avec un délais de 250 ms. Le routeur peut ensuite envoyer le paquet mémorisé au noeud feuille. Ce mécanisme est présenté plus en détail dans la suite.

Au dessus de la couche MAC, la couche d'adaptation 6LoWPAN permet également de réduire la consommation d'énergie, principalement grâce à son mécanisme de compression d'en-tête IPv6 qui permet dans le meilleur des cas de compresser l'en-tête original de 40 Octets en un minimum de 4 Octets. Les mécanismes de compressions sont assez communément utilisés dans les réseaux de capteurs, et peuvent être étendu à d'autres protocoles, comme proposé dans le draft [126] qui définit un mécanisme de compression générique pour les trames les plus communément échangées dans les réseaux de capteurs sans fil. Ce draft permet par exemple d'atteindre des taux de compression d'environ 1,8 pour des NS, NA, ou messages de contrôles RPL (DIO/DIS/DAO). La récente RFC 6775 [32] permet également de diminuer la consommation énergétique en réduisant de manière significative les échanges périodiques de messages de découverte ou de vérification de la connexion avec les voisins.

Afin de garantir une solution permettant de passer d'un médium à l'autre, comme dans le cas des réseaux hybrides RF/CPL, nous utilisons une solution de routage dite "route-over". Cela signifie que le routage est effectué avec la couche réseau, contrairement au relayage au niveau mac (dit "mesh-Under") qui relaye les paquets au niveau MAC et ne permet donc pas de traverser des liens utilisant des couches MAC différentes. Notre cas de réseau hybride RF/CPL est un peu particulier car grâce à notre adaptation du standard IEEE 802.15.4 sur le CPL, le CPL et la RF utilisent les même protocole MAC. Cependant, les grandes différences de caractéristiques rendent incompatibles les implémentations MAC de notre CPL et de la RF, notamment pour des questions de timing imposés par les spécificités du média CPL. Notre protocole de routage RPL, par l'utilisation de trickle [57] permet d'adapter le fréquence d'envoi des messages de contrôle à la stabilité du réseau, permettant ainsi d'avoir un trafic de contrôle très faible dans les cas ou la topologie est stable. Cela aide également à la réduction du nombre de messages à transmettre et donc à la réduction des dépenses d'énergie. De plus, les métriques utilisables dans RPL [58] incluent une métrique d'énergie qui permet de discriminer les chemins possibles en fonction du niveau d'énergie disponible dans les noeuds du réseau. De cette manière, on peut discriminer les noeuds alimentés (sur CPL par exemple) des noeuds sur batterie (noeuds RF typiquement) afin d'obtenir une topologie efficace, voire optimum vis à vis de l'énergie. Si tous les noeuds ont les mêmes contraintes énergétiques sur leur moyen d'alimentation, alors RPL permet de favoriser l'utilisation des noeuds disposant de la plus grande quantité d'énergie pour router les paquets jusqu'à la destination.

Enfin, nous utilisons le protocole applicatif IPSO [127] qui est un profil applicatif générique et simple, principalement destiné aux applications de type Smart Energy sur des réseaux contraints. Ce profil applicatif repose sur le protocole CoAP [43] qui permet d'interagir avec des objets contraints à travers l'usage de primitives de type REST. De manière à garder la taille des

messages faible, les ressources définies dans ce profil applicatif utilisent des noms de ressource courts, et une architecture très simple.

8.1.2 Approches classiques : les limites de l'intégration

Les approches classiques conduisent la plupart du temps à un design matériel basse consommation, sous réserve d'une conception rigoureuse. De même, une partie logicielle conçue en considérant les contraintes énergétiques permet d'atteindre de bonnes performances énergétiques. Cependant, les 2 approches sont parfois menées séparément, ou par des équipes différentes, rendant l'intégration entre les optimisations logicielles et matérielles sous-optimales. Par exemple, une architecture matérielle basse consommation verra son rendement diminuer considérablement si le logiciel embarqué ne profite pas correctement des modes de veilles très basse consommation offerts par ce type de design. Inversement, les gains énergétiques seront faibles si les temps d'utilisation des modes de veilles sont maximisés, mais que le matériel présente de faibles différences de consommation entre les modes actifs et de veille. Pire, certains composants peuvent consommer une part importante de l'énergie et de manière continue à cause d'un mauvais rendement dans la plage de fonctionnement utilisée.

Dans cette section nous mènerons de manière parallèle les études et les optimisations des parties matérielles et logicielles, afin de garantir une excellente coopération entre ces 2 parties et de bonnes performances énergétiques.

8.1.3 Implémentation d'une solution complète basse consommation

8.1.3.1 Approche Matérielle

Notre plate-forme peut être décomposée en 4 sous parties :

1. Un micro-contrôleur : Nous considérons ici le MSP430f5438A de TI, disposant d'une architecture 16 bits avec 16 kB de RAM et 256 kB de flash. Nous considérons également le SIM3C1xx de Silabs, qui possède une architecture 32 bits de type CortexM3 et offre 32 kB de RAM et 256 kB de flash.

2. Un module RF : Nous considérons 5 modules différents. Le premier est le RF230 de Atmel, qui travaille dans la bande 2,4 GHz et permet d'atteindre un débit de 250 kbps. Les 4 autres modules opèrent dans le bande de fréquence 868 MHz. Le RF212 de Atmel, avec un débit de 20 kbps, le CC1120 de TI avec un débit de 50 kbps (le débit est configurable sur ce module) et les SI4461 et SI4464 de Silabs avec un débit de 40 kbps.

3. Une Alimentation : Nous considérons l'utilisation d'une batterie 1,5 V de type AAA avec une capacité de 1000 mAh, et une batterie Lithium-manganèse 3V de type bouton avec une capacité de 1000 mAh également.

4. Sonde(s) : Les noeuds peuvent embarquer une grande variété de sondes telles que la température, l'humidité, le C02, la luminosité, la présence ou un contact sec (ILS).

Tous ces composants ont été choisis pour leur basse consommation et leur performances. Ces composants disposent en particulier de modes de veille très basse consommation.

Nous mesurons tout d'abord les consommations énergétiques du micro-contrôleur et du module RF qui forment le coeur de la plate forme communicante. Nous présentons ensuite les paramètres de notre pile logicielle, en accord avec notre cas d'usage. Cela nous conduit à une première optimisation énergétique du coeur de la plateforme.

Consommation du micro-contrôleur Cet élément a un comportement assez simple vis à vis de la consommation énergétique : Il se réveille périodiquement pour vérifier si un évènement a été détecté par la sonde ou le module RF et exécute les tâches logicielles correspondantes. Le reste du temps, il reste dans un mode de veille. Le tableau 8.1 compare les consommation de 3 micro-contrôleurs dans différents modes d'opération. Certaines valeurs sont issues de la documentation tandis que certaines valeurs complémentaires ont été mesurée à travers une résistance connectée en série avec le micro-contrôleur.

Table 8.1: Consommation de courant de 3 micro-contrôleurs différents sous 3V pour différents modes et fréquences

Mode	MSP430f1611 (16 bits RISC)	MSP430f5438A (16 bit RISC)	SIM3C1xx (32 bits Cortex-M3)
Actif à 4MHz	2 mA ([99], p26)	1.51 mA (mesuré à 3.9 MHz)	
Actif à 8MHz	4 mA ([99], p26)	1.84 mA ([100], p41)	
Actif à 16MHz		5.21 mA (valeur mesurée)	
Actif à 20MHz		6.37 mA ([100], p41)	7.8 mA ([128], p7)
Actif à 80MHz			22 mA ([128], p7)
Basse Consommation avec horloge à 32 kHz	2 μA ([99], p26)	2.1 μA ([100], p42)	800 nA ([128], p8)
Oscillateur basse consommation	Pas d' oscillateur basse consommation	1.2 μA ([100], p42)	500 nA ([128], p8)
Mode veille	0.2 μA ([99], p26)	1.2 μA ([100], p42) [1]	145 nA ([128], p8)

Les performances des MCU récents dépassent clairement la référence Telos [30] équipée de son MSP430f1611 dans tous les modes de fonctionnement. De plus, la mémoire supplémentaire offerte par ces nouveaux MCU permet des déploiements à large échelle, nécessitant de grandes tables de voisinages, de métriques et de routage. De plus grandes capacités de calculs réduisent également le temps nécessaire à l'exécution des tâches logicielles, permettant au système de retourner en veille plus rapidement, conduisant à des économies d'énergie potentielles comme discuté dans la prochaine partie.

Le tableau 8.1 montre également le gros écart entre les modes actifs et basse consommation. Comme point de référence, le MSP430f5438A utilisé à 20 MHz consommerait l'énergie d'une batterie d'une capacité de 1000 mAh en 157 heures seulement, soit moins d'une semaine ! Pour atteindre une durée de vie de 5 ans à cette fréquence d'utilisation, le MCU doit être mis dans un mode de veille plus de 99,6% du temps. Il y a 2 degrés de liberté pour réduire la consommation énergétique : fixer une fréquence d'utilisation à une valeur faible, et réduire sa fréquence de réveil.

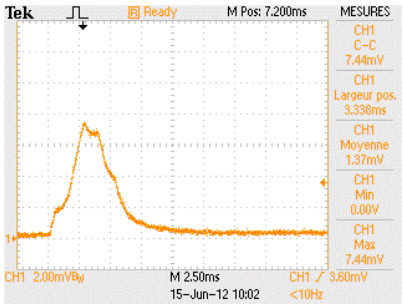
Dans la suite, nous menons une analyse et des mesures sur ces 2 axes avec le MSP430f5438A, référencé comme "MSP430" dans la suite. Le MSP430f1611 a été cité comme référence pour mettre en lumière les améliorations matérielles durant les dernières années et le récent SIM3C1xx est cité comme futur MCU potentiel pour les prochaines générations de noeuds.

[1] Un mode LPM4.5 est également disponible sur le MCU, offrant une consommation de 0.1 μ. Cependant, ce mode de veille profond ne permet pas la rétention des données en RAM, c'est pourquoi nous ne le considérons pas ici

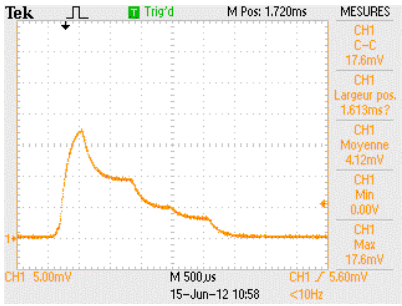
Impact de la fréquence d'utilisation du micro-contrôleur

Nous voulons mesurer l'impact de la fréquence de fonctionnement du MCU sur la consommation énergétique. L'énergie est déduite de la tension mesurée sur une résistance de 10,1 Ω ajoutée en série entre une source d'alimentation régulée de 3 V et le noeud. Cette tension reflète le courant consommé par le micro-contrôleur et le module RF212 dans son mode de veille, égal à 0.2 μA. Pour limiter les analyses du MCU, il n'y a pas de communication RF, et aucune sonde n'est connectée sur la plateforme. Le logiciel permet d'utiliser plusieurs fréquences de fonctionnement du MSP430. Le tableau 8.2 montre les traces observées sur un oscilloscope, moyennées sur 128 réveils pour inclure la diversité des profils de réveil. Le tableau décrit l'énergie pour chacune de ces courbes.

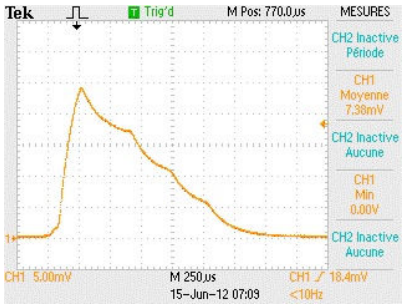
Table 8.2: Profil moyen de courant des réveils du MSP430 à différentes fréquences de fonctionnement



a. Réveil moyen à 3,9 MHz



b. Réveil moyen à 8 MHz



c. Réveil moyen à 16 MHz

Table 8.3: Caractéristiques et coût énergétique du réveil d'un MSP430 pour différentes fréquences de fonctionnement

Fréquence du MSP (MHz)	3.9	8	16
Temps de montée (ms)	2.5	0.5	0.25
Courant Maximum (mA)	0.74	1.74	2.38
temps de Descente (ms)	7.5	2.5	1.5
Temps d'observation (ms)	25	5	2.5
Tension M oyenne (mV)	1.37	4.12	7.83
Energy Cost (μJ)	**10.2**	**6.12**	**5.48**

Comme espéré, le courant maximum augmente et les temps de montée et de descente diminuent lorsque le MSP utilise une fréquence de fonctionnement plus importante. Nous remarquons un écart plus important entre 3,9 et 8 MHz qu'entre 8 et 16 MHz pour ces 3 paramètres. Concernant le courant maximum consommé, il y a un écart de 1 mA entre 3,9 et 8 MHz et un écart de seulement 0,64 mA entre 8 et 16 MHz. Cependant, la fiche technique du MSP430 [100] indique que le rapport de μA/MHz doit augmenter avec la fréquence, ce qui veut dire que l'écart entre 8 et 16 MHz devrait être plus important que l'écart entre 3,9 et 8 MHz.

En réalité, ces courbes ne reflètent pas exactement le courant maximum consommé, car il est moyenné sur 128 échantillons. Le courant maximum atteignable est le courant consommé

quand le MSP430 est actif, comme mentionné dans la table 8.1, et suit la logique de la fiche technique par rapport à l'augmentation de la fréquence. Nous constatons dans le tableau 8.3 que ce maximum est quasiment atteint à 8 MHz, alors que la moitié de la valeur mesurée dans le tableau 8.1 est atteinte à 4 et 16 MHz.

Cela s'explique par le fait qu'un réveil de courte durée ne permet pas d'atteindre la consommation maximale, alors qu'un long réveil permettra de converger vers la valeur de courant maximum. Cela explique pourquoi la valeur maximale n'est pas atteinte à 16 MHz.

De manière similaire, les temps de montée et de descente sont grossièrement divisées par un facteur 2 en passant de 8 à 16 MHz, mais il y a un facteur 4 quand on passe de 4 à 8 MHz. Alors qu'il semble logique que les timing soient divisés par 2 quand la fréquence de fonctionnement double, nous ne pouvons pas expliquer pourquoi la différence est plus grande quand l'horloge du MCU ralenti à 4 MHz. Les faibles performances du MCU à 4 MHz ne sont pas claires pour nous et nécessiteraient des investigations plus détaillées avec des experts matériel.

Nous avons calculé l'énergie dans le tableau 8.3 en intégrant la puissance suivante :

$$AverageVoltage/10.1\Omega * 3.0V \tag{8.1}$$

mesurée pendant la période de visualisation. Le MCU présente de faibles performances énergétiques à 4 MHz, et une consommation plus faible à 16 MHz, principalement parce que les réveils courts n'atteignent par le courant maximal consommable et biaisent la puissance moyenne à l'avantage de la fréquence de fonctionnement plus élevée.

A la vue de ces résultats, nous avons décidé de sélectionner la fréquence de fonctionnement de 16 MHz pour le MSP et poursuivons l'optimisation de cette énergie sur les autres paramètres.

Impact de la fréquence de réveil du micro-contrôleur

De manière intuitive, plus la durée de la période de réveil augmente, plus l'énergie totale dépensée est importante, impliquant que le MCU doit être réveillé le moins souvent possible. Cependant, cette fréquence de réveil impacte la transmission des messages descendants (des noeuds routeurs vers les noeuds feuilles) et la consommation globale, en fonction du protocole de réveil périodique utilisé.

Dans le cas de X-MAC [129], ContikiMAC [125] ou autre protocole MAC à préambule, la trame est répétée jusqu'à ce que le récepteur se réveille. Celui induit un réveil périodique du module RF qui peut représenter une grande quantité d'énergie sur de longues périodes, et qui est perdue si le trafic descendant est faible. De plus, ces protocoles MAC augmentent la consommation d'énergie car ils induisent l'envoi de plus de paquets que nécessaire, et nécessitent des réveils périodiques du module RF à une fréquence relativement élevée (4 Hz par défaut dans ContikiMAC), pour éviter l'envoi de très longs trains de trames.

D'autres protocoles MAC tels que le mode beaconé du standard IEEE 802.15.4 [11] nécessitent une synchronisation temporelle entre l'émetteur et le récepteur, qui est négociée par l'utilisation de paquets appelés "super trames". Cela nécessite également une énergie supplémentaire du fait du surcoût de message, et nécessite une synchronisation temporelle assez fine qui peut être dure à garantir en utilisant les oscillateurs basse consommation embarqués sur les MCU récents. Par exemple, la documentation du MSP430f5438 [100] stipule que l'oscillateur interne basse consommation et basse fréquence (VLO) a une dérive en fréquence de 0.5%/C, et 4%/V alors que l'oscillateur interne (REFO) a une dérive en fréquence de 0.01%/C, et 1%/V.

Dans notre cas, les noeuds alimentés par batterie sont des noeuds feuilles, et doivent être associés à un noeud routeur qui est alimenté par le secteur. Ces routeurs peuvent rester actifs en continu et recevoir des paquets à n'importe quel moment, réduisant le nombre de messages à envoyer et donc le budget énergétique au minimum. Quand un paquet est destiné à un noeud

en veille, donc des noeuds feuilles dans notre cas, le routeur stocke le paquet. Quand il reçoit un NS du noeud feuille (les échanges périodiques de paquets sont présentés plus loin), il ajoute un drapeau à son NA de réponse, et force le récepteur à garder son module RF en réception pendant un temps maximum de 250 ms. Une fois que le NA est acquitté, le routeur envoie le paquet applicatif au noeud feuille et attend l'acquittement. Le drapeau étant placé dans les champs réservés des messages NA, ce mécanisme ne modifie pas la taille des trames et n'induit donc pas de traitement supplémentaire ou de temps d'émission et de réception plus longs. Aucun réveil à une fréquence élevée du module RF n'est nécessaire pour les noeuds sur batterie, et aucune synchronisation temporelle n'est requise, diminuant la consommation d'énergie sur le long terme.

Si les besoins de l'application le permettent et que la durée de vie est le premier critère à optimiser, la fréquence de réveil du MSP devrait être aussi basse que possible. Cette recommandation pourrait ne pas être valide avec des mécanismes à préambule, car une fréquence de réveil plus basse est plus efficace pour le récepteur, mais induit de plus long trains de trames et est moins efficace du point de vue de l'émetteur. Ce problème est compensé quand la communication se produit entre un noeud feuille sur batterie et un routeur alimenté et toujours actif. Notons que des fréquences de réveils aussi basses peuvent induire des pertes de réactivité du noeud, car les interruptions et les évènements seront détectés moins fréquemment. Cela doit donc être mis en accord avec les besoins applicatifs.

Coût énergétique du micro-contrôleur

Ce budget énergétique laisse peu de liberté pour l'optimisation. La principale recommandation à faire est d'utiliser de manière efficace les différents modes de veille proposés par les micro-contrôleurs récents. Durant nos expérimentations, nous avons divisé le courant de veille du MSP430 par un facteur 2 en utilisant le mode basse consommation avec l'oscillateur basse fréquence, comparé à l'oscillateur par défaut fonctionnant à 32 KHz. Pour économiser plus d'énergie, la seule solution disponible est de sélectionner un matériel différent avec une consommation plus faible dans la même configuration. Dans notre cas, le SIM3C1xx offre un mode basse consommation avec un oscillateur base puissance à 16,4 KHz et une consommation de 500 nA, ce qui est moins que la moitié du MSP430 dans une configuration similaire. Un tel choix pourrait intéressant si le budget énergétique représente la plus grosse partie de l'énergie totale dépensée par la plateforme.

Consommation énergétique du module RF La littérature met en évidence le coût énergétique élevé des transmissions RF [130], et de nombreux mécanismes ont été proposés pour réduire ce poste énergétique. Certains d'entre eux reposent sur une réduction de la taille des trames par de la compression [126], ou de l'agrégation de donnée [131]. Une autre solution complémentaire est de limiter le nombre de paquets envoyés (RPL utilise trickle [117] à cette fin), et de limiter le temps de réception du module en utilisant une synchronisant entre l'émetteur et le récepteur, des temporisateurs adaptatifs, de très basses fréquences de réveil, ou des fonctions de wake on radio. Quelque soit le mécanisme utilisé, une faible consommation d'énergie requiert un module basse consommation. Nous considérons ici 5 modules RF : L'ATRF230 et ATRF212 de chez Atmel, le CC1120 de chez TI et le SI4464 et 4461 de chez Silabs. Le premier opère à un débit de 250 kbps dans la bande 2,4 GHz alors que les autres peuvent être utilisés dans les bandes sub-GHz. Dans notre cas, nous utilisons la bande 868 MHz. L'ATRF212 fonctionne à 20 kbps, conformément à la norme IEEE 802.15.4-2006, et le CC1120 fonctionne à 50 kbps, conformément à la future spécification 802.15.4G. Les modules Silabs sont considérés avec un débit de 40 kbps, étant donné que c'est la valeur la plus proche des configurations des autres modules RF mentionnée dans la spécification technique.

Pour quantifier les différences entre ces 2 bandes de fréquences et sélectionner celle qui satisfait le mieux nos besoins applicatifs, nous calculons dans le tableau 8.4 la puissance nécessaire pour obtenir une portée similaire entre tous ces modules.

La première intuition est que l'ATRF230 devrait être le meilleur choix du point de vue de l'énergie, grâce à sa consommation instantanée plus faible et son débit plus important, permettant des périodes de transmission plus courtes. Cette impression est confirmée quand on regarde la colonne "Puissance Tx + Rx" qui représente l'énergie nécessaire pour envoyer et recevoir un bit pour chaque module. l'ATRF212 et le CC1120 ont une consommation assez similaire dans cette colonne, car la consommation plus importante de ce dernier est équilibré par son débit plus élevé. Cependant, la bande 2,4 GHz offre une portée plus courte que les 2 autres, est plus sujette aux perturbations et la puissance maximale de transmission autorisée dans cette bande est plus faible. De ce fait, une transmission à une distance donnée peut nécessiter plusieurs transmissions via un chemin multi-sauts à 2,4 GHz, alors qu'une transmission dans la bande 868 MHz pourra s'effectuer directement. Comme seuls les noeuds alimentés sur secteur disposent de capacités de routage dans notre cas, cela pourrait empêcher les noeuds feuilles de s'attacher au réseau si aucun routeur n'est disponible dans le voisinage.

La puissance reçue à une distance donnée d en champ libre peut être approximée par la formule de Friis :

$$P_{recue} = 22dB + 20 * log(d/\lambda) \tag{8.2}$$

Nous utilisons cette formule dans le tableau 8.4 pour calculer la distance à laquelle la puissance reçue correspond à la sensibilité maximum du module.

Table 8.4: Caractéristiques de propagation de différents modules RF pour atteindre une même portée

Module	Débit (kbps)	Fréq. (MHz)	Sens. (dBm)	Tx (mA)	Rx (mA)	Puiss. Tx+Rx (μJ/bit)	Puiss. Max (dBm)	Dist. (km)	Puiss. Reçue. (dBm)	Nb. sauts	Puiss. pour atteindre D (μJ/bit)
ATRF212	20	868	-110	25	9.2	5.13	10	25	-109.19	2	10.26
CC1120	50	868	-110	45	22	4.02	14	40	-109.27	1	4.02
SI4464	40	868	-110	37	13	3.75	14	40	-109.27	1	3.75
SI4461	40	868	-110	33	13	3.45	14	40	-109.27	1	3.45
ATRF230	250	2400	-101	16.5	15.5	0.384	3	1.5	-100.58	27	10.368

La puissance de transmission est réglée à la puissance maximale atteignable par le module dans le cadre des réglementations en vigueur, et illustre la distance maximale atteignable en champ libre. Nous avons calculé la puissance nécessaire à chaque module pour transmettre un bit à une distance donnée D, qui correspond à la porté maximale atteignable par ces émetteurs RF avec les paramètres sélectionnés. Dans ce cas, chaque émetteur émet à sa puissance maximale autorisée et nous supposons que la réception est correcte jusqu'à la sensibilité la plus basse. Nous voyons que les avantages du module ATRF230 en terme de consommation instantanée ne tient plus quand on considère une transmission sur une longue distance. Dans notre cas d'usage, comme le routage est restreint aux noeuds alimentés, l'étude énergétique se concentre sur le dernier saut, permettant de joindre le noeud feuille qui lui fonctionne sur batterie. Si ce noeud feuille peut atteindre un routeur en un seul saut en utilisant la bande 2,4 GHz, il est clair que le module ATRF230 sera plus efficace énergiquement, comme calculé dans la colonne "Tx + Rx". Cependant, le tableau 8.4 montre que la distance maximale atteignable à 868 MHz est

27 fois plus grande qu'à 2,4 GHz en utilisant les modules étudiés. Etant donné que les noeuds feuilles doivent trouver un noeud routeur dans leur voisinage pour s'attacher au réseau, il y a un plus grand risque qu'un noeud de ce type ne puisse pas se connecter au réseau en utilisant la bande 2,4 GHz. Pour limiter ce risque et concevoir une plate forme qui sera capable de se connecter au réseau dans une grande variété de configurations et d'environnements, nous avons décidé d'utiliser la bande des 868 MHz. L'énergie de cette bande permet également d'augmenter la diversité des chemins vers les noeuds feuilles pour lui permettre de sélectionner plusieurs parents potentiels, et donc des chemins alternatifs. Cette bande augmente également la qualité des liens comparé à la bande 2,4 GHz sur une même topologie physique, et réduit le nombre de sauts pour atteindre la racine, limitant la complexité de routage et le surcoût des messages de contrôle.

Des paramètres additionnels pourraient être ajoutés à ce modèle pour être qu'il soit plus réaliste. En particulier, le gain et le type d'antennes, le type de modulation et l'environnement de propagation peuvent avoir un impact significatif sur la transmission, mais nous avons choisit de limiter le cadre de notre modèle à une transmission en champs libre uniquement, afin de garder la comparaison générique.

Le tableau 8.4 montre que le module le plus efficace en énergie dans la bande 868 MHz parmi notre sélection est le SI4464. Nous remarquons également que le débit a un impact important sur le budget énergétique. La limitation à 20 kbps de l'ATRF212, imposée par le standard IEEE 802.15.4-2006 décroit de manière substantielle son efficacité énergétique, alors qu'il dispose de la plus basse consommation en mode Tx comme Rx. Les autres modules 868 MHz ont un débit plus important, comme le permet le nouveau standard 802.15.4G. Cette analyse montre qu'adopter ce nouveau standard apporterai de bonnes améliorations pour l'efficacité énergétique. Comme nos plates-formes actuelles utilisent le module ATRF212, nous continuons l'étude en nous basant sur ce module, en gardant en tête que des optimisations énergétiques pourraient être possibles du point de vue matériel.

8.1.3.2 Approche Logicielle

Dans cette partie, nous quantifions l'activité RF supportée par le noeud, afin d'estimer le coût énergétique des transmissions RF. Nous déterminons donc le nombre de messages envoyés et reçus par les noeuds feuilles.

Périodicité des messages

Dans notre cas d'usage d'instrumentation des bâtiments ou des maisons, les noeuds feuilles remontent périodiquement les valeurs mesurées par la sonde, et le trafic descendant est restreint à la configuration qui est effectuée au début de la durée de vie du réseau. Cela résulte en un trafic fortement asymétrique des noeuds vers le routeur de bordure. Le trafic descendant peut être plus fréquent pour des noeuds agissant comme des actionneurs, car il ont besoin d'être commandés, mais ces appareils ne sont pas contraints en énergie dans notre cas.

Noeuds Routeurs

Le trafic supporté par ces noeuds est présenté dans le tableau 8.5. Ces noeuds sont capables de relayer du trafic et peuvent être sélectionnés comme des parents par des noeuds feuilles ou d'autres noeuds routeurs de manière à former un réseau maillé. Les déploiements d'instrumentation de bâtiments incluent souvent un certain nombre de noeud alimentés (par exemple, de moteurs de

volets roulants, de l'éclairage, de compteur énergétiques etc...) qui seront distribués parmi la maison et peuvent agir comme des routeurs.

Table 8.5: Périodicité des messages des routeurs des noeuds feuilles

Type de message	Mode de fonctionnement	Périodicité	Commentaires
NS	Routeur	Meilleur parent : 1 min Autre parent : 2 min Autres voisins : 6 min	Aucun NS n'est envoyé aux noeuds feuilles
NS	Feuille	Meilleur parent : Entre 3 s et 10 minutes	Régit par un temporisateur trickle
NA	Routeur	Identique aux NS	
NA	Feuille	Aucun	Aucun NS n'est envoyé aux noeuds feuilles
DIO	Routeur	Régit par trickle Imin : 1 s Imax : 17.5 min	
DIO	Feuille	Non périodique	DIO est envoyé une fois que le noeud est connecté pour informer les voisins de son rang
DATA	Routeur ou Feuille	Fixé par l'application	Période de 10 minutes dans notre cas
DAO	Routeur	Incrémentation de DTSN : 60 min	Envoyé à chaque fois qu'un DIO est reçu avec un DTSN incrémenté ou si un changement de parent se produit
DAO	Feuille	Période la plus basse entre l'envoi de DIS et l'incrémentation du DTSN	Envoyé chaque fois qu'un DIO avec un DTSN incrémenté est reçu ou si un changement de parent se produit
DAO_ACK	Routeur ou Feuille	Idem que pour les DAO	Renvoyé au noeud quand un DAO est correctement reçu par le parent
DIS	Routeur	Non périodique	Les DIS sont seulement envoyés quand le noeud a besoin d'infos pour s'attacher au DAG
DIS	Feuille	60 minutes	Les DIS sont utilisés pour requêter des DIO aux parents et mettre à jour les infos du DAG
ACK	Routeur ou Feuille		Un ACK est envoyé après chaque trame unicast correctement reçue

Noeuds Feuilles

Le trafic supporté par ces noeuds est présenté dans le tableau 8.5. Ces noeuds sont contraints en énergie et doivent garder leur activité à un niveau minimum, en particulier quand le réseau atteint une taille importante. Dans notre cas, le trafic et donc le budget RF supporté par ces noeuds sera indépendant de la topologie lorsqu'ils agissent comme des noeuds feuilles.

Pour les paquets multicasts, un noeud feuille retourne dans son état de veille juste après une

transmission RF, alors qu'il doit attendre un acquittement pour les paquets unicast. Il y a une exception pour les paquets DIS multicast, où l'on force le noeud feuille à garder son module RF en réception durant 2 secondes, afin de s'assurer de la réception de tous les DIO de ses parents potentiels. Le coût énergétique nécessaire pour garder le module actif durant ces 2 secondes est pondéré par l'efficacité de la sélection de parent durant la durée de vie du réseau. En réalité, si nous limitons la sélection de parent à la source du premier DIO reçu, il y a un risque que le parent ainsi sélectionné puisse être accessible à travers un lien RF non fiable, ou ait un rang élevé, induisant un chemin sous-optimal ou des retransmissions et donc une consommation plus élevée.

8.1.4 Performances énergétique de la plateforme

Maintenant que nous connaissons la consommation énergétique du MCU et du module RF, et la quantité de message envoyée pour chaque type de noeuds, nous pouvons construire un modèle de consommation énergétique.

Modèle de consommation d'un noeud feuille

Contrairement aux modèles de consommation génériques tels que celui présenté dans [132], nous avons construit notre modèle en accord avec notre application. Dans notre cas, les noeuds feuilles exécutent des tâches périodiques: veille, réveil, fonctionnement, mesure, transmission et réception. Nous avons mesuré l'énergie de chacune de ces tâches sur la plateforme matérielle.

Le courant consommé en veille par le MSP430 est de 1,2 μA et peut être intégré sur la durée de la simulation à laquelle on aura retiré les périodes de temps où le noeud est actif.

Le coût énergétique moyen d'un réveil individuel du MSP430 représente une énergie de 5.48 μJ. Nous pouvons calculer le coût total sur un jour en fonction de la fréquence de réveil, réglée à 4 Hz.

Nous avons également mesuré le courant consommé par le MCU lorsqu'il est actif à 16 MHz, reporté dans le tableau 8.1. Le MCU est actif durant les état Rx et Tx du module RF, et durant les mesures de certaines sondes embarquées. Nous considérons tout d'abord une plateforme nue, sans aucune sonde, et ajoutons ces éléments dans la prochaine section après l'optimisation du coeur de la plateforme.

Nous considérons aussi la consommation du régulateur de tension (LDO), calculé depuis ses caractéristiques à vide, avec une entrée de 1,5V fournie par une seule pile AAA et une tension de sortie désirée de 3,3 V. La courbe de l'efficacité est présentée sur le figure 8.1.

Les consommations des 3 modules RF considérés et listées dans le tableau 8.4 sont intégrées durant les périodes de transmission et de réception calculées à partir du débit du module, du nombre et de la taille des paquets échangés pendant les périodes de simulation. Les débits sont les mêmes que dans le tableau 8.4, et le nombre de paquets échangés est déduit de la périodicité des messages présentés précédemment. Le tableau 8.6 montre la taille et le nombre de paquets échangés sur une période de 24 heures.

Comme pour le MSP430, leur consommation en veille est intégrée sur le temps de la simulation moins la période de temps active du module. Pour compléter le modèle énergétique du module RF, nous ajoutons l'énergie dépensée quand le module reste en mode Rx, et attente des acquittements.

Dans ce modèle, nous considérons que tous les paquets sont correctement reçus et qu'il n'y a pas de retransmissions au niveau applicatif ou MAC.

Le tableau 8.6 compte la quantité de données envoyées et reçues par un noeud feuille d'après le tableau 8.5, dans son régime normal de fonctionnement, c'est à dire quand le réseaux est

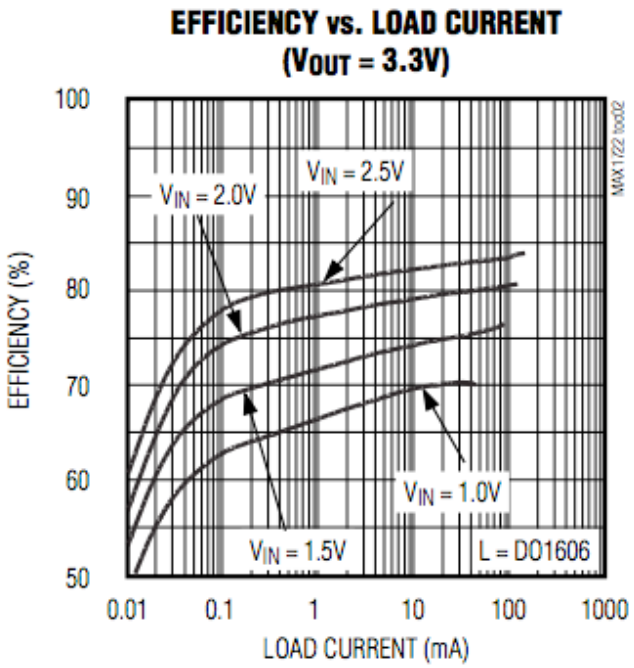


Figure 8.1: Rendement du LDO à 3,3 V

établi et que les valeurs des temporisateurs trickle sont maximales. montre que la majorité du trafic est concentrée dans les échanges NS/NA et les remontées de données applicatives. Le surcoût induit par les messages de contrôle du protocole de routage est très bas. Les échanges NS/NA sont requis par notre mécanisme de donnée actif et permet de vérifier périodiquement la bidirectionnalité du lien avec le parent sélectionné et de mettre à jour la métrique ETX correspondante (en fonction des succès ou des échecs des échanges NS/NA, et des retransmissions MAC).

Le tableau 8.7 montre la répartition de l'énergie d'un noeud équipé avec un module ATRF212, avec et sans régulateur LDO, et permet d'identifier le plus gros budget énergétique sur une période de 24 heures.

Lorsqu'il est présent, nous voyons dans le tableau 8.7 que le LDO consomme 82% de l'énergie totale ! En observant la courbe d'efficacité du LDO, nous voyons qu'elle varie fortement en fonction du courant consommé.

On voit sur la courbe de la figure 8.1 avec Vin = 1,5V (correspondant à la tension fournie par notre pile) que nous travaillons dans la partie basse de la courbe (entre 10μA et 20μA d'après le tableau 8.7), soit la zone où le rendement est le moins bon. Cette courbe nous permet de calculer le courant consommé par le capteur selon la formule suivante :

$$\eta = P_{out}/P_{in} = (3,3 * Conso_Noeud)/(1,5 * I) \tag{8.3}$$

D'où

$$I = (3,3 * Conso_Capteur)/(1,5 * \eta) \tag{8.4}$$

Où :

- I est le courant total consommé par le système complet (LDO + Nœud)

Table 8.6: Taille et nombre de messages échangés avec un noeud feuille sur une période de 24h

Type de message	Taille (Octets)	Envoyés	Reçus	Commentaires
NS	72	151	0	
NA	72	0	151	
DIO	111	0	24	Les DIO incluent la métrique ETX, la configuration du DODAG et les informations de préfixe
DATA	93	144	0	Paquet UDP avec une dizaine d'octets de données
DAO	66	24	0	Les DAO utilisent les options "target" et "transit"
DAO_ACK	40	0	24	Les DAO_ACK sont requis pour chaque DAO
DIS	33	24	0	
ACK	5	199	344	
Total (Nb de trames)		543	543	
Total (Octets)		28 892	17 128	

Table 8.7: Répartition de la consommation énergétique d'un noeud feuille avec et sans un LDO

	Avec LDO		Sans LDO	
Budget Energétique	Energie (J)	Pourcentage	Energie (J)	Pourcentage
LDO	18.38	82%	-	0%
Radio Tx	0.59	3%	0.59	14%
Radio Rx	0.20	1%	0.20	5%
CCA - Backoff - Attende d'Ack	0.03	<1%	0.03	1%
Réveil MSP	2.09	9%	2.09	51%
MSP + veille RF	1.22	5%	1.22	29%
Total (J)	22.51		4.13	
Courant moyen consommé ($(\mu$A)	86.8		15.9	
Durée de vie espérée (Années)	1.31		7.16	

- η est le rendement donné par la courbe ci dessus (compris entre 0,53 et 0,6)
- Conso_Capteur est la consommation du système derrière le LDO (MSP + Module RF).

Avec une consommation du nœud de 15 μA (calculée dans 8.7), la figure 8.1 nous donne un rendement du LDO correspondant à 0,57. En utilisant l'équation 8.4, on obtient une consommation totale du système de 57,9 μA, ce qui signifie que la consommation du LDO seul est de 40 μA, ce qui n'est pas acceptable.

Pour assurer une conception efficace, cet élément doit être supprimé, et une batterie de tension 3V doit être sélectionnée et connectée directement à l'alimentation de la plateforme. La régulation de tension n'est pas obligatoire, car tous les composants utilisés sur notre plateforme peuvent fonctionner avec une tension comprise entre 2,1 et 3V, correspondant à la plage de tension de la batterie durant sa durée de vie. Cependant, une attention particulière doit être apportée au comportement de ces composants, par rapport à la baisse de la tension (précision de la sonde, dérive des horloges).

Après la suppression du LDO dans cette architecture, la plus grosse partie de le consommation d'énergie est due aux réveils du MSP430 (51%). Le mode veille du module RF et du MSP430 représentent la seconde plus grosse consommation (29%). C'est un résultat intéressant, car la majorité de la littérature sur les consommations énergétiques dans les réseaux de capteurs considèrent le module RF comme le consommateur énergétique principal [130]. Bien que cela soit vrai à la vue des consommations instantanées intégrées sur une longue période, cela peut ne pas être vrai, en particulier quand le trafic est très bas comme dans notre cas où l'on a une remontée de trame applicative toutes les 10 minutes.

La durée de vie espérée est calculée avec une batterie de 1000 mAh. Elle atteint 7,16 ans, après suppression du LDO, ce qui est conforme aux critères de durée de vie visés par ces noeuds pour des applications d'instrumentation des bâtiments. Comme point de comparaison, la consommation et la durée de vie espérée de ce design est améliorée par un facteur 5 après la suppression du LDO. Quand on injecte les caractéristiques des modules ATRF230 et CC1120 dans notre modèle, ces architectures permettent d'atteindre des durées de vie similaires, autour de 7,1 ans, et que leurs répartitions d'énergie sont très proches l'une de l'autre. La durée de vie de la plate forme embarquant le module ATRF230 peut atteindre 2 ans de plus, grâce à sa consommation moindre. En effet, la grande différence d'énergie mentionnée plus haut entre ces modules est pondérée par la proportion mineure du module RF dans la consommation totale.

Impact de la Batterie

Si le noeud est alimenté par une batterie 3V, la tension va chuter durant la durée de vie du noeud, impactant les opérations du noeud. En particulier, le design original de la plate forme MICA décrite dans [29], n'a pas prêté attention à la tension de coupure des éléments du système, menant à une mort prématurée du noeud et gâchant plus de la moitié de l'énergie totale disponible dans la batterie. Notre design initial embarquant un régulateur de tension offrait de mauvaises performances énergétiques à cause du mauvais rendement du LDO. Le design du Telos décrit dans [30] a fixé ce problème en sélectionnant des composants capables de fonctionner jusqu'à la tension de coupure de la batterie qui est de 1,8V pour des piles alcalines AAA. Dans notre cas, nous avons sélectionnée une batterie 3V d'une capacité de 1000 mAh et un courant d'auto décharge inférieur à 1% par an, et une tension de coupure de 2V. La documentation du MSP430 mentionne que le MCU requiert une tension minimum de 2,2V pour fonctionner à 16 MHz. Cela signifie que le système pourrait s'éteindre plus tôt que l'épuisement complet de la batterie. En réalité, nous avons observé que le MSP430 était capable de fonctionner à 16 MHz,

même avec une tension d'alimentation aussi basse que 1,8V, signifiant que la totalité de l'énergie de la batterie sera utilisée.

Nous avons calculé l'impact du courant d'auto décharge de 1% sur la durée de vie du noeud en retirant chaque année 1% de l'énergie restante dans la batterie. En prenant un courant moyen consommé de 15,9 μA considéré dans le dernier exemple, nous avons trouvé que la durée de vie du noeud descendrait à 6,88 années, ce qui représente une perte de 3,9 % comparé à la durée de vie originale de 7,16 ans espérée.

8.1.5 Améliorations envisagées

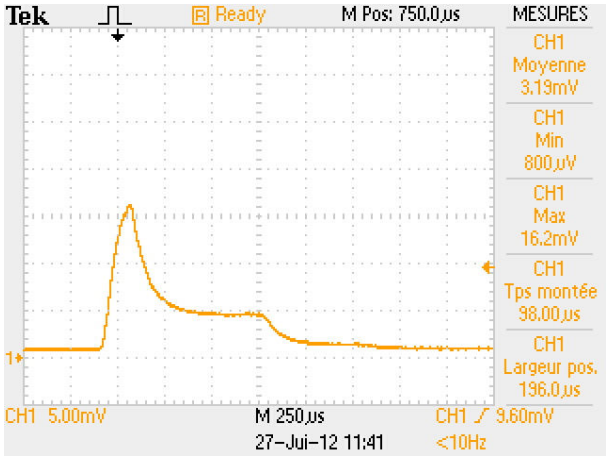
Optimisation de la consommation du micro-controleur

Les résultats présentés dans le tableau 8.7 montrent que le bénéfice le plus significatif est obtenu dans la réduction de la consommation instantanée du MCU durant ses périodes actives et de standby. Pour abaisser le budget énergétique des réveils périodiques, nous pouvons réduire le coût de chaque réveil et diminuer la fréquence de réveil.

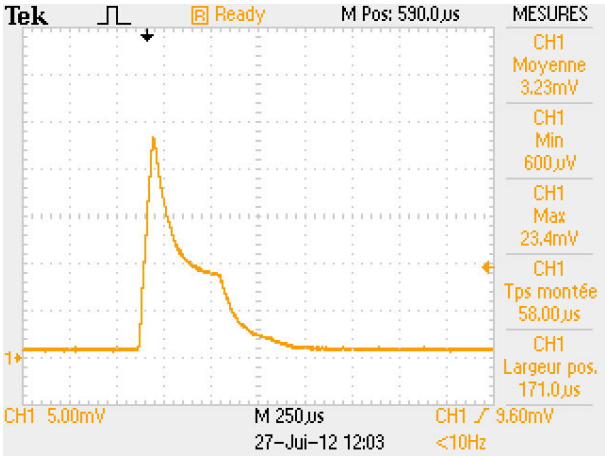
Pour réduire le coût énergétique de chaque réveil, nous avons étudié les différentes tâches logicielles exécutées durant chaque réveil. Par défaut, Contiki exécute différentes tâches périodiques régulées par des temporisateurs qui ne sont pas forcément nécessaires dans notre scénario. Par exemple, nous avons désactivé les temporisateurs liés à la maintenance du routage, étant donné que les noeuds feuilles ne font pas de routage. Nous avons également diminué la périodicité des temporisateurs de découverte des voisins et de vérification des process en cours, car notre application ne requiert pas de contraintes temps réel.

Nos résultats du tableau 8.3 montrent qu'il est profitable de diminuer la fréquence de réveil aussi bas que possible. Dans notre scénario d'instrumentation de bâtiment, nous voulons tout de même garder une réactivité acceptable du système, donc une fréquence de réveil de 1 Hz est un bon compromis entre efficacité énergétique et réactivité. Nous avons également activé la fonction de réveil rapide du MSP qui permet de passer le temps de réveil de 150 μs à 5 μs.

Table 8.8: Profils des courant consommés lors des réveils du MSP430 à différentes fréquences de fonctionnement



a. Moyenne des réveils à 8 MHz



b. Moyenne des réveils à 16 MHz

En recalculant l'énergie moyenne dépensée lors de chaque réveil après ces optimisations de

la même manière que pour le tableau 8.3 mais avec les nouvelles mesures du tableau 8.8, nous trouvons une énergie moyenne de 2.4 μJ pour une fréquence de fonctionnement de 16 MHz et 2.37 μJ à 8 MHz, ce qui est respectivement 2,3 et 2,6 fois moins qu'avant ces optimisations.

En plus de cette réduction d'énergie pour chaque réveil, la fréquence de réveil la plus basse déplace le courant consommé moyen de 15,9 μA à 9.1 μA, ce qui veut dire que la durée de vie espérée passe de 7,16 à 12,55 années, ce qui correspond à une amélioration de 75%. En particulier, le budget énergétique des réveils du MSP sont passés de 51% à 13% de l'énergie totale consommée par le noeud.

Le budget énergétique de la veille du MSP a également été diminué avec l'utilisation d'un oscillateur interne basse consommation, qui n'était pas activé dans la simulation présentée dans le tableau 8.7. Avec cette configuration, nous mesurons le courant consommé en veille. Il passe de 4,3 μA à 1,2 μA. En injectant cette nouvelle valeur dans notre modèle, nous trouvons que le courant moyen consommé par la plateforme tombe à 5,9 μA, représentant une durée de vie théorique de 20,23 ans sur une pile 1000 mAh, soit une amélioration de 54% comparé au cas précédent.

Optimisation de la consommation de la partie RF

Nous décrivons ici les optimisations supplémentaires qui sont évaluées à travers notre modèle, mais qui n'ont pas été implémentées. Pour l'instant, notre modèle nous indique que la prochaine optimisation doit se concentrer sur les transmissions RF qui représentent désormais 39% du budget énergétique total. Diminuer la puissance de transmission n'est pas une option viable pour nous, cas nous voulons fournir la plus grande couverture RF possible. Les interférences pouvant êtres occasionnées par ces longues portées ont un impact limité sur notre réseau, car le trafic est faible, ce qui diminue les risques de collision. Nous nous concentrons plutôt sur la limitation du nombre de messages envoyés. D'après l'activité RF présentée dans le tableau 8.6, il apparaît que 49,7% correspond à des NS/NA, 13,6% sont des messages RPL, et les 36,7% restant sont des données applicatives. Nous ne pouvons pas réduire le nombre de messages applicatifs, car cela viendrait à l'encontre des besoins applicatifs, mais nous pouvons réduire les quantités de messages RPL et les NS/NA. Pour l'instant, nous avons besoin d'un échange NS/NA toutes les 10 minutes entre un noeud feuille et son parent, mais nous pourrions augmenter cette période, au prix d'une plus grande latence pour les messages descendants, et une vérification des liens moins fréquente. Cependant, si nous avons des remontées de données toutes les 10 minutes, le lien est régulièrement vérifié durant ces transmissions, et nous pourrions imaginer de supprimer les échanges NS/NA avec quelques modifications du mécanisme de découverte de voisinage implémenté dans Contiki. Pour être compatible avec notre mécanisme de transmission des trames descendantes, le flag "Data_pending" pourrait également être déplacé dans les acquittements des trames applicatives. Dans ce cas, les messages de données seraient utilisés pour mettre à jour la métrique ETX et vérifier le lien vers le parent, limitant le surcoût de messages aux messages RPL uniquement.

En injectant la suppression des échanges NS/NA dans le modèle, le courant moyen consommé par le noeud descend à 4 μA, conduisant à une durée de vie estimée de 28,5 ans, représentant une nouvelle améliorations de 47% comparé au cas précédent.

Analyse de la consommation de la sonde de mesure

Le tableau 8.9 liste les différentes sondes que nous considérons et leur consommation relative.

Le tableau 8.9 montre qu'embarquer la sonde de CO2 sélectionnée sur un noeud alimenté par batterie n'est pas réalisable, car le courant constant de 20 mA requis par cette sonde épuiserait

Table 8.9: Type de sonde et consommation correspondante

Type de sonde	Référence	Consommation
Température	TI TMP112	7 μA (actif) / 0.5 μA (veille)
Température/Humidité	Sensirion SHT21	300 μA (actif) / 0.15 μA (veille)
PIR	PANASONIC EKMB1103112	1,9 μA (actif) / 1 μA (veille)
Ouverture de porte/fenêtre	Meder KSK-1A66-1015 + aimant M4	1 pull-up de 50k sous 3 V = 0.6 nA
Luminosité	TAOS TSL2561T	240 μA (actif) / 3,2 μA (veille)
CO2	AlphaSense IRC-A1	> 20 mA

une batterie 1000mAh en seulement 2 jours ! A l'opposé, la sonde d'ouverture de porte/fenêtre consomme très peu d'énergie, car elle utilise une ampoule ILS, qui ne requiert pas énergie pour fonctionner.

Pour les autres sondes, nous notons une différence importante entre les consommations des modes actif et de veille, ce qui signifie qu'elles doivent avoir un taux d'activité faible pour être efficace embarquées sur une plateforme énergétiquement contrainte.

La sonde PIR ne peut pas être optimisée, car elle embarque un code qui la réveille automatiquement quand elle détecte quelque chose, et retourne en mode veille après 2 s.

Pour la sonde de luminosité, le MCU doit déclencher une fenêtre de mesure et récupérer la valeur acquise. De ce fait, le MCU peut rester en mode veille pendant cette phase d'acquisition de la sonde, et récupérer la valeur de luminosité au prochain réveil. La seule voie d'amélioration est le temps de la fenêtre d'acquisition de la sonde et sa périodicité.

Les sondes de température et de température/humidité nécessitent des calculs de la part du MCU. Cela signifie que le MCU a besoin d'être actif quand il récupère ces valeurs, ce qui augmente de manière substantielle le coût global de la lecture de la sonde. Dans ce cas, il y a deux axes d'améliorations : la périodicité de la mesure, et le temps nécessaire pour faire la mesure. La périodicité de la mesure peut être diminuée, de même que pour la sonde de luminosité, car l'humidité et la température sont des grandeurs qui ont une faible dynamique. Pour la sonde SHT21, le temps nécessaire pour faire les mesures dépend de la précision. Pour une précision maximale, une mesure de température sur 14 bits requiert un temps maximal de 85 ms, et une mesure d'humidité sur 12 bits a besoin d'un temps maximal de 29 ms. Globalement, le MCU a besoin d'être actif durant 114 ms, si l'on veut bénéficier de la précision maximale de cette sonde. Ce temps descend à 15 ms seulement pour une précision de 8 bits sur l'humidité et de 11 bits sur la température. La sonde TMP112 a une précision par défaut de 12 bits, et un mode étendu qui peut être activé pour mesurer des températures plus grande que +128 C, ce qui dépasse le cadre de notre besoin. En accord avec la documentation technique [133], le temps de conversion maximal pour une température sur 12 bits est de 35 ms.

Le tableau 8.10 donne la consommation de chaque sonde en fonction de sa configuration. Il mentionne également leur part relative dans le budget énergétique total, en considérant une plateforme bénéficiant des dernières améliorations implémentées comme présentées précédemment. Ce tableau montre qu'embarquer une sonde sur un noeud peut impacter de manière significative la puissance moyenne consommée par le noeud, et qu'une attention particulière doit être apportée à sa configuration et à son usage. Nous voyons également qu'une grande précision peut grandement impacter la durée de vie du noeud. Par exemple, l'utilisation de la précision maximale du SHT21 peut réduite d'un facteur de plus de 10 la durée de vie espérée du noeud, comparé à l'utilisation de cette même sonde avec la précision moindre. Des améliorations supplémentaires peuvent être réalisées avec l'utilisation de la sonde de luminosité, si la fenêtre

d'acquisition est réduite, au prix d'une précision moindre sur la mesure.

Table 8.10: Consommation de différentes sondes en fonction de leur configuration

Type de sonde	Mode / Période	Puissance (μW)	Durée de Vie (années)	Partie de l'énergie totale (%)
Plateforme nue	-	16.92	20.23	-
Température	précision sur 12 bits / 10 s	56	4.69	77
Temperature	précision sur 12 bits / 60 s	10,62	12.43	39
Température/ Humidité	Précision maximale / 10 s	186	1.64	90
Température/ Humidité	Précision maximale / 60 s	31.8	6.43	60
Température/ Humidité	Précision minimale / 10 s	25.2	7.34	54
Température/ Humidité	Précision minimale / 60 s	4,6	13,18	18
PIR	1 détection chaque minute	3.18	17.03	16
Ouverture de Porte/Fenêtre	1 vérification chaque s pendant 10 μs	0.0018	20.23	< 1
Luminosité	1 mesure toutes les 10 s pendant 250 ms	26.9	7.80	61
Luminosité	1 mesure toutes les 60 s pendant 250 ms	12.5	11.61	43

8.1.6 Conclusion

Dans cette section, nous avons conduit l'étude énergétique complète d'une plateforme de réseau de capteurs sans fils. Nous avons identifié les différents éléments du noeud, et modélisé leurs consommations énergétiques en nous basant sur des mesures réelles. En particulier, nous avons discuté de l'importance de la consommation énergétique du MCU, du module RF, de l'influence de la batterie et de l'impact énergétique d'une large gamme de sondes. Nous avons mis en évidences des paramètres clés auxquels une attention particulière doit être portée quand on cherche à réaliser une architecture basse consommation. Nous avons étudié, proposé, implémenté, quantifié et validé un certain nombres d'améliorations énergétiques pour arriver à une plateforme communicante disposant d'une durée de vie estimée à de plus de 20 ans sur une pile 1000 mAh avec une période de remontée applicative de 10 minutes. Dans le futur, nous prévoyons des optimisations supplémentaires de la sonde, et d'alimenter notre plateforme avec un système de récupération d'énergie tel qu'un panneau solaire, pour réaliser un noeud autonome en énergie pour des application d'instrumentation des bâtiments. Etant donné la consommation moyenne de notre plateforme qui peut atteindre une valeur inférieure à 17 μW, nous sommes assez confiant dans la réalisation de cette architecture.

8.2 Optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs CPL

Optimiser l'énergie sur un média par nature non-contraint en énergie peut sembler surprenant. En réalité, ce raisonnement fait l'hypothèse que l'approvisionnement en énergie n'est pas un problème, ou représente un surcoût négligeable, ce qui devient faux lorsqu'on considère le grand nombre d'appareils supplémentaires qui seront amenés à communiquer. De plus, il est fréquent

de confondre la puissance et l'énergie, car il est facile de penser qu'une consommation de quelques Watts de pèsera pas lourd dans la balance énergétique. Or si l'on intègre la consommation de ces petites charges sur des périodes de 24h (car les appareils CPL sont toujours alimentés par le réseau électrique), leur coût énergétique se révèle rapidement substantiel. A titre d'exemple, un module CPL avec une consommation de 1W (consommation typique d'un module Homeplug) pilotant une ampoule consommera 24 Wh par jour, soit l'équivalent de 4 heures d'éclairage d'une ampoule à économie d'énergie de 6W, quelque soit l'utilisation de l'ampoule qu'il faudra donc ajouter. Il est évident qu'un tel système n'a pas de sens dans une optique de réduction des consommation d'énergie. Si l'on considère en plus de cette consommation fixe importante le nombre d'appareils qui sont amené à être connectés dans les prochaines années, cela amènera un surcoût énergétique important, ce qui est l'effet inverse de celui recherché pour des applications de maison intelligentes par exemple.

La consommation électrique d'un appareil a des implications fortes sur sa taille et son coût. En effet, le dimensionnement de l'alimentation impacte directement le dimensionnement et donc la taille et le coût des éléments qui la compose. Or ces deux paramètres sont critiques pour permettre un déploiement à large échelle des solutions de réseaux de capteurs et ils doivent être minimisés.

A notre connaissance, le technologie WPC de Watteco et son principe de pulse présenté au chapitre 3 est la seule technologie à offrir une très basse consommation. La technologie repose sur un couplage direct avec le réseau électrique, et produit des impulsions électromagnétiques sur le secteur, sans passer par un module d'alimentation externe. Ainsi, le module n'est pas isolé du réseau électrique et son front end analogique est très simple, donc très petit, peu cher et efficace en énergie.

La consommation d'un module WPC est de 10 mW, soit 100 fois moins qu'une solution de type Homeplug. Ces différences de consommation s'expliquent d'une part par le principe de couplage mais également par les besoins en ressources matérielles, le module Homeplug nécessitant un DSP performant afin de gérer la modulation et la démodulation OFDM. Le WPC quant à lui se contente d'un petit micro-contrôleur 8 bits et d'une modulation en pulse très simple à générer et à décoder.

Dans l'optique de la réduction des consommation énergétiques, la technologie WPC nous semble donc la solution CPL la plus adaptée.

8.3 Utilisation de réseaux hybrides RF/CPL

Dans le contexte du déploiement d'un réseau de capteurs dans un bâtiment, les capteurs qui sont éloignés de la station de base utilisent des communications multi sauts pour remonter leurs valeurs. Ainsi, les noeuds qui sont proches du puit de collecte vont devoir relayer les paquets de ces capteurs distants et voir leur énergie diminuer beaucoup plus rapidement à cause de cette surcharge d'activité à traiter. Cette surconsommation concentrée autour du point de collecte des données peut provoquer la mort prématurée de ses noeuds et donc casser les chemins vers les noeuds distants. Par conséquence, le réseau ne sera plus en mesure de répondre aux besoins applicatifs et la durée de vie du réseau sera tronquée.

Pour limiter ce problème, la charge de trafic peut être distribuée de manière plus homogène parmi les noeuds du réseau en introduisant dans la topologie quelques noeud particuliers non contraints en énergie qui vont délester les noeuds sur pile d'une partie de leur charge. Ces noeuds peuvent par exemple êtres alimentés sur secteur et bénéficier d'une interface CPL. Des passerelles RF/CPL peuvent ainsi être créées, afin de jouer le rôle de puits de collecte tout en étant plus petits, moins chers et moins consommateurs d'énergie que des machines de type mini PC. Ces passerelles peuvent être ajoutées au réseau pour allonger la durée de vie globale du réseau. Un

gain significatif sur le coût du déploiement du réseau peut être obtenu par l'usage de passerelles RF/CPL, car elles sont connectées à une infrastructure CPL utilisant les câbles existants. La densité de cette infrastructure dans le bâtiment réduira le nombre de sauts entre les noeuds RF et sa passerelle dédiée, réduisant ainsi le relayage des paquets et donc la consommation énergétique.

La solution optimale pour atteindre la consommation la plus basse pour des appareils RF est de déployer des passerelles de telle sorte que la distance entre les noeuds RF et sa passerelle RF/CPL dédiée soit égale à 1 saut. Comme montré dans le chapitre 7, comme la plupart des branches de l'installation électrique du bâtiment convergent vers le tableau électrique, la distance entre la passerelle RF/CPL et le tableau électrique qui va récupérer ces données est égale à quelques sauts maximum. Dans nos tests, nous avions un maximum de 2 sauts entre 2 points du réseau électrique avec un nombre réduit de points CPL. Nous pouvons donc avoir un nombre réduit de sauts si le routeur de bordure est localisé au niveau du tableau électrique, grâce à l'utilisation d'appareils connectés supplémentaires sur le réseau qui offriront des chemins alternatifs et potentiellement meilleurs.

Dans notre vision, un réseau hétérogène est composé de capteurs et de passerelles RF/CPL. Les capteurs envoient leurs paquets à la passerelle RF/CPL la plus proche qui les relaient sur une infrastructure CPL. Cette dernière est en charge de leur relayage à la station de base pour de futurs traitements. Pour atteindre la durée de vie optimale du réseau, chaque noeud alimenté par batterie doit être à une distance de 1 saut d'un noeud CPL. Dans notre cas, chaque capteur doit être capable d'atteindre une passerelle RF/CPL en un saut. Cela peut être obtenu par la résolution du problème de placement optimal des passerelles RF/CPL [134].

Ce réseau hétérogène pour bâtiment intelligent peut être modélisé avec un DAG connecté à une infrastructure CPL. Les capteurs se situant à la base du DAG sont connectés aux passerelles RF/CPL (voir la figure 8.2).

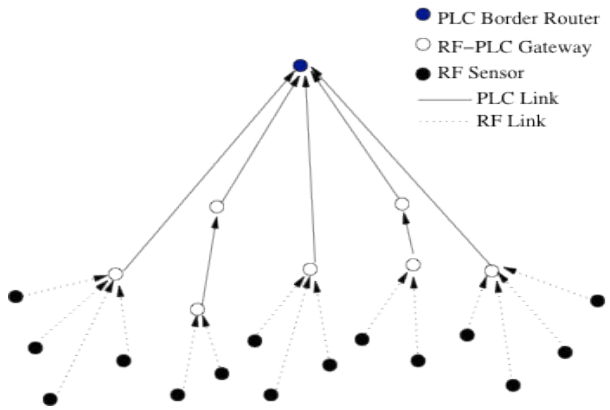


Figure 8.2: Proposition d'architecture de réseau hétérogène

Etant donné les performances d'un réseau CPL utilisant la technologie WPC, cela peut offrir une très bonne infrastructure de base pour un réseau de capteur déployé dans un bâtiment. Les expérimentations montrent que chaque prise électrique d'un bâtiment peut être jointe avec une bonne fiabilité et une latence moyenne de 1,2 secondes. Ces performances sont acceptables compte tenu du bénéfice sur la durée de vie par rapport à un réseau de capteurs sur pile (Il s'agit d'un compromis entre la durée de vie du réseau et ses performances). De plus, l'exemple présenté ici optimise le réseau selon une métrique de fiabilité, mais d'autres métriques ou contraintes peuvent être sélectionnées pour former le DAG en fonction des contraintes applicatives. RPL autorise plusieurs instances de DAGs sur un même réseau physique pour permettre de satisfaire

les besoins de plusieurs applications sur un même réseau.

Un autre problème qui peut être adressé grâce aux réseaux hétérogènes RF/CPL est l'augmentation significative de la couverture. Si la densité de noeud est faible, cela peut conduire à une faible diversité de chemin, et quelques points du réseau peuvent même se retrouver inaccessibles. Cela peut également se produire si un bruit affecte une zone particulière du bâtiment, ou un noeud par lequel la plupart des chemins passent. Parce que chaque média a ses propres perturbateurs, les bruits affectant le CPL n'affecteront pas les liens RF et vice versa. Ainsi, les noeuds qui ne peuvent pas être atteint via un média donné pourraient être atteint via un média alternatif dans un contexte hétérogène. Reposer sur plusieurs média est une valeur ajoutée importante vis à vis de la fiabilité, et peut offrir un meilleur accès aux zones "bruitées" ou éloignées (au sens du média utilisé). Par exemple, 2 étages peuvent être plus facilement reliés par un lien CPL, alors qu'une liaison RF peut présenter des difficultés à passer les dalles de béton.

Une attention particulière doit être apportée aux réseaux hétérogènes, en particulier si de grosses différences de performances existent entre les différentes technologies utilisées. Dans les approches classiques, le backbone permettant de relier les grappes de noeuds fonctionnent possède des performances réseaux plus importantes que les grappes elles mêmes [135]. Dans notre cas, la répartition des performances est inversée. Ainsi, les trames venant d'un réseau haute performance qui doivent être relayées sur un réseau basse performance peuvent créer des congestions. Si le débit est la métrique à optimiser, il semble plus indiqué d'utiliser le média le plus rapide (le médium RF dans notre cas). Cependant, l'utilisation prioritaire de noeud RF sur pile réduira sensiblement la durée de vie du réseau. A nouveau, il s'agit d'un compromis à trouver entre 2 caractéristiques.

8.3.1 Prérequis et faisabilité

Notre vision des infrastructures réseaux des futurs bâtiments intelligents place le CPL comme l'épine dorsale des communications entre capteurs. Notre vision repose donc sur un réseau hétérogène, multi-média, dont le routage des paquets est fait au niveau réseau, grâce à l'utilisation du standard IPv6 comme aggrégateur de technologies. Notre vision requiert donc l'utilisation d'IPv6 par les différents objets qui seront connectés dans le bâtiment. Grâce à nos travaux sur les protocoles adaptés au CPL [34] décrits dans le chapitre 5, ce prérequis est maintenant satisfait à la fois sur les capteurs RF et sur les noeuds RF/CPL.

Il est toujours possible qu'un capteur n'ai aucun voisin avec lequel communiquer. Dans ce cas, rajouter une passerelle RF/CPL dans son voisinage peut lui permettre de ne pas être déconnecté du réseau, mais cela implique une densité de noeuds importante pour assurer la couverture complète d'un bâtiment. Nous avons observé lors de nos déploiements que les noeuds CPL disposaient généralement d'un nombre de voisins important et que le DAG formé était de faible profondeur. Cela montre que le réseau CPL est fortement connecté, et que la probabilité qu'un noeud CPL ne puisse pas s'associer au réseau est faible. Nous avons par exemple observé lors de notre expérience au laboratoire CITI qu'au moins une prise de chacune des pièces testées du bâtiment avait pu être jointe directement depuis une même source CPL. Comme on peut raisonnablement penser qu'un capteur RF permettra de communiquer dans toute la pièce où il est installé, ainsi qu'avec les pièces adjacentes, une distribution homogène de passerelles CPL/RF devrait permettre de garantir la couverture totale d'un bâtiment tout en permettant des performances énergétiques optimales dans le meilleur des cas.

8.3.2 Etat de l'art des réseaux hétérogènes

Le principe de combiner des média contraints utilisant différents média est peu présent dans la littérature, car la plupart des réseaux de capteurs utilisent le standard IEEE 802.15.4 unique-

ment. Nous avons proposé l'adaptation de ce standard sur le CPL [34] afin de montrer l'intérêt de l'intéropérabilité entre différentes technologies. Nous pensons que la convergence de différentes technologies adaptées aux médias contraints par l'intermédiaire d'adaptations telles que 6LoWPAN [31] vont se poursuivre au fur et à mesure des évolutions des technologies et qu'elles bénéficieront ainsi naturellement des travaux de la communauté des réseaux de capteurs [54] [136].

L'utilisation de l'hétérogénéité des média pour améliorer les réseaux de capteurs n'est pas une idée récente. Les travaux [137] montrent par exemple que l'introduction de puits ou de relais qui ne sont pas contraints en énergie pour collecter les données améliore considérablement la durée de vie du réseau. La majorité des études partent du principe que la communication entre les puits de collecte ou les relais et la station de base utilisent des technologies haut débit telles que WiFi ou Ethernet. De plus, dans les tests menés, les puits sont la plupart du temps des machine de type mini PC qui accroissent de manière significative le coût de déploiement de ces solutions, en particulier pour les réseaux à large échelle.

Nos travaux démontrent l'intérêt de l'intéropérabilité au niveau IP entre les média et mettent en évidence l'écart avec les travaux qui ne considèrent pas cette convergence via IPv6. [46] montre qu'un taux de livraison de paquet de 70% sur CPL et de 82 % sur RF peut atteindre 90% quand les 2 média coopèrent. Dans [47], les auteurs comparent 3 méthodes de communication différentes pour démontrer que la combinaison du CPL et de la RF améliore de manière significative la qualité des communications.

8.3.3 Motivations

Intégrer la technologie CPL aux réseaux de capteurs sans fils dans une topologie commune présente les avantages suivants :

- **Augmentation de la durée de vie globale** : Pour des noeuds alimenté par batterie, leur durée de vie découle directement de la consommation énergétique et représente la principale contraintes de ces capteurs [134]. Comme nous l'avons démontré précédemment, la technique la plus communément utilisée est basée sur des réveils périodiques du système [138]. De plus, nous proposons de relayer la majorité du trafic sur le CPL, dont les noeuds ne sont pas contraints par la quantité d'énergie disponible.

- **Augmentation de la fiabilité** : Offrir un média alternatif tel que le CPL à un réseau augmente de manière significative la diversité des chemins de routage et peut permettre de mieux faire face aux variations de la qualité des liens. Comme le CPL et la RF ne sont pas sensibles aux mêmes perturbations, une réseau hybride offre des chemins globalement plus fiables par l'utilisation de ces 2 média.

- **Réduit le relayage** : Le CPL peut atteindre en un saut des zones qui nécessiteraient de multiples relais RF. L'utilisation du CPL peut donc aider à réduire le nombre de sauts nécessaires pour atteindre des noeuds "distants" de la racine du réseau. Dans un contexte d'instrumentation d'un bâtiment, un saut par l'intermédiaire du CPL peut permettre de traverser plusieurs étages alors que des liens RF peuvent être bloqués lors du franchissement des étages.

- **Augmentation de la connectivité** : Le CPL peut atteindre des zones qui peuvent être inaccessibles via un lien RF. Aussi, un réseau CPL augmente la connectivité dans les réseaux sans fils peu denses.

8.3.4 Proposition d'architecture

En nous basant sur un design centré autour du standard IPv6, nous proposons l'architecture suivante, conçue selon le principe du "route-over" (le routage est effectué dans la couche réseau, afin d'abstraire les différentes technologies PHY/MAC utilisées).

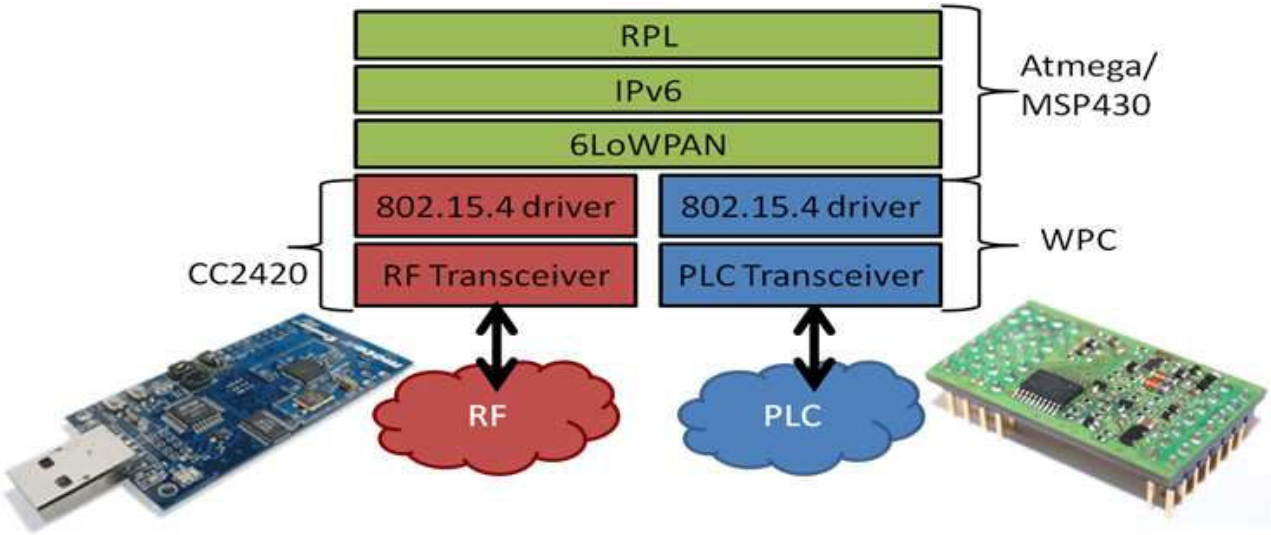


Figure 8.3: Proposition de pile protocolaire

Notre architecture peut être composée de noeuds RF uniquement, de noeuds CPL uniquement ou de noeuds hybrides RF/CPL. Les topologies suivantes illustrent le bénéfice du CPL quand on l'intègre à une topologie composé de noeuds RF uniquement. Conformément à la spécification de RPL [38], les topologies formées sont des DAG. Nous supposons que chaque noeud utilise une implémentation commune de RPL et maintient un chemin vers la racine du DAG, en fonction de la métrique de routage sélectionnée.

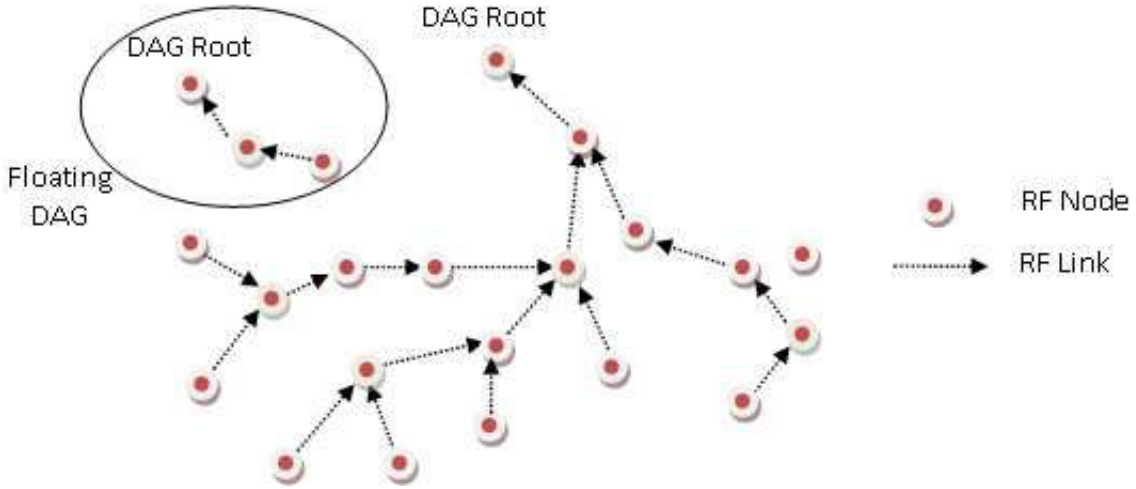


Figure 8.4: DAG uniquement RF

Nous supposons ici que la métrique sélectionnée est une estimation de l'énergie du noeud. Pour réduire leur consommation, les noeuds RF peuvent réduire leur puissance de transmission, ce qui réduit la portée RF et crée une topologie multi sauts.

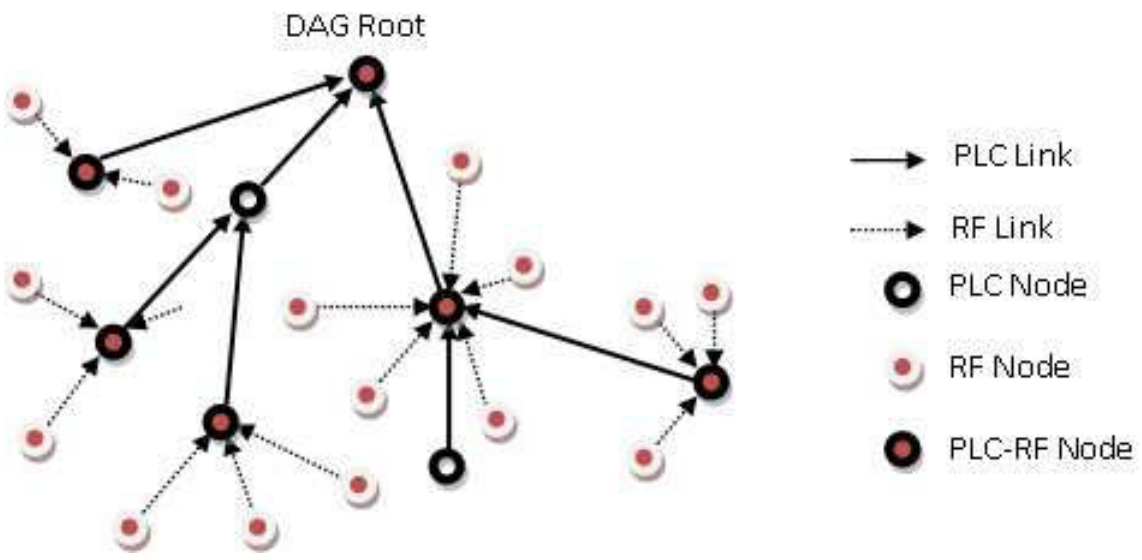


Figure 8.5: DAG Hétérogène

En fonction de la fonction objective (OF) et de la métrique utilisée, plusieurs topologies peuvent être obtenues. Comme définit dans [58] cela inclut l'énergie du noeud, le débit, la latence ou la fiabilité des liens (soit "Link Quality Level (LQL) basé sur les données remontées par le module communicant, soit ETX[115]). Pour maximiser la nature non contrainte en énergie du CPL, nous supposons que la métrique sélectionnée dans ce cas est l'estimation énergétique de chaque noeud, permettant de sélectionner le chemin qui consomme le moins d'énergie. La métrique de fiabilité ETX est utilisée comme un second niveau de décision en cas de coût égal entre 2 chemins.

		DAG RF	**DAG PLC + RF**
A	Profondeur du DAG	6	3
B	Nombre moyen de sauts sur le média RF	3.78	1 (1)
C	Nombre moyen de sauts dans le DAG	3.78	2.26
D	Estimation de la durée de vie du DAG	T	17*T
E	Nombre de noeuds inaccessibles	3	0

Table 8.11: Comparaison des caractéristiques du DAG

(2) est calculé avec la formula suivante : max(card(subDAG(N)))*T pour chaque N, où :

- N est un noeud dans un DAG donné

- subDAG(N) est le groupe de noeuds qui ont le noeud N dans le chemin vers la racine

- T est la durée de vie d'un noeud qui ne relaye aucun paquet

- **A :** Reflète le longueur maximum des chemins dans le DAG en nombre de sauts. On observe que le CPL permet de réduire cette valeur de moitié.
- **B :** Reflète le nombre moyen de relayages effectué par les noeuds RF. Dans notre cas, le CPL permet d'éviter l'utilisation des noeuds RF pour router des paquets (voir (1)). Cette

configuration limite donc la charge des noeuds RF à leur propre paquets et les déleste de leur fonction de routeur. Ces noeuds fonctionnant sur batterie, la configuration RF/CPL présentée correspond donc à un optimum énergétique et une maximisation de la durée de vie du réseau.

- **C :** Reflète la longueur moyenne des chemins dans le DAG. Le CPL réduit cette longueur moyenne grâce à l'ajout de nouvelles routes.
- **D :** Compare relativement les durées de vie de la solution RF et de la solution hybride. T correspond au temps au bout duquel le premier noeud du réseau épuise toute son énergie. Dans le cas du DAG uniquement RF, le premier noeud sous la racine est le point faible, car il doit relayer les messages de son sous arbre qui correspond ici à tout le réseau, composé de 17 noeuds. Dans le cas de la topologie hybride, ce noeud est délesté de sa charge de routage, ce qui permet de diviser son activité RF et donc sa durée de vie par 17 dans le cas ou le trafic de données est dominant.
- **E :** Reflète la partition du réseau. Le CPL crée de nouveaux liens qui peuvent permettre de joindre des noeuds inaccessible par un lien RF.

8.3.5 Conclusion

En nous basant sur les observations, les modèles et les tests précédents, les avantages et inconvénients de l'intégration du CPL bas débit aux réseaux RF de type IEEE 802.15.4 sont :

Avantages	**Inconvénients**
Augmentation de la durée de vie	Augmentation de la latence moyenne
Augmentation de la diversité des chemins	Diminution du débit moyen
Réduction du relayage	
Augmentation de la fiabilité	

L'intérêt de mixer le CPL avec les réseaux de capteurs sans fils existant dépend des contraintes applicatives. Il est clair que l'intégration du CPL est un bénéfice pour la durée de vie et la diversité des chemins, et que le CPL peut être utile pour réduire la longueur des chemins et augmenter la fiabilité. Cependant, un compromis doit être trouvé vis à vis de l'impact sur les performances réseaux. La durée de vie étant le principale contrainte des réseaux de capteurs sans fil, nous croyons fermement en l'intérêt du CPL. Il est également important de noter que tous les inconvénients présentés peuvent être compensés par le développements de futurs technologies CPL plus performantes ou par l'utilisation de technologies plus performantes telles que Homeplug ou WiFi. Cepedant, cela se ferait au détriment de la consommation énergétique, du coût et de la taille des appareils à utiliser. L'emploi de telles technologie n'est pas compatibles avec les contraintes de notre cas d'usage d'instrumentation des bâtiments.

Chapter 9

Conclusion Générale

9.1 Accomplissements

9.1.1 Pertinence du CPL pour les réseaux de capteurs

Les spectre des applications de réseaux de capteurs est très large et la variété des contraintes qu'elles induisent nécessite de nombreuses technologies dont le CPL est un candidat. En particulier, les environnements tels que les maisons, les bâtiments, les sites industriels ou les villes dans lesquels un réseau électrique est déjà déployé justifient l'utilisation du CPL car il ne nécessitera pas de surcoût de câblage. Le réseau électrique étant le plus grand réseau câblé au monde [81], son utilisation comme un média par l'intermédiaire du CPL permet de rentabiliser d'autant plus ces infrastructures et d'atteindre l'immense majorité des utilisateurs. Le CPL et en particulier la technologie WPC s'inscrit naturellement dans les efforts de développements des réseaux de capteurs car il répond aux mêmes contraintes de taille, de prix et de consommation d'énergie à maîtriser. Par nature, la technologie CPL permet également de s'affranchir des contraintes d'approvisionnement en énergie, qui reste la première des contraintes des réseaux de capteurs sans fil. Durant cette thèse, nous avons montré que cette technologie présente des contraintes similaires aux solutions RF telles que IEEE 802.15.4 et que son utilisation était justifiée pour des applications de réseaux de capteurs [34]. Nous avons situé la technologie CPL par rapport à l'état de l'art des réseaux de capteurs et déterminé que les protocoles dédiés à ces réseaux tels que 6LoWPAN et RPL étaient parfaitement compatibles avec ce média. Dans la description détaillée des technologies CPL existantes, nous avons identifié et positionné la solution WPC pour des applications de réseau de capteurs.

Les déploiements effectués au cours de cette thèse [37] ou par ailleurs, [33, 73] montrent que le CPL est un média alternatif et crédible face aux solutions RF concurrentes et confortent notre opinion quant à la pertinence de ce média.

9.1.1.1 Revue du CPL

La technologie CPL a connu son premier succès en tant que médium de communication dans les années 80 à 90 grâce à la technologie X10 [76], pour des applications domotiques principalement. Depuis cette date les solutions domotiques se sont plutôt tournées vers des technologies RF, qui permettent de s'affranchir de la contrainte des câbles. Le CPL est revenu un enjeu technologique ces dernières années grâce à la multiplication des appareils fixes et connectés dans les logements, notamment autour d'applications multimédia ou de réseau domestique. Il n'est pas à exclure que la sensibilisation du public aux incertitudes sur les conséquences sanitaires de l'exposition aux ondes électromagnétiques a joué en faveur des solutions CPL plutôt que RF, en particulier dans les logements. Le développement des technologies hauts débits, poussées par des alliances industrielles telles que Homeplug ont permis de démocratiser le CPL comme solution réseau domestique alternative au Wifi. Pour preuve, cette technologie a désormais remplacé la liaison Wifi entre certaines passerelle Internet et leur boîtier multimédia. Ce type de choix montre bien que la transmission CPL est crédible par rapport à des solutions RF déjà établies. Cependant, le CPL peine toujours à s'imposer dans le monde du bas débit, principalement par manque de standardisation et de maturité de ces technologies. Nous avons montré dans cette thèse que l'utilisation de ce média par l'intermédiaire de la technologie WPC permet de couvrir un bâtiment tertiaire en adoptant une solution de routage [42]. Nous avons observé dans nos expérimentations que la technologie CPL permettait d'assurer la couverture de toutes les zones d'un bâtiment, y compris les plus éloignées, en 2 sauts maximum. Nous avons ainsi confirmé la viabilité de la technologie WPC pour instrumenter un bâtiment, ainsi que les besoins d'un protocole de routage sur cette technologie. Ces expérimentation valident également le fonctionnement du standard IEEE 802.15.4 sur le média CPL que nous utilisons, démontrant la flexibilité de la

couche d'adaptation 6LoWPAN. Dans l'état de nos connaissances bibliographiques, il s'agissait de la première expérimentation de l'utilisation du protocole 6LoWPAN qui tend à montrer que le CPL est une solution idéale pour des déploiements locaux. A plus large échelle, les réseaux CPL seront raccordés à une infrastructure haut débit pour couvrir de larges zones géographiques.

9.1.1.2 La technologie CPL dans un contexte d'hétérogénéité des médias

La croissance des applications reposant sur des communications réseau ont permis l'émergence, le développement et la standardisation de nombreuses technologies. Leur développements se poursuivent, et améliorent sans cesse les performances des réseaux actuels. Nous ne pouvons prédire si une technologie donnée s'imposera comme une référence dans les prochaines années, d'autant plus qu'une seule technologie ne peut pas satisfaire tous les types d'applications. Nous pensons plutôt que le nombre des appareils connectés vont se multiplier, et qu'ils auront besoin de communiquer quelque soit leur nature. Pour cette raison, nous croyons à la convergence des médias grâce à un protocole commun et nous avons montré dans cette thèse que le standard IP était un candidat idéal [36].

Notre solution de réseau de capteurs sur la technologie CPL repose sur le standard IP, permettant des échanges de paquets avec d'autres technologies. En particulier, nous avons démontré que la création de réseaux hétérogènes mélangeant les technologies WPC et RF IEEE 802.15.4, permettait de dépasser l'utilisation indépendante de ces 2 supports. Nous avons ainsi proposé l'architecture d'un noeud hybride RF/CPL permettant de faire transiter les paquets entre ces 2 médias. Grâce à l'utilisation combinée de ces 2 médias, le nombre de chemins disponibles augmente et permet de faciliter le routage, en diminuant le nombre de sauts et le risque que certains noeuds du réseau soient inaccessibles. Ainsi, l'ajout de noeuds CPL et RF/CPL dans un réseau formé initialement de noeuds RF sur batterie permettait de prolonger leur durée de vie dans le réseau [40, 39]. Nous avons montré qu'à partir d'une grille de 5 x 5 noeuds RF fonctionnant sur batterie, l'ajout de noeuds hybrides RF/CPL permettait de multiplier la durée de vie du réseau par 7.

Nous avons conduit une étude énergétique de la consommation d'un noeud de réseau de capteurs RF en analysant les parties matérielles et logicielles [139]. L'analyse a montré qu'il était préférable d'utiliser une fréquence de fonctionnement du micro-contrôleur élevée et une fréquences de réveil la plus basses possible, et de maximiser l'utilisation des modes de veille profonde. L'utilisation de modules RF dans la bande 2,4 GHz permet d'atteindre les meilleurs performances énergétiques pour les faibles distances, mais les solutions inférieures au Ghz favorisent les longues portées. L'optimisation des paramètres des protocoles et des logiciels embarqué permettent d'atteindre les meilleurs performances de notre architecture basse consommation. L'étude énergétique de la sonde embarquée sur le noeud a montré que son mode de fonctionnement et la précision utilisée avait un impact important sur la consommation globale du noeud. Notre architecture finale présente une consommation totale inférieure à 17 μW, dans le cadre d'une remontée de données applicatives toutes les 10 minutes tout en garantissant le maintient de la connexion au réseau.

9.1.2 Solutions d'intégration du CPL à l'Internet des objets

Comme nous l'avons présenté dans le chapitre 2, l'internet des objets s'est très largement développé autour du standard RF IEEE 802.15.4. Ce standard a été conçu pour répondre aux contraintes des LLNs. Nous avons vu au chapitre 5 que de nombreuses similitudes existent entre les réseaux CPL bas débits et les réseaux RF basse consommation, et que le standard IEEE 802.15.4 pouvait également être une solution de niveau réseau pour le CPL [39]. Reposant sur le même format de trame que celui défini par le standard, notre adaptation sur CPL s'intègre

de manière transparente avec les réseaux contraints existants au niveau de la couche réseau. Nous avons justifié l'utilisation des protocoles standards développés par l'IETF sur la solution WPC. Notre approche repose en effet sur la couche d'adaptation 6LoWPAN entre les réseaux contraints et le standard IP, permettant l'intégration de ces réseaux aux infrastructures internet existantes. Nous avons également réalisé l'implémentation du module WPC et du média CPL dans le simulateur de réseau COOJA, permettant l'étude d'un réseau de capteur sur CPL dans un environnement maîtrisé. Notre approche 6LoWPAN sur une technologie CPL a depuis été reprise dans la spécification de la technologie G3 [33], et étendue à la technologie Bluetooth Low Energy (BT-LE) [140]. Ces choix nous confortent dans notre vision de la convergence des médias vers le protocole IP. Notre approche centrée sur le protocole IP permet de rendre transparent l'échange de paquets au niveau réseau, et l'utilisation du CPL comme un média générique[35]. L'utilisation de technologies CPL propriétaires ou ne bénéficiant pas de notre adaptation 6LoWPAN reste possible, par l'intermédiaire de passerelles. Cependant, cette solution nécessite du matériel supplémentaire et ne fournit pas un lien IP de bout en bout, ce qui présente un certains nombre de risques [141].

9.1.3 Importance du routage pour le CPL

Comme analysé dans le chapitre 6, la technologie WPC ne permet pas de joindre tous les points d'un bâtiment par un lien direct, Une solution de routage a donc été développée pour permettre de couvrir un bâtiment dans son ensemble.

Nos expérimentations montrent que notre solution CPL correspond aux critères des LLNs pour lesquels le protocole standard RPL a été conçu. Nous justifions l'utilisation de ce protocole de routage sur notre solution CPL [41, 37] , et validons son implémentation dans le cadre de 2 expérimentations menées dans des bâtiments tertiaires. Nous montrons avec succès le fonctionnement du protocole RPL, qui nous a permis de construire une topologie multi sauts de type arbre sur notre technologie CPL bas débit [42, 41]. Formées respectivement de 7 puis 26 noeuds CPL, les résultats montrent que le routage créé par RPL permet de couvrir un étage d'un bâtiment tertiaire avec une topologie de type arbre d'une profondeur de 3 sauts maximum. L'ajout du routage sur la technologie WPC a donc permis de s'affranchir de ses limites de propagations. Nous avons également montré que la technologie WPC permettait une connectivité importante entre les noeuds du réseau et que la qualité des liens est fortement dynamique, mais que le routage permet de s'adapter à ces variations. Nous avons également pointé les limites de notre solution CPL qui présente des délais importants et des débits faibles, générant des contraintes fortes sur les applications. L'ajout du routage sur le technologie WPC a permis de s'affranchir des limites de propagation, et de permettre à la technologie de s'adapter à des nombreux environnements.

9.2 Les limites et les améliorations possibles

La comparaison de nos performances avec celles des technologies RF a mis en lumière les principales limitations de la technologie CPL[36]. Les principales limitations concernent les débits et les latences. En effet, cette technologie offre un débit de 5 kbps au niveau physique (en utilisant le codage de Hamming) et induit un cadençage des trames toutes les 20 ms, afin de respecter la synchronisation avec la fréquence de 50 Hz du réseau électrique. Ainsi, les temps d'aller-retour moyens sont de l'ordre d'une demi seconde pour un échange de paquet local. Ces temps tombent à quelques millisecondes pour les solutions RF IEEE 802.15.4. De plus, les propagations RF peuvent être estimées par des modèles théoriques, notamment en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur, tandis qu'un modèle équivalent et fiable n'existe pas aujourd'hui pour

les propagations CPL. Toutefois des solutions RF très bas débits (jusqu'à 1,2 kbps) existent également pour atteindre de très longues distances. La limitation de débit existera donc également pour certaines technologies RF, renforçant le besoin de protocoles spécifiquement conçus pour ce type de réseaux. Il est important de noter que de nouveaux standards CPL plus performants voient le jour, et offrent de débits supérieurs à la technologie WPC. Le développement de ces futurs standards CPL, notamment dans des groupes de standardisations tels que le P1901 à l'IEEE permettront de de disposer de solutions CPL plus performantes et de s'affranchir des limites actuelles.

9.3 Le CPL : un média a considérer pour l'avenir ?

Depuis les premiers réseaux de capteurs conçus dans les années 90 [28], de nombreuses technologies ont vu le jour. La loi de Moore a permis de franchir les obstacles techniques permettant de créer des micro plateformes communicantes pouvant embarquer des techniques de traitements du signal performantes afin d'améliorer les performances des communications à des coûts qui restent maîtrisés. Dans cette optique, nous avons montré que le CPL et notamment la technologie WPC offre de bonnes perspectives. Cette technologie reste relativement nouvelle et nous avons constatés lors de nos expérimentations qu'elle est encore limitée pour permettre des déploiements à grande échelle, en particulier si le trafic à supporter est important [39]. Le CPL est un média non prédictif, dont les communications ne peuvent pas être déterminées à priori, car ses performances dépendent de facteurs aussi divers que la topologie électrique, le type et le nombre d'appareils électrique connectées au réseau, ou encore de l'utilisation et des modes fonctionnement de ces appareils [81]. De plus, la standardisation du CPL n'est pas encore établie, et certaines technologies CPL ne peuvent pas coexister sur un même réseau électrique. Dans notre cas, la technologie WPC utilise une bande de fréquence qui se superpose avec la partie basse de la bande de fréquence utilisée par les technologies Homeplug. Ainsi, la coexistence de ces deux technologies sur un même réseau électrique provoquait une perturbation importante des communications homeplug et un masquage totale du spectre des fréquences utilisées par la technologie WPC. Nous pensons que le CPL peut être considéré comme une technologie viable à la fois pour des applications hauts débits et pour des applications bas débits opérant sur des appareils contraints. Les technologies CPL haut débits tels que celles développées par l'alliance Homeplug sont déjà établies, mais l'utilisation généralisée des technologies bas débit reste à démontrer. Les déploiements en cours de ces technologies sont dopées par la dynamique des projets de smartgrid dans lesquels le CPL est une technologie souvent préconisée. Les déploiements des différentes technologies CPL dédiées, et notamment PRIME et G3 montrent des signes encourageant pour l'adoption de ces technologies. L'utilisation du CPL présente un intérêt certain pour les distributeurs d'énergie, car il possèdent déjà le réseau électrique qui pourrait donc leur servir à transporter la communication. En parallèle de cela, l'évolution des technologies RF, et notamment du standard IEEE 802.15.4 par ses nouvelles variations E et G ajoutent des arguments en faveur des média RF, dont la variété permet de répondre aux scénarios envisagés ici. Toutefois, le CPL présentera toujours l'avantage de ne pas être contraint par l'accès à l'énergie, et permettre l'augmentation de la durée de vie des réseaux de capteurs RF sur pile par leur conversion en réseaux hétérogènes RF/CPL [41]. Nous mentionnons également dans les annexes nos implications dans les organismes de standardisation et notamment l'IETF et l'alliance IPSO [127, 142, 143], qui ont permit de valider l'implémentation de notre solution lors d'évènements d'intéropérabilités et de confirmer l'intérêt de solutions alternatives telles que le CPL pour compléter les déploiements existants.

9.4 Perspectives

Nous avons vu lors nos déploiements que les performances de la technologie WPC limitait les applications envisageables. En particulier, nous avons observé que les latences occasionnées par le mode de fonctionnement du module WPC pouvait induire des temps d'occupation du canal importants (jusqu'à 1 seconde par saut, voire d'avantage s'il y a des retransmissions au niveau MAC). De plus, le quantum de 20 ms imposé par la fréquence du réseau électrique et permettant de synchroniser les émissions et réceptions CPL peut amener des temps de CCA importants (N fois 20 ms, avec N compris entre 0 et 7) avant chaque transmission. De plus, le faible débit (5 kbps) implique des temps de transmissions importants qui limitent également l'utilisation de la bande passante. Une évolution de cette technologie, présentant de meilleures performances réseau pourrait permettre une plus grande liberté au niveau applicatif, notamment vis à vis du trafic qui peut être supporté. Une autre axe d'amélioration serait de diminuer le trafic nécessaire au maintien de la topologie. En effet, les protocoles neighbor discovery (ND) et RPL imposent un trafic de contrôle qui augmente avec la taille du réseau. Cela est d'autant plus critique que le niveau de connectivité que nous observé sur CPL est grand: Certains noeuds disposaient de 14 voisins sur 25 noeuds connectés lors de l'expérimentation au laboratoire LIG. De ce fait, l'émission de paquets par ce noeud bloque les communications de tous ses voisins.

Un autre axe important d'amélioration est l'optimisation de la couche MAC utilisée sur notre solution CPL bas débit. En effet, conformément au standard IEEE 802.15.4, nous avons utilisé le protocole CSMA/CA en adaptant les timing. Cependant, une solutions MAC de type TDMA pourrait être envisagée pour optimiser l'utilisation de la bande passante, et ordonnancer les communication CPL. Cette solution se justifie d'autant plus que tous les noeuds CPL partagent un signal synchrone, qui est la fréquence du réseau électrique. Un mécanisme de beaconing pourrait permettre de planifier des émission CPL après un nombre donné de périodes, en garantissant qu'il n'y ai pas de concurrence d'accès à cette date. Ce mécanisme permettrait de s'affranchir des latences MAC liées au CCA, et de limiter les collisions et donc l'utilisation supplémentaire de bande passante lors des retransmissions.

Une étude des métriques de routage de PRL pourrait également permettre d'optimiser le fonctionnement des réseau hétérogènes RF/CPL. En effet, les métriques d'énergie, de latence ou de débit définies pour RPL dans la RFC 6551 [58] pourrait permettre de compléter la métrique ETX utilisée actuellement et de l'optimiser selon le type d'application. Par exemple, l'utilisation de la métrique ETX seule ne permet pas d'obtenir d'informations sur les performances réseaux. Ainsi, dans un contexte de réseau hétérogène RF/CPL, on ne tire pas profit des noeuds RF disposants de performances réseau plus élevées que notre solution CPL, même si ces noeuds RF sont alimentés (cas des actionneurs, ou des noeud hybrides RF/CPL). Nous avons observé en effet, que l'utilisation de liens CPL pour relayer des paquets provenant de noeuds RF pouvait créer des congestions.

Un dernier axe d'amélioration concerne la sécurité, qui n'avons pas considérée ici. Le cryptage des données ou l'authentification des noeuds permettrait de limiter les risques de récupération frauduleuse de données de notre réseau. D'un point de vue industriel, la sécurité pour les réseaux domestique et de contrôle de l'habitat est un prérequis à leur déploiements et leur commercialisation. La possibilité de récupérer des données personnelles telles que les consommations d'eau, d'électricité ou de gaz de manière frauduleuse n'est pas acceptable pour l'occupant, d'autant plus que l'utilisation de ces données peut mener à des informations très sensibles telles que le nombre d'occupants, les périodes ou les horaires durant lesquelles le logement est inoccupé etc.

Chapter 10

Annexes

10.1 Contribution aux organismes de standardisation

Lors de ma thèse, j'ai suivi et participé aux discussions des groupes de travail de l'IETF 6LoWPAN, ROLL, LWIG et CORE. J'ai également effectué un suivi des nouvelles mailing list telles que 6TSCH, COMAN et SOLACE. Mon investissement s'est principalement concentré sur le groupe ROLL.

10.1.1 Investissement dans l'alliance IPSO

J'ai participé à 3 évènements d'intéropérabilité organisés par l'alliance IPSO, lors de l'IETF 77 à Anaheim en mars 2010, un meeting de l'alliance IPSO à San Francisco en octobre 2011 avec une participation aux test depuis la France via Internet, et l'IETF 83 à Paris en avril 2012. La première intéropérabilité a permis de valider notre implémentation de notre pile protocolaire et de notre adaptation 6LoWPAN sur la technologie CPL WPC, en créant un réseau hétérogène CPL/RF avec d'autres partcipants. Le 2ème évènement d'intéropérabilité nous a permis de créer un réseau hétérogène RF/CPL localement en France) et de le faire interagir avec des appareils situés à San Francisco. Concrètement, une télécommande Radio (802.15.4-2006 @ 2.4 GHz) permettent d'envoyer un ordre sur un lien CPL, puis une passerelle CPL/Ethernet, avant d'atteindre une passerelle Ethernet/802.15.4E permettant de déclencher l'action d'un appareil utilisant cette dernière technologie. Nous avons donc créé un chemin IP au dessus de 4 technologies différentes, démontrant ainsi la faisabilité et l'intérêt d'un réseau hétérogène, reposant sur le standard IP. La dernière intérop, quant a elle, reposait principalement sur des interactions au niveau CoAP, et la validation de notre implémentation du protocole applicatif [127] reposant sur le standard CoAP. De même notre réseau local hétérogène était composé de noeuds RF et CPL. J'ai été en charge du déroulement de cette dernier évènement. J'ai assuré le lien entre l'alliance ISPO et Watteco en assistant aux meeting hebdomadaires du comité d'interopérabilité, ainsi qu'en participant à la rédaction d'un livre blanc sur l'intérêt de l'utilisation d'IP dans les réseaux de capteurs [142].

10.1.2 Draft IPSO profile

Ma collaboration avec le comité d'intéropérabilité de l'alliance IPSO m'a conduis à co-écrire le draft [127] avec Zach Shelby. Ce draft a servi de base aux 2 derniers évènements d'intéropérabilité auxquels j'ai participé. Ce draft repose sur le standard CoAP et permet de décrire des fonctions applicatives pour faire intéragir des appareils contraints. Publié pour la première fois en Avril 2012, ce draft a depuis été remanié pour être poussé dans un organisme de standardisation afin qu'il soit reconnu comme un standard.

10.1.3 Draft OMA LWM2M

Ce nouveau draft [144] repose sur le précédent [127] mais le met en forme pour être accepté par l'organisme de standardisation OMA (Open Mobile Alliance). Il repose également sur le standard CoAP, mais définit une architecture complète de communication au niveau applicatif. Il définit en particulier un dictionnaire de resources génériques permettant de définir les interactions avec des objets communicants. Ce document est amené à être publié comme un standard pendant l'été 2013.

10.1.4 Draft-hui-vasseur-roll-rpl-deployment-02

Ce draft [143] a été co-écrit avec d'autres utilisateurs du protocole RPL afin d'offrir un retour d'expérience de l'utilisation du protocole. Notre contribution résume un déploiement de 70

noeuds RF dans un laboratoire et donne quelques résultats sur la topologie créée et la fiabilité obtenue.

10.2 Publications

10.2.1 802.15.4, a MAC layer solution for PLC

Dans cet article [11], nous examinons les possibilités de l'utilisation du standard IPv6 dans les réseaux de capteurs CPL et démontrons les possibilités d'interoperabilité. Pour cela, ce document propose une adaptation du standard IEEE 802.15.4 sur un médium CPL. A partir de cette interface standard, nous démontrons la possibilité de transmettre des données sur CPL avec une bonne fiabilité, et un faible consommation en utilisant le couplage du WPC. Cela nous permet de bénéficier des développements de la communauté des réseaux de capteurs RF pour les réseaux CPL. Par conséquent, la pile de communication reposant sur 802.15.4 offre une communication générique adaptée à des réseaux hétérogènes. Nous démontrons enfin l'interopérabilité entre CPL et RF par une expérimentation réelle de notre pile protocolaire.

10.2.2 Interoperable IPv6 sensor networking over PLC and RF media

Ce papier [35] est basé sur l'adaptation de la norme IEEE 802.15.4 sur CPL décrite dans [34]. Elle repose sur la faible consommation, les pertes induites par le médium et le faible débit de l'émetteur-récepteur CPL que nous considérons. Notre but est de fournir des fonctionnalités d'interopérabilité avec d'autres médias en utilisant une pile de communication fiable et robuste. S'appuyant sur cette adaptation, nous nous concentrons sur la convergence du protocole IPv6 au niveau réseau, avec la couche d'adaptation 6LoWPAN. Nous présentons également une première mise en oeuvre du protocole de routage RPL pour les réseaux faible consommation à pertes. Nous démontrons enfin les possibilités d'interopérabilité offertes par la pile 802.15.4/6LoWPAN/IPv6/RPL que nous décrivons par une expérimentation entre un réseau RF et un réseau CPL.

10.2.3 A communication stack over PLC for multi physical layer IPv6 Networking

Dans cet article [37], nous proposons une pile de communication pour CPL basée sur des standards ouverts. Notre objectif est de fournir des fonctionnalités d'interopérabilité vis à vis d'autres médias, avec une communication fiable et robuste pour la télé-relève de compteurs, l'éclairage public ou le réseau domestique. Nous justifions d'abord l'utilisation du standard 802.15.4 sur CPL en établissant un parallèle avec les réseaux de capteurs RF basse consommation. Nous mettons ensuite l'accent sur la convergence du protocole IPv6 au niveau réseau, avec la couche d'adaptation 6LoWPAN. Nous présentons également une mise en oeuvre du protocole de routage RPL. Nous présentons ensuite une implémentation réelle de cette pile. Nous présentons également des essais d'interopérabilité effectué entre des noeuds RF et des noeuds CPL.

10.2.4 RPL : The IP routing protocol designed for low power and lossy networks

Cet article [142] est un white paper de l'alliance IPSO, décrivant le protocole RPL et ses applications. Dans cet article, nous insistons sur l'indépendance de ce protocole de niveau réseau vis à vis du médium utilisé. A cette fin, nous justifions son usage sur des médias non-RF tel que le CPL, en mettant en commun leur caractéristiques, en particulier la dynamique des liens, les

pertes intrinsèques et la portée limitée. Ce chapitre fait part de nos retours d'expérience sur les réseaux CPL et introduit l'intérêt des réseaux hybrides.

10.2.5 Heterogeneous IPv6 Infrastructure for Smart Energy Efficient Building

Dans cet article [40], nous nous focalisons sur l'instrumentation d'un bâtiment par un réseau de capteurs hybride RF-CPL. A partir de l'étude des puits mobile réalisés par leila ben saad et des nos travaux sur les réseaux hybrides, nous décrivons une architecture hybride optimale en énergie. Les noeuds hybrides sont utilisés comme des puits permettant de répartir les points de collectes de données et donc de distribuer la consommation énergétique. Ces noeuds hybrides sont connectés entre eux par CPL, créant un backbone non contraint en énergie sur lequel des cluster RF sont connectés.

10.2.6 Simulation of the RPL Routing Protocol for IPv6 Sensor Networks: two cases studies

Cet article [41] décrit deux approches différentes pour évaluer le protocole RPL par la simulation. La première méthode reposant sur l'utilisation de WSnet pour étudier la consommation énergétique dans un réseau de capteur RF, la deuxième décrivant notre implémentation d'un noeud CPL dans le simulateur COOJA. Ces deux approches divergent par leur objectifs et le moment où elles ont été menées, mais se rejoignent sur l'utilisation du protocole RPL dans un environnement de simulation pour l'étude du routage dans les réseaux de capteurs. L'article discute des différents simulateurs envisageables, décrit les modules implémentés dans chacun des cas et des différences entre les implémentations.

10.2.7 Poster Abstract: Interconnecting Low-Power Wireless and Power-Line Communications using IPv6

Dans ce poster [36], nous comparons les performances de deux implémentations de RPL. Toutes deux reposent sur l'implémentation de RPL dans le micro-OS Contiki, mais diffèrent par les médias employés. Ainsi, une évaluation est faite sur des noeuds RF alors l'autre est faite sur les noeuds PLC. Ce poster a été réalisé en collaboration avec l'équipe Swedish Institute of Computer Science (SICS) qui a développé contiki. Les résultats montrent que les performances entre RF et CPL sont comparables, et justifient l'interconnexion entre ces deux médias.

10.2.8 Qualification and performance of WPC component in Homes environments

Ce document [145] est un livrable du programme Homes dans lequel Watteco est impliqué. Il présente les outils permettant de qualifier le comportement du réseau CPL et les performances obtenues. Une première partie concerne la description de l'outil de diagnostic réseau, et la deuxième partie concerne l'implémentation d'un noeud CPL de type WPC dans le simulateur COOJA. L'outil de diagnostic est utilisé à la fois dans un réseau simulé et sur un réseau réel pour qualifier les performances d'un réseau reposant sur la technologie WPC. Les résultats montrent que ce type de réseau répond aux contraintes de l'instrumentalisation des bâtiments fixées par le programme homes.

10.2.9 Heterogeneous PLC-RF networking for LLNs

Ce poster [39] présente les résultats que nous avons obtenus dans les simulations et les expérimentation de réseaux hybrides RF/CPL. Ces résultats mettent en évidence l'intérêt énergétique de l'utilisation de noeuds hybrides RF/CPL dans un réseaux uniquement RF, et montrent le compromis entre l'énergie et les performances réseaux induites par la technologie CPL WPC que nous considérons. A partir d'un réseau de capteurs RF donné, ce poster chiffre l'amélioration de la durée de vie d'un réseau dans le cas ou l'on ajouterai quelques noeuds hybrides RF/CPL dans le voisinage de certains noeud RF. On montre ainsi que la durée de vie peut être grandement améliorée, notamment grâce à la diminution de la charge de routage sur certains noeuds RF fortement maillés.

10.2.10 Standardized and flexible IPv6 Architecture for Advanced Metering Infrastructure (AMI) Networks

Ce livre blanc [141] présente une pile protocolaire standard flexible, adaptée à des applications de type SmartGrid. Reprenant les protocoles que nous avons utilisé dans le cadre de la thèse, ce papier vise à montrer la large acceptation du monde industriel et académique autours des derniers standards ouverts définis par l'IETF et l'IEEE pour les smart Objects tels que 802.15.4, 6LoWPAN et RPL. Outre les contributions sur la définitions de ces standards, j'ai notamment rédigé les parties traitant du CPL, en m'appuyant sur les résultats obtenus durant nos différentes expérimentations. Ce paragraphe insiste sur le fait que contrairement à certaines idées reçues, le CPL n'est pas un média broadcast et présente des caractéristiques dynamiques, similaires à certains média RF, qui nécessite une solution de routage robuste pour pouvoir répondre aux besoins d'applications tels que le smart grid. Nous justifions ainsi l'utilisation des protocoles standards développés pour le futur 'internet des objets" sur le CPL.

10.2.11 IPv6 (Internet Protocol version 6) heterogeneous networking infrastructure for energy efficient building

Cet article [42] a été publié dans le journal ENERGY. Il présente nos résultats sur les simulations et les expérimentations sur les réseaux hybrides RF/CPL. On y présente en particulier les avantages d'une telle architecture du point du vue énergétique en montrant la progression de la durée de vie d'un réseau de capteurs RF sur batterie lorsqu'on injecte progressivement des noeuds hybrides RF/CPL. On montre qu'un seuil est atteint lorsque chaque noeud RF dispose d'un noeud hybride RF/CPL dans son voisinage, permettant d'atteindre un optimum énergétique. Nous justifions également les protocoles utilisés dans notre pile protocolaire dans le but d'optimiser la consommation énergétique globale du réseau.

10.2.12 RPL deployment experience in large scale networks

Ce draft [143] a été publié à l'IETF, et décrit le contexte et les résultats d'un déploiement de 70 noeuds RF que nous avons effectués dans un laboratoire de Nantes, afin de valider notre design RF et le passage à l'échelle de notre pile protocolaire. Ce draft ayant été soumis dans le cadre du groupe de travail ROLL, ce draft se concentre sur le comportement du protocole de routage RPL. Ce document décrit la plateforme matérielle utilisée, les paramètres du protocole de routage et la topologie du réseau.

10.2.13 The IPSO Application Framework

Ce document [127] spécifie un profil applicatif directement utilisable au dessus du protocole CoAP et adapté à des applications de type smart energy. Ce profil a été implémenté par les participants des 2 derniers évènements d'interopérabilité organisés par l'alliance IPSO. Initialement définit dans le cadre de l'alliance IPSO, ce document sera prochainement soumis dans un organisme de standardisation international pour devenir un standard internationalement reconnu.

10.2.14 Wireless IPv6 Sensor Nodes Energy Evaluations

Cet article [139] décrit l'étude énergétique que nous avons mené sur une architecture de noeud radio. Il traite les optimisations matérielles et logicielles que nous proposons et fournit des mesures réelles de consommation afin de valider leur impact. L'étude matérielle porte sur l'optimisation du micro contrôleur, du module radio, et de la sonde embarquée. L'étude logicielle détermine les paramètres des protocoles de découverte de voisins et du protocole de routage RPL, et propose des améliorations dans le micro OS Contiki pour diminuer la consommation d'énergie. Les différentes optimisations proposées permettent de créer une architecture qui consomme moins de 17 μW en moyenne pour une remontée de donnée applicatives toutes les 10 minutes.

10.2.15 Energy Evaluations for Wireless IPv6 Sensor Nodes

Cet article [146] augmente l'étude énergétique que nous avons mené dans le papier [139] en projettent les consommations de notre plateforme avec un micro contrôleur différent. Cette nouvelle étude pousse également l'analyse des consommations RF plus loin. Nous comparons ici le coût des transmissions RF dans les bandes 868 MHz et 2.4 GHz à différentes distances. Nous montrons ainsi, qu'une solution 868 MHz est plus efficace pour de longues distances, mais que les consommation plus élevées de ces modules radio ne se justifient pas pour de cortes distances. Nous montrons ainsi que l'optimisation énergétique de la plateforme dépend de l'application visée.

10.3 Formations suivies dans le cadre des études de l'école doctorale

- Module B4: Construire, gérer et valoriser mon projet de thèse. Module de formation dispensé par Mr Klein à l'université Lyon 3 du 10 au 12 Mai 2010 (21H).
- Tutorial Senslab à l'INRIA de grenoble le 24 Novembre 2009 (1 Jour)
- Module C3 : Chef de projet innovant - Méthode MIME - Mise en situation, travail en équipe et processus d'innovation. Module de formation dispensé par Mr Rochet à Lyon, du 22 au 24 Mars 2011 (21H).
- PhD Course : Energy-efficient wireless networks. Cours dispensé à l'université polytechnique de Turin par le Pr Izhak Rubin de UCLA, du 18 au 20 Avril 2011 à Turin (9H).

10.4 Participations aux conférences

- IP Capteurs, 10-11 Decembre 2009, Lyon
  Présentation du contenu de [34] + démo
  Assisté aux autres présentations

- Recap 2009, 25-26 Novembre 2009, Grenoble
  Assisté aux présentations
- Infocom 2010, 15-19 Mars 2010, San Diego, Californie
  Assisté aux sessions WSN, Routing, MAC, DTN
- AICCSA'10 16-19 Mai 2010, Hammamet, Tunisie
  Présentation de [34] au workshop FT-ASN'10
  Assisté aux sessions du workshop.
- IETF 77, 21-26 Mars 2010, Anaheim Californie Assisté aux sessions des groupes de travail 6LoWPAN, ROLL
  Participation à l'interop organisée les 24 et 25 Mars par IPSO en marge de l'évènement
- Assisté à la soutenance de thèse de Karel Heurtefeux (Qlop), 26 Novembre 2009, CITI
- Participation aux conférence téléphoniques hebdomadaire du groupe interoperabilité de l'alliance IPSO.
- Participation au conférences téléphoniques hebdomadaires du groupe de travail de l'alliance IPSO sur une future certification des objets intelligents
  Collaboration à la recommandation présentée au BOD.
- IETF 78, Juillet 2010, Maastricht, Pays bas
  Assisté aux sessions 6LoWPAN, RPL, CORE.
- Journées du CITI, 6-7 septembre 2010, Lyon, France
  Présentation des travaux en cours.
- SmartGridcomm'10, 4-6 Octobre 2010, Washington, US
  Présentation du papier [37].
- Journées Semba, 18-19 Octobre 2010, Autrans, France
  présentation des travaux en cours.
- Journées Rescom, 25-26 Novembre 2010, Lyon, France
  Assisté aux présentations.
- IP Capteurs, 12-13 Janvier 2011, Lyon, France
  Présentation des travaux en cours. Démo du simulateur COOJA et de RPL sur CPL sur matériel Watteco.
- Séminaire In'Tech, 20 Janvier 2011, Grenoble, France
  Présentation d'un démo de prototype de gestion énergétique pour un bâtiment.
- CFIP'11, 10-13 Mai 2011, Ste Maxime, France
  Présentation du poster [39]. Assisté au sessions.
- Présentation des travaux de thèse, 16 Mai 2011, Valence
- IETF 81, 24-29 Juillet 2011, Québec
- Présentation des travaux de thèse, rencontre avec Pat Pannuto, 1-2 Août 2011, Ann Harbor, Michigan, US.

- Présentation des travaux de thèse, rencontre avec Deepak Ganesan, 3 Août 2011, Amherst, Massachussets, US.
- Présentation des travaux de thèse, rencontre avec Haim Levkowitz, 4 Août 2011, UMASS Lowell, Massachussets, US.
- Présentation des travaux de thèse, rencontre avec Claudio Martani, 5 Août 2011, MIT - Boston, Massachussets, US.
- Interop IPSO (participation à distance depuis la France), 11-12 Octobre 2011, France
  Validation de l'implémentation de la pile protocolaire sur média hétérogène RF/CPL/Ethernet. Interactions multi médias (CPL/RF@2.4Ghz/Ethernet/RF@915 MHz) entre la France et les US
- Présentation des travaux de thèse aux journées Semba, 20-21 Octobre 2011, Valence
- Assisté à la soutenance de thèse de Leïla Ben Saad, 23 Novembre 2011, Lyon
- Cours/Présentation sur le CPL, 28 Novembre 2011, Watteco - La Garde
- Présentation des travaux de thèse, 12 décembre 2011, LIG - grenoble
- Cours/Présentation sur le CPL, 10 Janvier 2012, Polytech Grenoble
- Cours/Présentation CPL, 31 Janvier 2012, Télécom Bretagne - Rennes
- Présentation dans le Workshop Smart Homes, Journée Rencontre INRIA, 8 Mars 2012, Montbonnot
- IETF 83, 25-30 Mars 2012, Paris.
  Assisté aux sessions ROLL, CORE, LWIG. Pré-intérop avec les Membres IPSO
- Interop IPSO, 3-4 Avril 2012, Paris
- Présentation au séminaire ASPROM, 24 Octobre 2012, Paris
- Cours/Présentation CPL, 13 Novembre 2012, Polytech Grenoble

Bibliography

[1] Z. Shelby and C. Bormann, *6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet.* Wiley Publishing, 2010.

[2] A. Dunkels, B. Gronvall, and T. Voigt, "Contiki-a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors," in *Local Computer Networks, 2004. 29th Annual IEEE International Conference on.* IEEE, 2004, pp. 455–462.

[3] P. Levis, S. Madden, J. Polastre, R. Szewczyk, K. Whitehouse, A. Woo, D. Gay, J. Hill, M. Welsh, E. Brewer *et al.*, "Tinyos: An operating system for sensor networks," *Ambient intelligence*, vol. 35, 2005.

[4] [Online]. Available: http://www.erdfdistribution.fr/Linky

[5] ERDF, "Le compteur communicant linky d'erdf : Une expérimentation réussie," Tech. Rep., Juillet 2011.

[6] M. Presser and the Alexandra Institute, Eds., *Inspiring the Internet of Things.* Alexandra Institute, 2011.

[7] R. Stanica, E. Chaput, and A.-L. Beylot, "Simulation of vehicular ad-hoc networks: Challenges, review of tools and recommendations," *Computer Networks*, vol. 55, no. 14, pp. 3179–3188, 2011.

[8] H.-Y. Zhou, G. de Sousa, J.-P. Chanet, K.-M. Hou, J.-J. Li, C. de Vaulx, and M. Kara, "An intelligent wireless bus-station system dedicated to disabled, wheelchair and blind passengers," in *Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2006 IET International Conference on.* IET, 2006, pp. 1–4.

[9] H. Zhou, K. M. Hou, L. Gineste, C. De Vaulx, and J. Ponsonnaille, "A new system dedicated to real-time cardiac arrhythmias tele-assistance and monitoring," *Journal of Universal Computer Science*, vol. 12, no. 1, pp. 30–44, 2006.

[10] J. Postel, "Internet protocol darpa internet program protocol specification," RFC 791, September 1981.

[11] IEEE, "Ieee standard for local and metropolitan area networks–part 15.4: Low-rate wireless personal area networks (lr-wpans)," 2011.

[12] D. Gay, P. Levis, R. Von Behren, M. Welsh, E. Brewer, and D. Culler, "The nesc language: A holistic approach to networked embedded systems," in *Acm Sigplan Notices*, vol. 38, no. 5. ACM, 2003, pp. 1–11.

[13] S. R. Madden, M. J. Franklin, J. M. Hellerstein, and W. Hong, "Tinydb: An acquisitional query processing system for sensor networks," *ACM Transactions on Database Systems (TODS)*, vol. 30, no. 1, pp. 122–173, 2005.

[14] J. Eriksson, F. Österlind, N. Finne, N. Tsiftes, A. Dunkels, T. Voigt, R. Sauter, and P. J. Marrón, "Cooja/mspsim: interoperability testing for wireless sensor networks," in *Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques*. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2009, p. 27.

[15] [Online]. Available: http://thingsquare.com/

[16] F. Osterlind, A. Dunkels, J. Eriksson, N. Finne, and T. Voigt, "Cross-level sensor network simulation with cooja," in *Local Computer Networks, Proceedings 2006 31st IEEE Conference on*. IEEE, 2006, pp. 641–648.

[17] R. Barry, *Using the FreeRTOS real time kernel: a practical guide*. Real Time Engineers Limited, 2009.

[18] C. O'Flynn, "Flexibleip (fip): Ipv6 stack for experimental work on low-power wireless networks," 2012.

[19] S. Bhatti, J. Carlson, H. Dai, J. Deng, J. Rose, A. Sheth, B. Shucker, C. Gruenwald, A. Torgerson, and R. Han, "Mantis os: An embedded multithreaded operating system for wireless micro sensor platforms," *Mobile Networks and Applications*, vol. 10, no. 4, pp. 563–579, 2005.

[20] H. Abrach, S. Bhatti, J. Carlson, H. Dai, J. Rose, A. Sheth, B. Shucker, J. Deng, and R. Han, "Mantis: System support for multimodal networks of in-situ sensors," in *Proceedings of the 2nd ACM international conference on Wireless sensor networks and applications*. ACM, 2003, pp. 50–59.

[21] T. Watteyne, X. Vilajosana, B. Kerkez, F. Chraim, K. Weekly, Q. Wang, S. Glaser, and K. Pister, "Openwsn: a standards-based low-power wireless development environment," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 23, no. 5, pp. 480–493, 2012.

[22] H.-Y. Zhou, K.-M. Hou, J.-P. Chanet, C. De Vaulx, and G. De Sousa, "Limos: a tiny real-time micro-kernel for wireless objects," in *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2006. WiCOM 2006. International Conference on*. IEEE, 2006, pp. 1–4.

[23] [Online]. Available: http://www.isi.edu/nsnam/ns/

[24] A. Varga *et al.*, "The omnet++ discrete event simulation system," in *Proceedings of the European Simulation Multiconference (ESM'2001)*, vol. 9. sn, 2001.

[25] P. Levis, N. Lee, M. Welsh, and D. Culler, "Tossim: Accurate and scalable simulation of entire tinyos applications," in *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*. ACM, 2003, pp. 126–137.

[26] J. Eriksson, A. Dunkels, N. Finne, F. Osterlind, and T. Voigt, "Mspsim–an extensible simulator for msp430-equipped sensor boards," in *Proceedings of the European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN), Poster/Demo session*, 2007.

[27] A. Fraboulet, G. Chelius, and E. Fleury, "Worldsens: development and prototyping tools for application specific wireless sensors networks," in *Information Processing in Sensor Networks, 2007. IPSN 2007. 6th International Symposium on.* IEEE, 2007, pp. 176–185.

[28] J. McLurkin, "Algorithms for distributed sensor networks," Ph.D. dissertation, Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California, 1999.

[29] J. Hill and D. Culler, "Mica: A wireless platform for deeply embedded networks," *Micro, IEEE*, vol. 22, no. 6, pp. 12–24, 2002.

[30] J. Polastre, R. Szewczyk, and D. Culler, "Telos: enabling ultra-low power wireless research," in *Information Processing in Sensor Networks, 2005. IPSN 2005. Fourth International Symposium on.* Ieee, 2005, pp. 364–369.

[31] J. Hui and P. Thubert, "Compression format for ipv6 datagrams over ieee 802.15.4-based networks," RFC 6282, September 2011.

[32] Z. Shelby, S. Chakrabarti, E. Nordmark, and C. Bormann, "Neighbor discovery optimization for ipv6 over low-power wireless personal area networks (6lowpans)," RFC 6775, November 2012.

[33] K. Razazian, M. Umari, A. Kamalizad, V. Loginov, and M. Navid, "G3-plc specification for powerline communication: Overview, system simulation and field trial results," in *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2010 IEEE International Symposium on.* IEEE, 2010, pp. 313–318.

[34] C. Chauvenet, B. Tourancheau, and D. Genon-Catalot, "802.15. 4, a mac layer solution for plc," in *AICCSA 2010, The 8th IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications.* IEEE, 2010, pp. 1–8.

[35] C. Chauvenet, B. Tourancheau, D. Genon-Catalot, P.-E. Goudet, and M. Pouillot, "Interoperable IPv6 sensor networking over PLC and RF media," *IJBDCN*, vol. Vol 6, no. Num 3, sept 2010.

[36] J. Höglund, N. Finne, J. Eriksson, N. Tsiftes, A. Dunkels, C. Chauvenet, M. Pouillot, P. Goudet, B. Tourancheau, and D. Genon-Catalot, "Poster abstract: Interconnecting low-power wireless and power-line communications using ipv6," *2nd ACM Workshop On Embedded Sensing Systems For Energy-Efficiency In Buildings - BuildSys*, 2010.

[37] C. Chauvenet, B. Tourancheau, D. Genon-Catalot, P.-E. Goudet, and M. Pouillot, "A communication stack over PLC for multi physical layer IPv6 networking," in *IEEE SmartGridComm*, 2010.

[38] T. Winter, P. Thubert, A. Brandt, J. Hui, R. Kelsey, P. Levis, K. Pister, R. Struik, J. Vasseur, and R. Alexander, "Rpl: Ipv6 routing protocol for low-power and lossy networks," RFC 6550, March 2012.

[39] C. Chauvenet and B. Tourancheau, "Heterogeneous plc-rf networking for llns," HAL - INRIA, Tech. Rep., 2011.

[40] L. B. Saad, C. Chauvenet, B. Tourancheau *et al.*, "Heterogeneous ipv6 infrastructure for smart energy efficient building," in *SDEWES*, 2011.

[41] ——, "Simulation of the rpl routing protocol for ipv6 sensor networks: two cases studies," in *International Conference on Sensor Technologies and Applications SENSORCOMM 2011*, 2011.

[42] L. B. Saad, C. Chauvenet, and B. Tourancheau, "Ipv6 (internet protocol version 6) heterogeneous networking infrastructure for energy efficient building," *Energy*, vol. 44, no. 1, pp. 447 – 457, 2012, integration and Energy System Engineering, European Symposium on Computer-Aided Process Engineering 2011. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544212004598

[43] Z. Shelby, K. Hartke, C. Bornmann, and B. Franck, "Constrained application protocol (coap)," IETF draft, 2012.

[44] L. Pengfei and L. Jiakun, "Application of communication and remote control in plc based on zigbee," in *Computational Intelligence and Security, 2009. CIS'09. International Conference on*, vol. 2. IEEE, 2009, pp. 533–536.

[45] J. Y. Ha, J. Jeon, K. Lee, J. Heo, N. Kim, S. M. Kim, W. H. Kwon, and B.-j. Jung, "Design and implementation of convergence sub-layer for a heterogeneous home network," in *Power Line Communications and Its Applications, 2007. ISPLC'07. IEEE International Symposium on.* IEEE, 2007, pp. 252–256.

[46] K. Yamada, Y. Hirata, Y. Naoe, T. Furumura, Y. Inoue, T. Shimizu, K. Yoshida, M. Kojima, and T. Mizuno, "Dual communication system using wired and wireless correspondence in a small space," in *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems.* Springer, 2004, pp. 898–904.

[47] Y. Cai-fang and G. Ren-yi, "Home network using complementary communication system," in *International Seminar on Business and Information Management (ISBIM)*, vol. 1. IEEE, 2008, pp. 71–74.

[48] O. Hersent, D. Boswarthick, and O. Elloumi, *The Internet of Things : Key Applications and Protocols.* John Wiley and Sons Inc, 2012.

[49] S. Galli and O. Logvinov, "Recent developments in the standardization of power line communications within the ieee," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 46, no. 7, pp. 64–71, 2008.

[50] S. Deering and R. Hinden, "Internet protocol, version 6 (ipv6) specification," RFC 2460, December 1998.

[51] N. Kushalnagar, G. Montenegro, C. Schumacher, and A. Danfoss, "Ipv6 over low-power wireless personal area networks (6lowpans): Overview, assumptions, problem statement, and goals," RFC 4919, August 2007.

[52] Y. Mazzer and B. Tourancheau, "Comparisons of 6lowpan implementations on wireless sensor networks," in *Sensor Technologies and Applications, 2009. SENSORCOMM'09. Third International Conference on.* IEEE, 2009, pp. 689–692.

[53] G. Montenegro, N. Kushalnagar, J. Hui, and D. Culler, "Transmission of ipv6 packets over ieee 802.15.4 networks," RFC 4944, September 2007.

[54] J. W. Hui and D. E. Culler, "Ip is dead, long live ip for wireless sensor networks," in *SenSys '08: Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems.* New York, USA: ACM, 2008.

[55] T. Narten, E. Nordmark, W. Simpson, and H. Soliman, "Neighbor discovery for ip version 6 (ipv6)," RFC 4861, September 2007.

[56] P. Thubert, "Objective function zero for the routing protocol for low-power and lossy networks (rpl)," RFC 6552, March 2012.

[57] P. Levis, T. Clausen, J. Hui, O. Gnawali, and J. Ko, "The trickle algorithm," RFC 6206, March 2011.

[58] J. Vasseur, M. Kim, K. Pister, N. Dejean, and D. Barthel, "Routing metrics used for path calculation in low-power and lossy networks," RFC 6551, March 2012.

[59] O. Gnawali and P. Levis, "The minimum rank with hysteresis objective function," RFC 6719, September 2012.

[60] M. Goyal, E. Baccelli, M. Philipp, A. Brandt, and J. Martocci, "Reactive discovery of point-to-point routes in low power and lossy networks draft-ietf-roll-p2p-rpl-14," IETF draft, October 2012.

[61] J. Martocci, P. De Mil, N. Riou, and W. Vermeylen, "Building automation routing requirements in low-power and lossy networks," RFC 5867, June 2010.

[62] A. Brandt, J. Buron, and G. Porcu, "Home automation routing requirements in low-power and lossy networks," RFC 5826, April 2010.

[63] K. Pister, P. Thubert, S. Dwars, and T. Phinney, "Industrial routing requirements in low-power and lossy networks," RFC 5673, October 2009.

[64] M. Dohler, T. Watteyne, T. Winter, and D. Barthel, "Routing requirements for urban low-power and lossy networks," RFC 5548, May 2009.

[65] D. Katz and D. Ward, "Bidirectional forwarding detection (bfd) for ipv4 and ipv6 (single hop)," RFC 5881, June 2010.

[66] F. Teraoka, K. Gogo, K. Mitsuya, R. Shibui, and K. Mitani, "Unified layer 2 (l2) abstractions for layer 3 (l3)-driven fast handover," RFC 5184, May 2008.

[67] S. Cheshire and M. Krochmal, "Dns-based service discovery," RFC 6763, February 2013.

[68] Z. Shelby, "Constrained restful environments (core) link format," RFC 6690, August 2012.

[69] K. Hartke, "Observing resources in coap," IETF draft, February 2013.

[70] C. Bormann and Z. Shelby, "Blockwise transfers in coap," IETF draft, October 2012.

[71] M. Ersue, D. Romascanu, and J. Schoenwaelder, "Management of networks with constrained devices: Problem statement, use cases and requirements," IETF draft, February 2013.

[72] B. Sarikaya, Y. Ohba, R. Moskowitz, Z. Cao, and R. Cragie, "Framework for securely setting up smart objects," IETF draft, September 2012.

[73] A. Aruzuaga, I. Berganza, A. Sendin, M. Sharma, and B. Varadarajan, "Prime interoperability tests and results from field," in *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on.* IEEE, 2010, pp. 126–130.

[74] M. Hoch, "Comparison of plc g3 and prime," in *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2011 IEEE International Symposium on*. IEEE, 2011, pp. 165–169.

[75] M. E. Strieby, "Carrier transmission over power circuits," US Patent, April 1924.

[76] X10 powerline carrier (plc) technology. [Online]. Available: http://www.x10.com/support/technology1.htm

[77] H. Alliance, "Homeplug 1.0 specification," *Home Plug Powerline Alliance*, 2001.

[78] M. Lee, R. E. Newman, H. A. Latchman, S. Katar, and L. Yonge, "Homeplug 1.0 powerline communication lans—protocol description and performance results," *International Journal of Communication Systems*, vol. 16, no. 5, pp. 447–473, 2003.

[79] K. H. Afkhamie, S. Katar, L. Yonge, and R. Newman, "An overview of the upcoming homeplug av standard," in *Power Line Communications and Its Applications, 2005 International Symposium on*. IEEE, 2005, pp. 400–404.

[80] P. Sutterlin and W. Downey, "A power line communication tutorial-challenges and technologies," in *International Symposium on Power-Line Communications and its Applications, pag*, 1999, pp. 15–29.

[81] X. Carcelle, *Power line communications in practice*. Artech House, 2009.

[82] E. Marthe, "Power line communications: analyse des problèmes de compatibilité électromagnétique dans le domaine des courants porteurs en ligne," Ph.D. dissertation, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005.

[83] M. Gotz, M. Rapp, and K. Dostert, "Power line channel characteristics and their effect on communication system design," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 42, no. 4, pp. 78–86, 2004.

[84] C. Hensen and W. Schulz, "Time dependence of the channel characteristics of low voltage power-lines and its effects on hardware implementation," *AEU-Arch. Elektr. Ubertragungstechn*, vol. 54, no. 1, pp. 23–32, 2000.

[85] H. Philipps, "Modelling of powerline communication channels," in *Proc. 3rd Int'l. Symp. Power-Line Commun. and its Applications*, 1999, pp. 14–21.

[86] M. Zimmermann and K. Dostert, "A multipath model for the powerline channel," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 50, no. 4, pp. 553–559, 2002.

[87] K. H. Zuberi, "Powerline carrier (plc) communication systems," *Stockholm: IMIT*, vol. 108, 2003.

[88] S. Galli and T. Banwell, "A novel approach to the modeling of the indoor power line channel-part ii: transfer function and its properties," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 20, no. 3, pp. 1869–1878, 2005.

[89] H. Hrasnica, A. Haidine, and R. Lehnert, *Broadband powerline communications: network design*. Wiley, 2005.

[90] J. Anatory, M. Kissaka, and N. Mvungi, "Channel model for broadband power-line communication," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 1, pp. 135–141, 2007.

[91] J. Anatory, N. Theethayi, M. M. Kissaka, N. H. Mvungi, and R. Thottappillil, "The effects of load impedance, line length, and branches in the bplc—transmission-lines analysis for medium-voltage channel," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 4, pp. 2156–2162, 2007.

[92] J. Anatory, N. Theethayi, R. Thottappillil, M. M. Kissaka, and N. H. Mvungi, "An experimental validation for broadband power-line communication (bplc) model," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 3, pp. 1380–1383, 2008.

[93] F. J. Canete, J. A. Cortés, L. Diez, and J. T. Entrambasaguas, "A channel model proposal for indoor power line communications," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 49, no. 12, pp. 166–174, 2011.

[94] W. Liu, M. Sigle, and K. Dostert, "Channel characterization and system verification for narrowband power line communication in smart grid applications," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 49, no. 12, pp. 28–35, 2011.

[95] J. Vasseur, P. Bertrand, C. Chauvenet, B. Aboussouan, , E. Gnoske, and K. Pister, "A survey of several low power link layers for ip smart objects," *Internet Protocol for Smart Objects (IPSO) Alliance*, 2010.

[96] B. L. Titzer, D. K. Lee, and J. Palsberg, "Avrora: Scalable sensor network simulation with precise timing," in *Information Processing in Sensor Networks, 2005. IPSN 2005. Fourth International Symposium on.* IEEE, 2005, pp. 477–482.

[97] J. Eriksson, A. Dunkels, N. Finne, F. Österlind, F. Voigt, and N. Tsiftes, "Demo abstract: Mspsim-an extensible simulator for msp430-equipped sensor boards," in *European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN 2008), Demo Abstract, Bologna, Italy*, 2008.

[98] R. de Paz Alberola and D. Pesch, "Avroraz: extending avrora with an ieee 802.15. 4 compliant radio chip model," in *Proceedings of the 3nd ACM workshop on Performance monitoring and measurement of heterogeneous wireless and wired networks.* ACM, 2008, pp. 43–50.

[99] (2010). [Online]. Available: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f1611.pdf

[100] (2010). [Online]. Available: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f5438a.pdf

[101] K. Akkaya and M. Younis, "A survey on routing protocols for wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 3, no. 3, pp. 325–349, 2005.

[102] J. J. Rodrigues and P. A. Neves, "A survey on ip-based wireless sensor network solutions," *International Journal of Communication Systems*, vol. 23, no. 8, pp. 963–981, 2010.

[103] D. Sturek. (2009) Zigbee ip stack overview. [Online]. Available: https://docs.zigbee.org/zigbee-docs/dcn/09-5375.pdf

[104] D. Popa, J. Jetcheva, N. Dejean, R. Salazar, J. Hui, and K. Monden, "Applicability statement for the routing protocol for low power and lossy networks (rpl) in ami networks," IETF draft, May 2012.

[105] P. Levis, A. Tavakoli, and S. Dawson-Haggerty, "Overview of existing routing protocols for low power and lossy networks," IETF draft, 2009.

[106] M. Biagi and L. Lampe, "Geo-routing for plc in smart grids," *ISPLC*, 2010.

[107] M. H. Mazlan, F. Mohamad, R. A. Rashid, M. A. Sarijari, and M. R. A. Rahim, "Real-time communication routing protocol for home automation via power line," in *Proceedings of 2008 Student Conference on Research and Development (SCOReD 2008)*, 2008, pp. 26–27.

[108] G. Bumiller, L. Lu, and Y. Song, "Analytic performance comparison of routing protocols in master-slave plc networks," in *Power Line Communications and Its Applications, 2005 International Symposium on*. IEEE, 2005, pp. 116–120.

[109] F. Pacheco, L. M. Pinho, and E. Tovar, "Queuing and routing in a hierarchical powerline communication system," in *Emerging Technologies and Factory Automation, 2005. ETFA 2005. 10th IEEE Conference on*, vol. 2. IEEE, 2005, pp. 8–pp.

[110] O. Gaddour and A. Koubâa, "Rpl in a nutshell: A survey," *Computer Networks*, 2012.

[111] O. Gnawali, R. Fonseca, K. Jamieson, D. Moss, and P. Levis, "Collection tree protocol," in *Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. ACM, 2009, pp. 1–14.

[112] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, "Ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing," RFC 3561, July 2003.

[113] C. Perkins and I. Chakeres, "Dynamic manet on-demand (aodvv2) routing draft-ietf-manet-dymo-24," IETF draft, December 2012.

[114] T. Clausen, A. Colin de Verdiere, J. Yi, A. Niktash, Y. Igarashi, H. Satoh, U. Herberg, C. Lavenu, T. Lys, C. Perkins, and J. Dean, "The lightweight on-demand ad hoc distance-vector routing protocol - next generation (loadng) draft-clausen-lln-loadng-06," IETF draft, October 2012.

[115] D. S. D. Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, "A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing," *Wireless Networks*, vol. 11, no. 4, pp. 419–434, 2005.

[116] N. Tsiftes, J. Eriksson, and A. Dunkels, "Low-power wireless ipv6 routing with contikirpl," in *Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*. ACM, 2010, pp. 406–407.

[117] P. A. Levis, N. Patel, D. Culler, and S. Shenker, *Trickle: A self regulating algorithm for code propagation and maintenance in wireless sensor networks*. Computer Science Division, University of California, 2003.

[118] J. M. Lucas and M. S. Saccucci, "Exponentially weighted moving average control schemes: properties and enhancements," *Technometrics*, vol. 32, no. 1, pp. 1–12, 1990.

[119] V. Raghunathan, C. Schurgers, S. Park, and M. Srivastava, "Energy-aware wireless microsensor networks," *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 19, no. 2, pp. 40–50, 2002.

[120] A. Ben Nacef, S.-M. Senouci, Y. Ghamri-Doudane, and A.-L. Beylot, "A cooperative low power mac protocol for wireless sensor networks," in *Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on*. IEEE, 2011, pp. 1–6.

[121] A. Dumbrava, R. Kacimi, R. Dhaou, and A.-L. Beylot, "Proportion based protocols for load balancing and lifetime maximization in wireless sensor networks," in *Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net), 2010 The 9th IFIP Annual Mediterranean*. IEEE, 2010, pp. 1–8.

[122] J.-L. Lu, F. Valois, and D. Barthel, "Low-energy self-organization scheme for wireless ad hoc sensor networks," in *Wireless on Demand Network Systems and Services, 2007. WONS'07. Fourth Annual Conference on.* IEEE, 2007, pp. 138–145.

[123] [Online]. Available: http://www.atmel.com/Images/doc5131.pdf

[124] [Online]. Available: http://www.atmel.com/Images/doc8168.pdf

[125] A. Dunkels, "The ContikiMAC Radio Duty Cycling Protocol," Swedish Institute of Computer Science, Tech. Rep. T2011:13, Dec. 2011. [Online]. Available: http://www.sics.se/~adam/dunkels11contikimac.pdf

[126] C. Bornmann, "6lowpan generic compression of headers and header-like payloads," IETF draft, 2011.

[127] Z. Shelby and C. Chauvenet, "The ipso application framework," August 2012. [Online]. Available: http://www.ipso-alliance.org/wp-content/media/draft-ipso-app-framework-04.pdf

[128] (2012). [Online]. Available: http://www.silabs.com

[129] M. Buettner, G. Yee, E. Anderson, and R. Han, "X-mac: a short preamble mac protocol for duty-cycled wireless sensor networks," in *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems.* ACM, 2006, pp. 307–320.

[130] J.-P. Vasseur and A. Dunkels, *Interconnecting smart objects with ip: The next internet.* Morgan Kaufmann, 2010.

[131] S. Cui, A. J. Goldsmith, and A. Bahai, "Energy-efficiency of mimo and cooperative mimo techniques in sensor networks," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 22, no. 6, pp. 1089–1098, 2004.

[132] Q. Wang and W. Yang, "Energy consumption model for power management in wireless sensor networks," in *Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, 2007. SECON'07. 4th Annual IEEE Communications Society Conference on.* IEEE, 2007, pp. 142–151.

[133] (2009). [Online]. Available: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmp112.pdf

[134] L. B. Saad and B. Tourancheau, "Multiple mobile sinks positioning in wireless sensor networks for buildings," in *SENSORCOMM '09: Proceedings of the 2009 Third International Conference on Sensor Technologies and Applications.* Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2009, pp. 264–270.

[135] F. Theoleyre and F. Valois, "A self-organization structure for hybrid networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 6, no. 3, pp. 393–407, 2008.

[136] A. Dunkels, T. Voigt, and J. Alonso, "Making tcp/ip viable for wireless sensor networks," in *Proceedings of the First European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN 2004)*, Berlin, Germany, Jan. 2004.

[137] M. Yarvis, A. Kushalnagar, H. Singh, Y. Liu, and S. Singh, "Exploiting heterogeneity in sensor networks," in *INFOCOM*, vol. 2. IEEE, 2005, pp. 878–890.

[138] T. van Dam and K. Langendoen, "An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks," in *SenSys '03: Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*. New York, NY, USA: ACM, 2003, pp. 171–180.

[139] C. Chauvenet, B. Tourancheau, and D. Genon-Catalot, "Wireless ipv6 sensor nodes energy evaluations," in *Ubimob 2013*, 2013.

[140] J. Nieminen, T. Sovalainen, M. Isomaki, B. Patil, Z. Shelby, and C. Gomez, "Transmission of ipv6 packets over bluetooth low energy," IETF draft, 2013.

[141] "A standardized and flexible ipv6 architecture for field area networks," White Paper, December 2011. [Online]. Available: http://www.cisco.com/web/strategy/docs/energy/ip_arch_sg_wp.pdf

[142] J. Vasseur, N. Agarwal, J. Hui, Z. Shelby, P. Bertrand, and C. Chauvenet, "Rpl: The ip routing protocol designed for low power and lossy networks," IPSO White Paper, April 2011.

[143] J. Vasseur, J. Hui, S. Dasgupta, G. Yoon, and C. Chauvenet, "Rpl deployment experience in large scale networks," IETF draft, October 2012.

[144] O. Alliance, "Lightweight machine to machine architecture," November 2012. [Online]. Available: http://technical.openmobilealliance.org/Technical/release_program/docs/LightweightM2M/V1_0-20121127-C/OMA-AD-LightweightM2M-V1_0-20121127-C.pdf

[145] C. Chauvenet, J. Puech, M. Pouillot, and P. Goudet, "Qualification and performance of wpc component in homes environments," Livrable 4.6.2D du programme Homes, Tech. Rep., 2011.

[146] C. Chauvenet, B. Tourancheau, and D. Genon-Catalot, "Energy evaluations for wireless ipv6 sensor nodes," in *International Conference on Sensor Technologies and Applications SENSORCOMM 2013*, 2013.